

QUELQUES OBSERVATIONS SUR L'EXTRACTION DE L'HUMUS DANS LES SOLS METHODE AU PYROPHOSPHATE DE SODIUM

Ch. THOMANN

Chargée de recherches — ORSTOM

SOMMAIRE

L'Auteur a comparé les quantités d'acides humiques extraites par différents réactifs : oxalate d' NH_4 à 3 %, soude à 1 %, fluorure de Na à 1 % et pyrophosphate de Na à différentes concentrations, sur des sols très différents, de zones tempérée, steppique et tropicale.

L'influence du pH des solutions de pyrophosphate a été étudiée en détail.

L'Auteur pense que le pyrophosphate de Na, en complexant les cations métalliques, dissout les humates calciques et que l'augmentation de pH agit surtout sur la dispersion. Il adopte un pH 10 qui correspond à un palier de la courbe d'extraction de l'humus en fonction du pH : une faible variation de pH n'entraîne donc pas de variation importante des quantités d'acides humiques extraites. Dans une note ultérieure la méthode sera testée sur un cas précis : les sols ferrallitiques.

I — INTRODUCTION

A — GENERALITES

On connaît toute l'importance que présente l'humus du point de vue physico-chimique et biologique dans les sols.

Les matières humiques (humus "sensu stricto") peuvent être définies comme "des complexes colloïdaux, relativement stables et résistants à l'action microbienne, qui se minéralisent à leur tour mais beaucoup plus progressivement que la matière organique fraîche" (DUCHAUFOR 1960).

L'humus représente donc dans le sol, un stade avancé d'évolution de la matière organique, par opposition à la matière organique fraîche (débris organiques végétaux et animaux : feuilles, rameaux morts, débris de culture, etc.), de laquelle il provient.

Entre ces deux extrêmes, matière organique fraîche et humus, existe toute une série de produits intermédiaires, de constitution et de composition chimique très variables, et actuellement encore peu précisées.

L'humus, en tant que tel, n'a pas, non plus, une composition chimiquement bien définie, car il n'existe pas "un" humus, mais "des" humus, conséquence naturelle de son origine (POCHON et BARJAC 1958). Cependant, un grand nombre d'auteurs est d'accord pour reconnaître une composition générale, comprenant, d'après le mode et le degré de fractionnement :

— *les acides humiques* (fraction précipitable par les acides, à partir d'une solution alcaline d'humus) constitués d'après KONONOVA (1958) par "des produits de condensation de substances aromatiques avec des produits de décomposition des protéines, et la participation éventuelle d'hydrates de carbone"; on peut les scinder en deux types :

— les acides humiques bruns, pauvres en azote, peu liés aux argiles, difficilement floculés par le calcium, brun-rouge, et caractéristiques des mull légèrement acides ;

— les acides humiques gris, riches en azote, fortement liés aux argiles, facilement floculés par le calcium, brun-noir, et dominant dans les humus calciques.

— *les acides fulviques* (fraction non précipitable par les acides, à partir d'une solution alcaline d'humus), dits aussi acides créniques et apocréniques (KONONOVA 1958), un peu moins riches en carbone que les acides humiques, constitués également par des produits aromatiques (uronides, polysaccharides, acides organiques, polyphénols).

Ajoutons à ces deux fractions principales, obtenues par solubilisation dans les solutions alcalines, une fraction hydrolysable par HCl 6 N, représentée par des acides humiques très liés aux argiles et des polyuronides.

— Enfin *l'humine*, fraction insoluble dans les solvants habituels (aussi bien dans les solutions alcalines, que dans le bromure d'acétyle), et qui paraît douée du plus haut degré de condensation.

L'analyse de l'humus, d'après les travaux de nombreux auteurs, peut donner diverses fractions variables, autant qualitativement que quantitativement, celles-ci dépendant essentiellement du réactif d'extraction utilisé.

B — REACTIFS D'EXTRACTION DE L'HUMUS

Nous rappellerons brièvement les différents réactifs utilisés depuis plus d'un siècle (TINSLEY et SALAM 1961).

La soude a, depuis longtemps, été employée très largement par de nombreux auteurs; c'est le solvant de l'humus le plus énergique, à condition toutefois d'effectuer un prétraitement acide sur certains types de sol (à humus calcique en particulier). Elle a été utilisée à froid ou à chaud, en solutions plus ou moins diluées (de 0,4 à 2 %), mais son utilisation présente de graves inconvénients, entre autres, des modifications chimiques de la matière organique, que nous exposerons plus loin.

L'ammoniaque a été aussi employée, seule ou avec la soude, ainsi que le carbonate de soude et la potasse. Plus récemment, quelques auteurs ont suggéré que des réactifs capables de complexer les cations métalliques liés aux fractions humiques pourraient être essayés; c'est ainsi qu'a été utilisé un certain nombre de sels alcalins : le fluorure de sodium, l'oxalate, le malonate, le salicylate d'ammonium, le citrate de sodium, et plus récemment le sulfite de sodium. L'E.D.T.A. serait aussi un extractant efficace, mais il ne permet pas d'effectuer des dosages de carbone et d'azote sur les solutions, ce qui limite son emploi.

Le pyrophosphate de sodium connaît, à l'heure actuelle, une grande vogue, et depuis que BREMNER et LEES l'ont proposé (1949), son emploi s'est largement étendu : SPRINGER et KLEE en ALLEMAGNE (1958), ALEXANDROVA (1960) en RUSSIE.

II — CHOIX DU PYROPHOSPHATE DE SODIUM COMME SOLVANT DE L'HUMUS

A — AVANTAGES DU PYROPHOSPHATE DE SODIUM SUR LA SOUDE

Le pyrophosphate de sodium ayant été reconnu par divers spécialistes comme le meilleur réactif d'extraction de l'humus des sols, nous l'avons adopté en tant que tel. Ce sel présente bien des avantages sur la soude, dans les conditions mêmes de son emploi. Contrairement à la soude, un certain nombre de facteurs n'a qu'une action très faible sur la quantité d'humus

extraite, ces facteurs étant : le broyage plus ou moins fin du sol, un traitement acide préliminaire, une extraction plus ou moins prolongée, une agitation continue, une augmentation de la concentration du réactif d'extraction, un accroissement de la température au cours de l'extraction. Tous ces facteurs ne jouent que très peu lors de l'extraction au pyrophosphate de Na, alors que dans le cas de la soude, ils sont tous d'une importance primordiale (BREMNER et LEES 1949).

Dans le cas du pyrophosphate, les conditions mêmes de l'extraction de l'humus seront ainsi faciles à préciser, alors que pour la soude, elles seraient trop incertaines. La méthode d'extraction à la soude présente également d'autres défauts ; non seulement elle agit comme solubilisant de l'humus, mais aussi elle attaque la matière organique non décomposée, non humifiée, par diverses réactions, d'oxydation notamment, modifiant la nature chimique des composés organiques, et provoquant, à la fois des réactions de décomposition (par exemple, l'hydrolyse des acides aminés, l'attaque des polymères des sucres, etc.) et de synthèse (réactions de condensation entre les composés aminés et les composés à fonctions aldéhyde ou phénol).

Le pyrophosphate de sodium, grâce à son action comme complexant des cations métalliques (Ca, Fe et Al) dissocie les humates calciques et aluminoferriques; son emploi direct sur le sol permet une bonne extraction de l'humus, contrairement à la soude, qui n'agit pas sur les humates calciques, lesquels doivent être préalablement dissociés par une solution acide.

Le pyrophosphate de sodium nous a ainsi semblé de beaucoup préférable à la soude. Comme il permet également une plus forte extraction d'humus que les autres sels alcalins, nous l'avons utilisé dans nos recherches.

B — IMPORTANCE DU pH DE LA SOLUTION DE PYROPHOSPHATE DE SODIUM

Tous les auteurs ayant étudié cette question reconnaissent l'influence considérable du pH de la solution d'extraction sur la quantité d'humus extraite. Que l'on utilise du carbonate de sodium, du fluorure de sodium, ou du pyrophosphate de sodium, on observe un accroissement des matières humiques extraites, quand le pH augmente (BREMNER et LEES 1949, EVANS 1959).

Aussi, afin de préciser cette influence du pH des solutions de pyrophosphate de sodium, avons-nous établi, pour différents sols et composés végétaux, les courbes d'extraction de l'humus en fonction du pH, d'une part pour les matières humiques totales (figures 1 A et 1 B), d'autre part pour les acides humiques (figures 2 A et 2 B) et les acides fulviques (figures 3 A et 3 B); les résultats analytiques concernant ces courbes sont exposés dans le tableau I.

Précisons que le pyrophosphate de sodium 0,1 M en solution aqueuse donne un pH $\approx$ 10,0 ($\pm$ 0,15)*; afin d'abaisser le pH nous avons ajouté quelques gouttes d'acide phosphorique, de manière à obtenir les pH de 4,0 - 5,0 - 6,0 - 7,0 - 8,0 et 9,0, et pour monter le pH, nous avons ajouté un peu de lessive de soude, de façon à avoir les pH de 11,0 et 12,0 (pour ce même pH, une solution de Na OH à 1% extrait autant de matières humiques que la solution de pyrophosphate). Les matières humiques extraites pour chacun de ces pH ont été ensuite dosées par oxydation au permanganate de potassium, les acides humiques et fulviques ayant été séparés de la manière classique par précipitation des acides humiques en milieu acide (concentration en $\text{SO}_4 \text{H}_2 = 10\%$), puis dosés comme les matières humiques totales.

L'examen de ces courbes nous montre que :

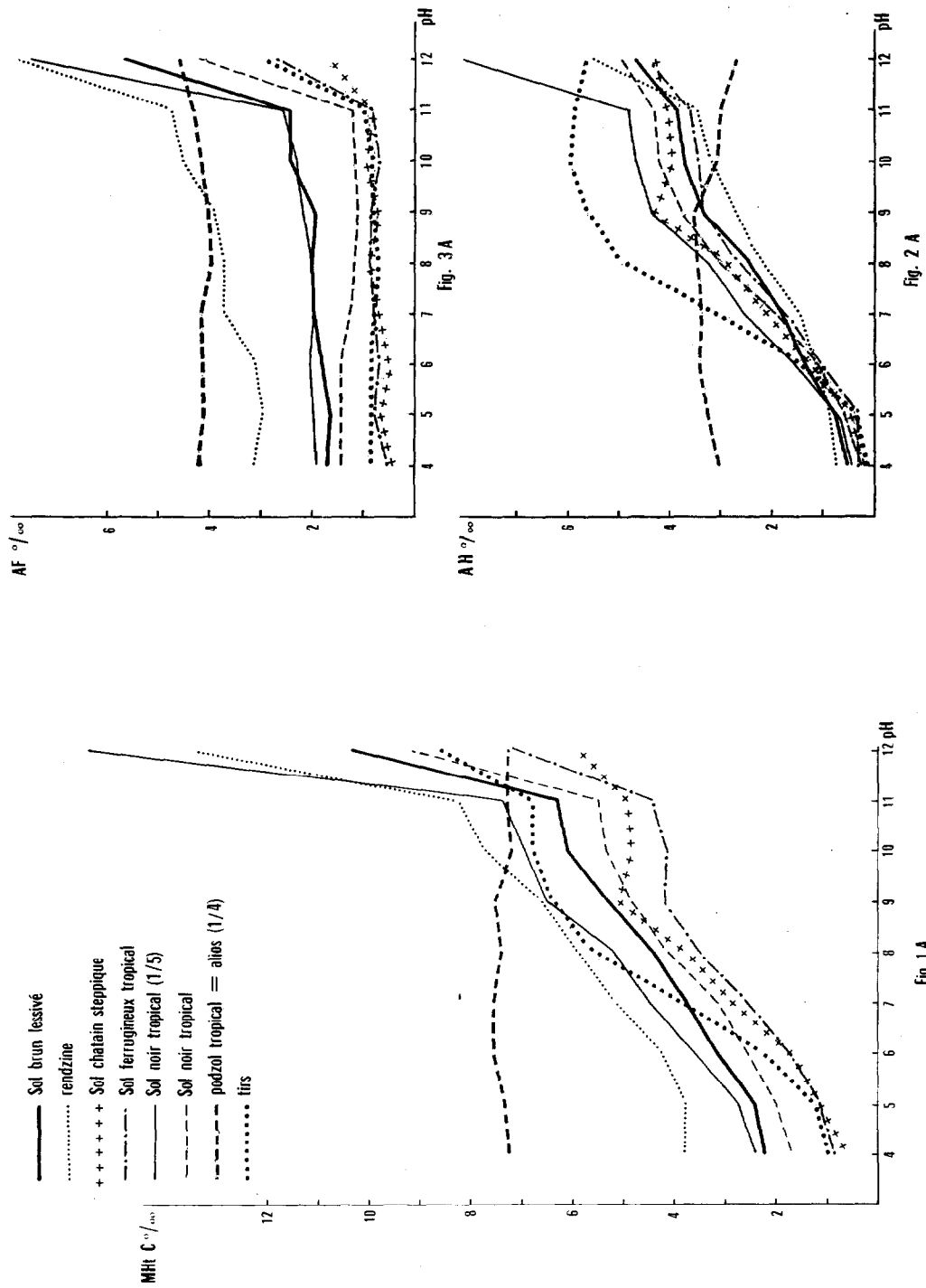
1. dans tous les cas (fig. 1 A et 1 B), sauf celui d'un horizon B de podzol, il y a augmentation des matières humiques extraites, quand le pH augmente ; cette augmentation se fait à peu près régulièrement de pH = 4 à pH = 9; de pH = 9 à pH = 11, elle est moins prononcée et nous observons à ces pH une sorte de palier. Puis à partir de pH = 11, un très brusque accrois-

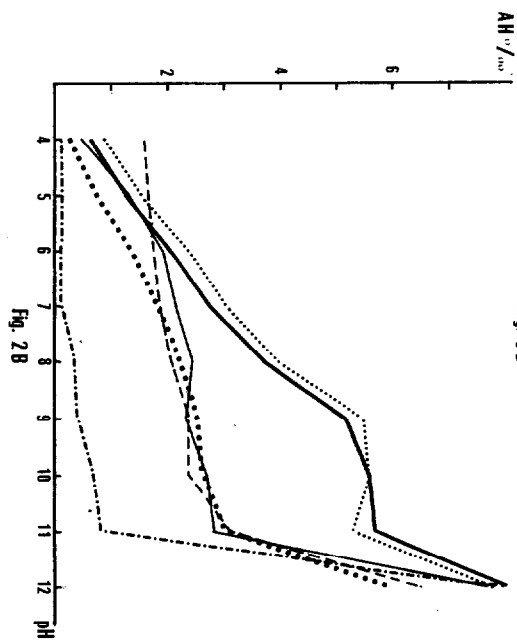
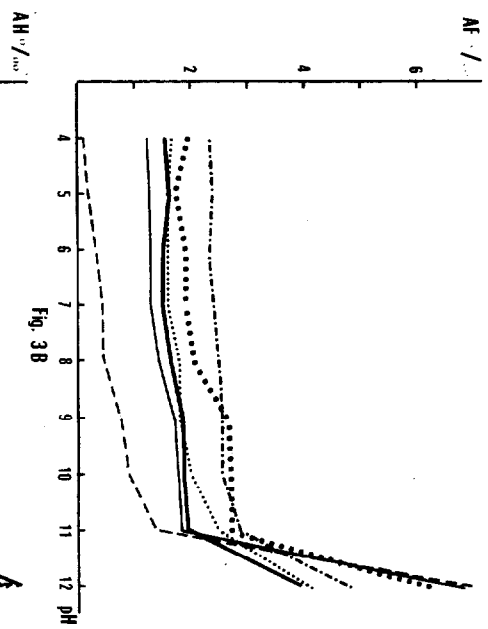
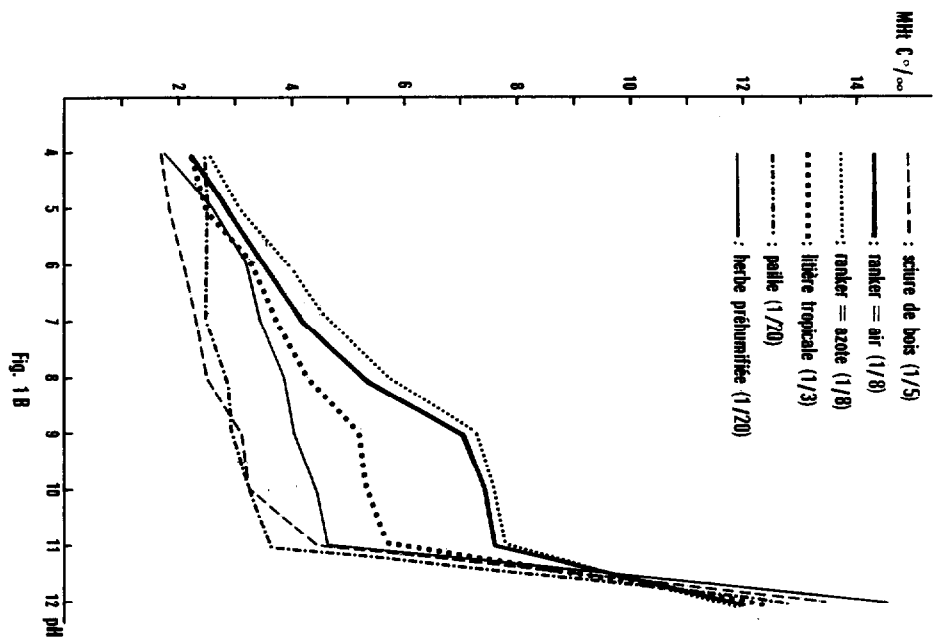
* Nous avons comparé les pH donnés par des pyrophosphates de sodium de fabrication différente (origines française, allemande, anglaise) et nous avons obtenu, dans tous les cas, ce même pH voisin de 10,0, bien que pour Mme ALEXANDROVA (1960) le pH du pyrophosphate ne dépasse pas 8 - 8,5.

TABLEAU I

EXTRACTION DE L'HUMUS, EN FONCTION DU pH DES SOLUTIONS
DE PYROPHOSPHATE Na 0,1 M

échantillons	pH	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Sol brun lessivé (France) 25-50 cm	MHt %	2,20	2,40	3,15	3,75	4,40	5,30	6,10	6,30	10,30
	A H %	0,50	0,75	1,35	1,80	2,40	3,35	3,70	3,85	4,65
	A F %	1,70	1,65	1,80	1,95	2,00	1,95	2,40	2,45	5,65
Rendzine (France) 0-30 cm	MHt %	3,85	3,80	4,25	5,15	5,90	6,60	7,70	8,20	13,40
	A H %	0,70	0,85	1,15	1,45	2,20	2,70	3,20	3,45	5,55
	A F %	3,15	2,95	3,10	3,70	3,70	3,90	4,50	4,75	7,85
Sol châtain steppique (Maroc) 0-20 cm	MHt %	0,65	1,10	1,75	2,85	3,80	5,05	4,85	4,90	5,95
	A H %	0,20	0,45	1,25	2,20	2,95	4,30	3,95	4,05	4,25
	A F %	0,45	0,65	0,50	0,65	0,85	0,75	0,90	0,85	1,70
Sol ferrugineux tropic. (Togo) 0-15 cm	MHt %	0,85	1,15	1,75	2,55	3,50	4,20	4,15	4,40	7,10
	A H %	0,30	0,35	1,05	1,75	2,65	3,35	3,45	3,60	4,40
	A F %	0,55	0,80	0,70	0,80	0,85	0,85	0,70	0,80	2,70
Sol noir tropical (Togo) 0-10 cm	MHt %	1,70	2,00	2,55	3,15	4,15	4,85	5,35	5,50	9,15
	A H %	0,25	0,55	1,10	1,90	3,00	3,75	4,20	4,30	4,95
	A F %	1,45	1,45	1,45	1,25	1,15	1,10	1,15	1,20	4,20
Sol noir tropical (Dahomey) 5-15 cm	MHt %	11,90	13,40	18,00	22,40	26,00	32,60	34,80	36,80	77,60
	A H %	2,30	3,55	7,85	12,65	15,95	21,75	23,30	24,10	40,20
	A F %	9,60	9,85	10,15	9,75	10,05	10,85	11,50	12,70	37,40
Podzol tropical (alios) (Côte d'Ivoire)	MHt %	29,00	29,40	30,20	30,20	29,60	30,00	28,80	29,20	29,00
	A H %	12,10	13,00	13,65	13,50	13,85	13,95	12,15	12,00	10,70
	A F %	16,90	16,40	16,55	16,70	15,75	16,05	16,65	17,20	18,30
Tirs (Maroc) 10-20 cm	MHt %	1,00	1,25	2,30	3,85	5,65	6,40	6,80	6,80	8,60
	A H %	0,15	0,40	1,45	3,05	4,90	5,60	5,95	5,85	5,65
	A F %	0,85	0,85	0,85	0,80	0,75	0,80	0,85	0,95	2,95
Sciure de bois	MHt %	8,50	9,20	10,40	11,45	12,50	15,60	16,15	22,20	67,35
	A H %	8,00	8,25	8,75	9,30	10,15	11,80	11,70	15,25	32,50
	A F %	0,50	0,95	1,65	2,15	2,35	3,80	4,45	6,95	34,85
Ranker (Côte d'Ivoire) Extraction à l'air 0-5 cm	MHt %	17,45	23,00	28,35	33,75	42,60	56,35	59,35	60,85	95,55
	A H %	4,95	9,95	16,15	21,75	29,50	41,35	44,35	45,25	64,05
	A F %	12,50	13,05	12,20	12,00	13,10	15,00	15,00	15,60	31,50
Ranker (Côte d'Ivoire) Extraction sous azote	MHt %	20,25	24,65	31,65	37,00	46,05	58,35	60,65	62,35	95,00
	A H %	6,95	11,85	18,85	24,20	31,50	43,60	44,70	42,25	62,10
	A F %	13,30	12,80	12,80	12,80	14,55	14,75	15,95	20,10	32,90
Litière (sous forêt) (Cameroun)	MHt %	6,65	7,50	9,90	11,20	12,90	15,60	16,10	17,10	36,25
	A H %	0,75	2,25	4,10	5,40	6,65	7,55	7,85	8,95	17,40
	A F %	5,90	5,25	5,80	5,80	6,25	8,05	8,25	8,15	18,85
Paille	MHt %	4,95	5,05	4,95	5,00	5,70	5,95	6,55	7,30	25,50
	A H %	0,25	0,25	0,25	0,20	0,70	0,80	1,40	1,55	15,95
	A F %	4,70	4,80	4,70	4,80	5,00	5,15	5,15	5,75	9,55
Herbe Préhumifiée	MHt %	3,50	5,20	6,40	6,90	7,75	8,10	8,85	9,35	29,10
	A H %	1,00	2,60	3,80	4,25	4,85	4,65	5,30	5,65	15,35
	A F %	2,50	2,60	2,60	2,65	2,90	3,45	3,55	3,70	13,75





sement double la proportion de matières humiques extraites par rapport à celle obtenue à pH = 9. Notons que, même si l'extraction est effectuée à l'abri de l'air (cas du ranker, sol particulièrement riche à la fois en humus et en matière organique non évoluée, et pour lequel une extraction à l'air et une extraction sous azote ont été effectuées), cela ne change en rien l'allure de la courbe; elle se superpose, aux erreurs d'expérience près, à celle obtenue pour l'extraction de l'humus à l'air. Dans le cas de la sciure de bois et de la paille, on peut remarquer que l'accroissement des matières réductrices extraites (on ne peut spécifier ici de matières humiques) est beaucoup moins important que dans tous les autres cas.

Le tableau II nous indique, en pourcentages, l'accroissement de matières humiques extraites, comparativement entre les pH 5, 10 et 12. Prenons le cas du sol brun lessivé, par exemple. On observe une augmentation de 60,7% de matières humiques totales, quand on passe de pH = 5 à pH = 10, et 68,9% quand on fait les extractions de pH = 10 à pH = 12. De même, les acides humiques augmentent de 79,7% de pH = 5 à pH = 10, mais seulement de 25,7% de pH = 10 à pH = 12, et enfin pour les acides fulviques, une augmentation de 31,3% est indiquée pour le passage de pH = 5 à pH = 10, alors qu'un accroissement très important de 135,4% est observé quand on passe de pH = 10 à pH = 12.

En ce qui concerne les matières humiques totales, on remarque une valeur moyenne de 60% d'augmentation dans l'extraction à pH = 10 par rapport au pH = 5, mais ceci uniquement pour les sols, alors que pour les composés, tels que sciure de bois, paille, herbe préhumifiée, ce taux s'abaisse à 40 et 20%, ce qui prouve que l'élévation du pH ne favorise pas tellement la fabrication de composés organiques réducteurs, car sur des matériaux végétaux purs, on aurait pu s'attendre à une augmentation beaucoup plus forte.

Pour les sols, l'élévation du pH agit essentiellement sur la dispersion, celle-ci étant plus complète à pH plus élevé, l'humus, mieux séparé de la fraction minérale, se solubilise d'autant mieux. On voit d'ailleurs que, dans le cas de l'alios de podzol, représenté schématiquement par un mélange d'humus, de fer et de sable, les phénomènes de dispersion n'entrent pas en ligne de compte, et l'humus est aussi bien solubilisé à pH = 4 qu'à pH = 10 ou 12. Dans le cas du pH = 12, nous remarquons des valeurs, comparativement au pH = 10, beaucoup plus variées suivant le sol (valeur moyenne de 70% d'accroissement, mais tombant à 20% dans le cas des sols steppiques); ceci semble dû à un degré différent d'évolution de la matière organique. Dans le cas des composés végétaux, les taux d'accroissement s'élèvent à plus de 200 et 300% : aucun doute que dans ces cas là, la solution sodique "fabrique" des corps réducteurs; le ranker se comporte comme un véritable sol, l'accroissement de matières humiques totales à pH = 12 n'étant que de 60% par rapport au pH = 10. Par contre, un des sols noirs tropicaux (celui du Dahomey), particulièrement riche en matière organique possède vraisemblablement une matière organique pas très évoluée, le taux d'augmentation de 125% étant comparable à celui de la litière tropicale.

2. pour les acides humiques (fig. 2 A et 2 B), sauf dans le cas de l'alios de podzol, on observe des courbes identiques à celles obtenues pour les matières humiques totales, c'est-à-dire un accroissement relativement régulier, quand le pH s'élève. D'après le tableau II, cet accroissement de pH = 5 à pH = 10 est de 80% pour les sols, ainsi que pour la paille (nous remarquerons toutefois que, dans ce dernier cas, l'accroissement ne s'effectue qu'à partir de pH = 7; dès que le pH devient alcalin, il y a une réaction sur la paille); mais celle-ci ne peut être assimilée aux sols, puisque dans le cas du passage de pH = 10 à pH = 12, le taux d'accroissement s'élève à 1040%; il n'y a donc aucune comparaison possible. Là encore cet accroissement d'acides humiques principalement en fonction du pH est une question de dispersion, le pyrophosphate de sodium dissociant les associations humates - cations métalliques (Ca, Fe, Al), pour laisser en solution les humates alcalins solubles. A pH = 12, l'augmentation est très variable; elle peut être insignifiante (cas des sols steppiques), ou relativement importante (73,4%) dans le cas de la rendzine, mais elle est toujours supérieure à 100% dans le cas des composés végétaux.

3. pour les acides fulviques (fig. 3 A et 3 B) l'allure des courbes est tout à fait différente de celle des acides humiques, qu'il s'agisse des sols ou des composés végétaux: l'augmentation de la quantité d'acides fulviques extraite en fonction du pH, est pratiquement insignifiante jusqu'au pH = 11; les acides fulviques sont donc beaucoup plus facilement solubili-

TABLEAU II

TAUX DE MATIERES HUMIQUES EXTRAITES AUX pH = 5 , 10 et 12

Echantillons	MHt 10 - MHt 5	MHt 12 - MHt 10	AH 10 - AH 5	AH 12 - AH 10	AF 10 - AF 5	AF 12 - AF 10
	MHt 10	MHt 10	AH 10	AH 10	AF 10	AF 10
	x 100	x 100	x 100	x 100	x 100	x 100
Sol brun lessivé	60,7	68,9	79,7	25,7	31,3	135,4
Rendzine	50,6	74,0	73,4	73,4	34,4	74,4
Sol châtain steppique	77,3	22,7	88,6	7,6	27,8	88,9
Sol ferrugineux tropical	72,3	71,1	89,8	27,5	-14,3	285,7
Sol noir tropical (T)	62,6	71,0	86,9	17,9	-26,1	265,2
Sol noir tropical (D)	61,5	123,0	84,8	72,5	14,3	225,2
Podzol tropical (alios)	- 2,1	0,7	- 7,0	-11,9	1,5	9,9
Tirs	81,6	26,5	93,3	- 5,0	0	247,0
Sciure de bois	43,0	317,0	29,5	177,8	78,6	683,1
Ranker (extraction air)	61,2	61,0	77,6	44,4	13,0	110,0
Ranker (extraction azote)	59,4	56,6	73,5	38,9	19,7	106,3
Litière tropicale	53,4	125,2	71,3	121,7	36,4	128,5
Paille	22,9	289,3	82,1	1 039,3	6,8	85,4
Herbe préhumifiée	41,2	228,8	50,9	189,6	26,8	287,3

Mht 5 = matières humiques totales, extraites à pH = 5

Mht 10 = " " " " pH = 10

Mht 12 = " " " " pH = 12

AH 5 = acides humiques extraits à pH = 5

AH 10 = " " " " pH = 10

AH 12 = " " " " pH = 12

AF 5 = acides fulviques extraits à pH = 5

AF 10 = " " " " pH = 10

AF 12 = " " " " pH = 12

sables que les acides humiques, et ne nécessitent pas, comme ces derniers, d'être d'abord dispersés. Dans le cas de la sciure de bois seulement, on augmente un peu la proportion de corps réducteurs solubles, quand on élève le pH; dans tous les autres cas, on ne dépasse pas 35%. Mais au pH = 12, les variations deviennent considérables, aussi bien pour les sols que pour les composés végétaux, les taux atteignent 100 et 200%, dans le cas général, et jusqu'à 600% pour la sciure de bois. On peut donc penser, que des composés secondaires, de propriétés voisines de celles des acides fulviques, se forment au cours de l'extraction, par action de la solution sodique sur le matériel végétal non décomposé.

Remarquons que la solution sodique de pH = 12 agit sur la paille, constituée en grande partie de cellulose, en "fabriquant" des composés voisins des acides humiques, et sur la sciure de bois, comprenant un pourcentage élevé de lignine, en "fabriquant" des composés voisins des acides fulviques. Dans le cas de la litière tropicale, riche également en cellulose et en lignine, nous observons à pH = 12, un accroissement proportionnellement identique d'acides humiques et d'acides fulviques.

C – ADOPTION DU pH = 10

D'après les courbes précédentes, il ressort très nettement qu'en aucun cas, il ne faut travailler à pH = 12. A un tel pH les modifications sur la matière organique non décomposée sont trop importantes, la quantité d'acides fulviques extraite ne correspond pas en réalité aux acides fulviques proprement dits, mais en grande partie à des artéfacts, comme le prouve l'action de la soude sur la sciure de bois et la paille. Un certain nombre d'auteurs utilisent des solutions d'extraction de pH = 7, mais ce pH correspond, sur les courbes, à des portions dont la pente est particulièrement forte; une faible modification de sa valeur entraînerait ainsi une variation importante des quantités d'acides humiques et d'acides fulviques obtenues. Au contraire, à pH = 10, correspond un certain palier pour les acides humiques paraissant correspondre à une extraction plus régulièrement constante de composés plus définis et permettant ainsi une détermination plus reproductible. Grâce à leur mise en dispersion, très élevée à ce pH, ceux-ci sont extraits au maximum, sans, semble-t-il, être profondément modifiés. A ce pH, certaines réactions peuvent déjà intervenir, entre autres une modification des protéines qui se ferait à partir de pH = 8, mais elles nous paraissent de peu d'importance à côté de celles obtenues au pH = 12. Pour les acides fulviques, ce pH correspond encore à la partie droite de la courbe, avant la grande remontée observée pour le pH = 12.

De plus, ce pH de 10 est le pH donné par une solution aqueuse de pyrophosphate de sodium O, IM. La solution d'extraction est donc réalisée très simplement.

Tous les facteurs susceptibles de jouer sur l'extraction de l'humus, tels que température, concentration de la solution, temps de contact avec le sol, rapport sol/solution etc. ayant été vérifiés par différents auteurs (5 et 8), nous proposons donc la méthode suivante pour l'extraction des matières humiques du sol.

D – METHODE PROPOSEE

Signalons que pour nos premières analyses d'humus (courbes précédemment établies), le dosage lui-même des matières humiques a été fait par le permanganate de potassium, mais il nous a semblé préférable, depuis, d'effectuer les oxydations par une solution sulfo-chromique, d'après la méthode de TIURIN (KONONOVA 1958), le permanganate étant trop sensible, dans son action, à la concentration en acide de la solution, au temps d'ébullition etc. Précisons que la corrélation entre les 2 méthodes (celle au permanganate et celle au bichromate de potassium) est excellente : pour 86 échantillons, $r = 0,999$, l'équation est la suivante : $y = 0,398 x + 0,15$
 y = matières humiques totales dosées par la méthode TIURIN (résultats exprimés en C%).
 x = matières humiques totales dosées par la méthode au permanganate (résultats exprimés en humus %).

EXTRACTION ET DOSAGE DES MATIERES HUMIQUES DU SOL

1) Principe

La fraction humifiée de la matière organique du sol, ou matières humiques, composées essentiellement des acides humiques (précipitables en milieu acide, et solubles en milieu alcalin) et des acides fulviques (solubles en milieu acide), est extraite du sol par un sel alcalin : le pyrophosphate de sodium. Les différentes fractions sont oxydées ensuite par une solution sulfurique de bichromate de potassium et dosées volumétriquement.

2) Réactifs utilisés

- solution de pyrophosphate de sodium 0,1 M : dissoudre 44,6 g de $P_2 O_7 Na_4$, 10 $H_2 O$ et ajuster à 1 l. (pH de la solution aqueuse $\neq$ 10,0).
- $SO_4 H_2$ concentré, pur.
- $SO_4 H_2$ $\neq$ N/10 (environ 2,7 cc de $SO_4 H_2$ concentré /1).
- Na OH $\neq$ N/10 (environ 4 g de soude caustique /1).
- solution de $Cr_2 O_7 K_2$ à 2 % : dissoudre 20 g de $Cr_2 O_7 K_2$ dans 500 cc d'eau distillée, ajouter lentement 500 cc de $SO_4 H_2$ concentré, agiter, laisser refroidir, ajuster à 1 litre.
- solution de $Cr_2 O_7 K_2$ N/2 = peser très exactement 24,52 g de $Cr_2 O_7 K_2$ ("pour analyses"), les dissoudre petit à petit dans l'eau distillée, et ajuster à 1 litre. Cette solution exacte sert au titrage du sel de Mohr.
- solution de sel de Mohr 0,2 N = dissoudre environ 78,5 g de sel de Mohr ($SO_4 Fe, SO_4 (NH_4)_2, 6 H_2 O$) dans 500 cc d'eau, ajouter 20 cc de $SO_4 H_2$ concentré, amener à 1 litre.
- F Na en poudre ("pour analyses").
- solution sulfurique de diphénylamine : dissoudre 0,5 g de diphénylamine dans 100 cc de $SO_4 H_2$ concentré, verser sur 20 cc d'eau, agiter, conserver en flacon brun.

3) Extraction

10 g de sol passé au tamis de 0,500 mm (5 g si le sol est riche, ou 20 g si le sol est pauvre en matière organique) sont placés en contact avec 100 cc de pyrophosphate de Na M/10 en fiole bouchée. La suspension est agitée de façon intermittente pendant 9 heures, abandonnée 15 heures, agitée de nouveau et centrifugée (10 à 15 minutes, à 3 000 tours-minute ; à une vitesse supérieure, l'argile en se déposant, risque d'entraîner un peu d'humus) ; décantier la solution humique et filtrer.

4) Dosage des matières humiques

Prélever 10 cc du filtrat précédent, les mettre à évaporer dans un petit erlenmeyer de 100 cc, dans une étuve à 70° (température limite pour ne pas provoquer d'oxydations) ; quand le résidu est bien séché, procéder à l'oxydation dans les conditions suivantes : ajouter 10 cc de la solution de $Cr_2 O_7 K_2$ à 2 %, mettre un petit entonnoir sur l'erlenmeyer ; porter à l'ébullition sur une plaque chauffante (215 - 220°), maintenir l'ébullition 5 minutes. Laisser refroidir, et rincer l'entonnoir ; effectuer le titrage du $Cr_2 O_7 K_2$ non réduit, par le sel de Mohr 0,2 N ; titrer le sel de Mohr par la solution de $Cr_2 O_7 K_2$ exactement N/2. Faire un témoin dans les mêmes conditions, en faisant bouillir 10 cc de la solution de $Cr_2 O_7 K_2$ à 2 %.

soit v : volume de sel de Mohr utilisé pour le dosage du témoin

soit v' : volume de sel de Mohr utilisé pour le dosage de l'essai. On estime l'oxydation complète, donc 1 cc de sel de Mohr 0,2 N correspond à : 3 mg. de C x 0,2 = 0,6 mg. de C.

$$C \% \text{ (des matières humiques totales)} = \frac{(v - v') \times 0,6 \times 1000}{\text{prise d'essai (en poids de terre)}}$$

Pour que l'oxydation s'effectue dans les meilleures conditions, il est nécessaire qu'en-

viron la moitié du $\text{Cr}_2 \text{O}_7 \text{K}_2$ soit réduite, l'autre moitié restant sous forme oxydée ; faire les prises d'essai en conséquence, de façon que le rapport $\frac{\text{Cr}_2 \text{O}_7 \text{K}_2 \text{ réduit}}{\text{Cr}_2 \text{O}_7 \text{K}_2 \text{ oxydé}}$ soit compris entre 0,6 et 1,65 environ.

5) Séparation des acides humiques et des acides fulviques

40 cc de la solution humique (filtrat obtenu après l'extraction) sont additionnés de 4 cc de $\text{SO}_4 \text{H}_2$ concentré pur ; on laisse les flocons d'acides humiques se rassembler une nuit, et l'on centrifuge (5 minutes à 6 000 tours/minute).

Eliminer la solution surnageante (correspondant aux acides fulviques) et rincer le culot de centrifugation avec $\text{SO}_4 \text{H}_2 \text{N}/10$; effectuer une 2ème centrifugation. Eliminer la solution, et redissoudre les acides humiques par $\text{NaOH N}/10$; amener à volume connu, et prélever une partie aliquote. Opérer comme précédemment pour le dosage des matières humiques totales (évaporation à sec, oxydation...). Les acides fulviques seront obtenus par différence.

Les résultats seront exprimés en C % :

C % des matières humiques totales = C % des acides humiques + C % des acides fulviques.

Il est préférable d'exprimer l'humus sous cette forme, de façon à pouvoir établir le coefficient d'humification, qui est donné par le rapport :

$$\frac{\text{C \% des matières humiques totales}}{\text{C total \%}} \times 100$$

III — COMPARAISON AVEC LES AUTRES REACTIFS D'EXTRACTION

Il nous a paru intéressant de comparer quantitativement les matières humiques extraites par des réactifs couramment utilisés :

- le pyrophosphate de sodium 0,1 M, à pH = 7
- le fluorure de sodium à 1 %
- la soude à 1 %
- l'oxalate d'ammonium à 3 %.

Nous avons effectué ces comparaisons sur des sols très différents, pour essayer de généraliser, et si possible de chiffrer les relations entre les éléments extraits par le pyrophosphate de sodium à pH = 10, et chacun des autres réactifs d'extraction. L'étude a porté sur :

- des sols de pays tempéré (France) :
sol brun lessivé, rendzine, sols bruns calcaires, sol hydromorphe
- des sols de régions steppiques (Maroc) :
rendzine, sol châtain tirsifié, tirs (10-20 cm, et 110-120 cm)
- des sols de pays tropicaux :
ranker, tourbe (0-20 cm et 220 cm) et pseudo-podzol de nappe (0-10 cm et 130-140 cm) de Côte d'Ivoire ; sols ferrugineux tropicaux du Sénégal, terre de barre, sols noirs tropicaux (0-10 cm et 30-40 cm) du Togo ; sols ferrallitiques du Cameroun, et d'Oubangui-Chari, et enfin des sols hydromorphes du Soudan.

Les déterminations de matières humiques totales, acides humiques et acides fulviques, ont été effectuées dans les mêmes conditions que pour une extraction au pyrophosphate (24 heures de contact sol-solution ; sol/solution = 1/10 ; température = 20°) ; le coefficient d'humification $\frac{\text{C M H t} \times 100}{\text{C total}}$ et le rapport $\frac{\text{acides humiques}}{\text{acides fulviques}}$ ont été calculés (le carbone total a été dosé par la méthode ANNE).

Sur les 32 échantillons analysés (tableau III), 28 seulement ont été gardés pour établir les corrélations, nous avons éliminé les cas particuliers, à savoir : le ranker tropical, l'horizon 0-20 cm de la tourbe, et les 2 horizons du pseudo-podzol tropical. Le ranker, l'horizon de surface de la tourbe et l'horizon Ao du podzol sont essentiellement des horizons organiques,

TABLEAU III

MATIERES HUMIQUES TOTALES (MHt), ACIDES HUMIQUES (AH) ET ACIDES

Type de sol	Origine	Prof. en cm	Extraction au P ₂ O ₇ Na ₄ (pH = 10)					Extraction au P ₂ O ₇ Na ₄ (pH = 7)				
			C % MHt	humifi- cation %	C % A H	C % A F	$\frac{A}{A F} \frac{H}{F}$	C % MHt	humifi- cation %	C % A H	C % A F	$\frac{A}{A F} \frac{H}{F}$
Sol brun lessivé	France	0- 20	3,00	17,8	1,80	1,20	1,5	1,70	10,1	0,65	1,05	0,6
Rendzine	"	0- 30	4,15	15,1	1,85	2,30	0,8	2,95	10,7	0,75	2,20	0,35
Sol brun calcaire	"	0- 10	2,30	12,7	1,10	1,20	0,9	1,50	8,3	0,45	1,05	0,4
" " "	"	"	2,65	12,3	1,45	1,20	1,1	1,85	8,6	0,65	1,20	0,55
Sol hydromorphe	"	5- 15	13,55	30,3	10,25	3,30	3,1	9,40	21,0	5,65	3,75	1,5
Rendzine	Maroc		7,50	33,5	6,00	1,50	4,0	4,05	18,1	2,80	1,25	2,25
Sol châtain tirsifié	"		1,45	29,0	1,10	0,35	3,1	0,75	15,0	0,45	0,30	1,5
Tirs	"	10- 20	3,00	31,9	2,50	0,50	5,0	1,60	17,0	1,20	0,40	3,0
"	"	110-120	2,65	51,0	2,55	0,10	25,5	1,45	27,9	1,25	0,20	6,25
Ranker tropical *	Côte d'Ivoire		23,85	16,6	15,65	8,20	1,9	13,60	9,5	7,35	6,25	1,15
Tourbe tropicale *	"	0- 20	30,25	6,7	17,60	12,65	1,4	17,40	3,9	7,55	9,85	0,75
" " "	"	220	18,40	14,2	14,05	4,35	3,2	12,50	9,6	8,75	3,75	2,35
Podzol tropical *	"	0- 10	8,40	1,9	3,60	4,80	0,75	6,45	1,4	2,20	4,25	0,5
" " "	"	130-140	16,80	75,3	3,20	13,60	0,25	16,90	75,8	3,45	13,45	0,25
Sol ferrugineux tropical	Sénégal		1,15	24,4	0,80	0,35	2,3	0,80	17,0	0,45	0,35	1,3
" " "	"		1,25	26,6	0,90	0,35	2,6	0,85	18,1	0,50	0,35	1,4
" " "	"		1,80	26,4	1,20	0,60	2,0	1,15	16,9	0,65	0,50	1,3
Terre de barre	Togo		0,75	19,7	0,45	0,30	1,5	0,45	11,8	0,20	0,25	0,8
Sol noir tropical	"		4,05	26,5	3,60	0,45	8,0	1,80	11,7	1,05	0,75	1,4
" " "	"		2,85	23,2	2,35	0,50	4,7	1,70	13,8	1,20	0,50	2,4
" " "	"		2,20	26,2	1,60	0,60	2,65	1,10	13,1	0,55	0,55	1,0
" " "	"		2,25	27,8	1,60	0,65	2,45	1,30	16,0	0,55	0,75	0,75
Sol ferrallitique	Cameroun		3,35	26,8	0,45	2,90	0,15	2,55	20,4	0,20	2,35	0,1
" " humifère	"		17,45	27,9	12,00	5,45	2,2	12,05	19,2	5,70	6,35	0,9
" " "	Oubangui		1,30	19,7	0,80	0,50	1,6	0,85	12,9	0,35	0,50	0,7
" " "	"		1,65	17,0	0,70	0,95	0,75	1,15	11,8	0,40	0,75	0,5
" " "	"		2,05	20,1	1,30	0,75	1,75	1,20	11,7	0,55	0,65	0,85
" " "	"		2,25	19,9	1,35	0,90	1,5	1,40	12,4	0,55	0,85	0,65
" " "	"		2,30	24,5	1,15	1,15	1,0	1,55	16,5	0,55	1,00	0,55
" " "	"		2,25	21,4	1,00	1,25	0,8	1,50	14,3	0,45	1,05	0,4
Sol hydromorphe	Soudan		0,85	11,6	0,15	0,70	0,2	0,70	9,6	0,10	0,60	0,15
" " "	"		0,60	16,2	0,35	0,25	1,4	0,45	12,2	0,25	0,20	1,25

$$\text{humification \%} = \frac{\text{C \% MHt}}{\text{C total \%}} \times 100$$

* = échantillons aberrants, n'ayant pas été utilisés dans les calculs de corrélations (effectués sur 28 échantillons)

FULVIQUES (AF) DE 32 SÔLS D'ORIGINE DIVERSE

Extraction au F Na (à 1%)					Extraction à la soude à 1%					Extraction à l'oxalate d'am. à 3%			C total %
C % MHt	humifi- cation %	C % A H	C % A F	A H A F	C % MHt	humifi- cation %	C % A H	C % A F	A H A F	C % A H	humifi- cation %		
1,45	8,6	0,55	0,90	0,6	4,50	26,8	1,60	2,90	0,55	0,35	2,1	1,68	
2,70 x	9,8	0,75	1,95	0,4	8,00 x	29,1	3,50	4,50	0,75	0,35 x	1,3	2,75	
1,25 x	6,9	0,25	1,00	0,25	4,50 x	24,8	1,70	2,80	0,6	0,15 x	0,8	1,81	
1,45 x	6,7	0,35	1,10	0,3	5,15 x	23,9	2,25	2,90	0,75	0,15 x	0,7	2,15	
7,75	17,3	4,65	3,10	1,5	21,30	47,7	13,70	7,60	1,8	5,15	11,5	4,47	
3,60 x	16,0	2,45	1,15	2,1	8,60 x	38,4	6,00	2,60	2,3	1,00 x	4,4	2,24	
0,70 x	14,0	0,35	0,35	1,0	2,45 x	49,0	1,50	0,95	1,6	0,10 x	2,0	0,50	
1,65 x	17,5	1,20	0,45	2,65	4,50 x	47,9	3,05	1,45	2,1	0,20 x	2,1	0,94	
1,45 x	27,9	1,30	0,15	8,65	3,65 x	70,2	2,75	0,90	3,05	0,15 x	2,9	0,52	
20,20	14,1	13,50	6,70	2,0	45,55	31,7	24,30	21,25	1,15	6,30	4,4	14,35	
14,95	3,3	6,55	8,40	0,8	152,15	34,0	98,90	53,25	1,85	1,95	0,4	44,75	
11,20	8,6	8,15	3,05	2,65	31,60	24,4	20,95	10,65	1,95	5,00	3,8	12,95	
3,00	0,7	0,20	2,80	0,05	95,30	21,2	45,95	49,35	0,95	0,15	0	45,00	
13,55	60,7	2,25	11,30	0,2	16,50	74,0	3,45	13,05	0,25	4,05	18,2	2,23	
0,60	12,7	0,25	0,35	0,7	1,50	31,9	0,90	0,60	1,50	0,15	3,2	0,47	
0,65	13,8	0,30	0,35	0,85	1,65	35,1	1,05	0,60	1,75	0,15	3,2	0,47	
0,90	13,2	0,40	0,50	0,8	2,35	34,6	1,45	0,90	1,6	0,25	3,7	0,68	
0,40	10,5	0,15	0,25	0,6	1,00	26,3	0,55	0,45	1,2	0,10	2,6	0,38	
2,50 o	16,3	1,45	1,05	1,4	5,70 o	37,2	3,30	2,40	1,4	0,40	2,6	1,53	
1,90 o	15,4	0,75	1,15	0,7	4,70 o	38,2	2,60	2,10	1,25	0,30	2,4	1,23	
1,45 o	17,2	0,45	1,00	0,45	3,70 o	44,0	2,05	1,65	1,25	0,10	1,2	0,84	
1,55 o	19,1	0,50	1,05	0,45	3,80 o	46,9	2,15	1,65	1,3	0,05	0,6	0,81	
2,25	18,0	0,05	2,20	0,02	5,10	40,8	0,90	4,20	0,2	tr.	0	1,25	
7,20	11,5	2,90	4,30	0,65	32,05	51,2	18,70	13,35	1,4	0,60	0,9	6,26	
0,70	10,6	0,20	0,50	0,4	1,80	27,3	0,85	0,95	0,9	0,05	0,8	0,66	
0,95	9,8	0,20	0,75	0,25	2,80	28,9	0,90	1,90	0,45	0,05	0,5	0,97	
1,00	9,8	0,35	0,65	0,55	2,95	28,9	1,35	1,60	0,85	0,10	1,0	1,02	
1,15	10,1	0,30	0,85	0,35	3,40	30,1	1,55	1,85	0,8	0,05	0,4	1,13	
1,35	14,4	0,30	1,05	0,3	3,20	34,0	1,30	1,90	0,7	0,10	1,0	0,94	
1,10	10,5	0,25	0,85	0,3	3,00	28,6	1,10	1,90	0,6	0,05	0,5	1,05	
0,55	7,5	0,05	0,50	0,1	1,80 x	24,6	0,40	1,40	0,3	tr. x	0	0,73	
0,30	8,1	0,10	0,20	0,5	1,25 x	33,8	0,70	0,55	1,3	tr. x	0	0,37	

x = échantillons ayant subi une décalcification préalable, avant l'extraction de l'humus (par HCl à 20%)
o = échantillons ayant subi un prétraitement acide (par SO₄H₂ N/2), avant l'extraction de l'humus

qui lors de l'extraction à la soude, présentent, d'après ce que nous avons vu précédemment, de grandes anomalies ; l'horizon B du pseudo-podzol, est aussi un cas tout à fait particulier, du fait de son indifférence au pH auquel on effectue l'extraction.

A — COMPARAISON ENTRE LE PYROPHOSPHATE DE SODIUM (pH = 10) ET LE PYROPHOSPHATE DE SODIUM (pH = 7) fig. 4 - tableau IV

Le pyrophosphate de Na à pH = 7 est actuellement employé par de nombreux auteurs. La comparaison avec le pyrophosphate de sodium à pH = 10 nous amène aux conclusions précédemment indiquées lors de l'étude des courbes établies en fonction du pH.

Les coefficients r de corrélation sont très hautement significatifs, en particulier dans le cas des matières humiques totales, où il atteint 0,996, c'est dire que la proportionnalité extraite à pH = 10 et à pH = 7 est très étroite, et absolument indépendante du type de sol. Seule compte, dans ces différences, l'influence du pH. On peut donc dire que d'une façon générale on n'extrait que 60 % des matières humiques totales à pH = 7 par rapport à pH = 10, réparties de la manière suivante : environ 50 % pour les acides humiques et 100 % pour les acides fulviques. Comme nous l'avions déjà observé, le pH (à condition de se maintenir en-dessous de pH = 12) n'influence pas l'extraction des acides fulviques, mais a une très grande importance pour l'extraction des acides humiques. Naturellement, il s'ensuit que les coefficients d'humification ont baissé, quand on passe de pH = 10 à pH = 7, ainsi que les rapports $\frac{\text{acides humiques}}{\text{acides fulviques}}$, ces derniers presque de moitié, puisque les acides humiques ont diminué de 50 % et que les acides fulviques sont restés identiques. Ce fait est particulièrement important puisque ce rapport $\frac{\text{acides humiques}}{\text{acides fulviques}}$ semble bien caractériser les types d'humus. (ALEXANDROVA - 1960)

B — COMPARAISON ENTRE LE PYROPHOSPHATE DE SODIUM (pH = 10) ET LE FLUORURE DE SODIUM fig. 5 - tableau IV -

Le fluorure de sodium possède, à peu de choses près, le même pouvoir dissolvant de l'humus que le pyrophosphate pH = 7, à condition toutefois d'effectuer des décalcifications préalables sur les terres calcaires, ce qui a l'inconvénient d'éliminer une certaine partie des acides fulviques, et d'opérer un prétraitement acide $\text{SO}_4 \text{H}_2 \text{N}/2$ sur les sols noirs tropicaux, qui sans cela ne libèrent que la moitié de leur humus en solution dans le fluorure de sodium ; toutes ces opérations préliminaires compliquent l'extraction, et sont toujours une source d'erreurs.

Les extractions exprimées en % par rapport à celle effectuée au pyrophosphate pH = 10 se schématisent ainsi : 55 % pour les matières humiques totales, 40 % pour les acides humiques, et 80 % seulement pour les acides fulviques. Les coefficients de corrélation sont légèrement inférieurs à ceux obtenus pour l'extraction au pyrophosphate pH = 7 ; on obtient, en effet, respectivement : 0,977 pour les matières humiques totales, 0,937 pour les acides humiques, et 0,969 pour les acides fulviques, tous ces coefficients étant très hautement significatifs.

C — COMPARAISON ENTRE LE PYROPHOSPHATE DE SODIUM (pH = 10) ET LA SOUDE fig. 6 - tableau IV

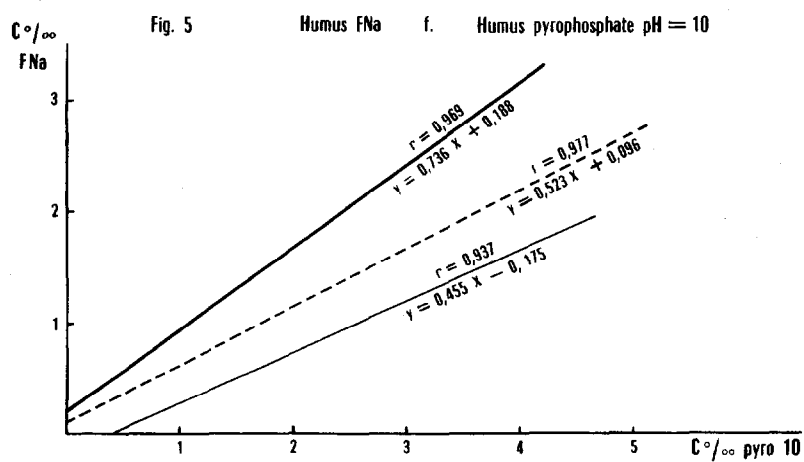
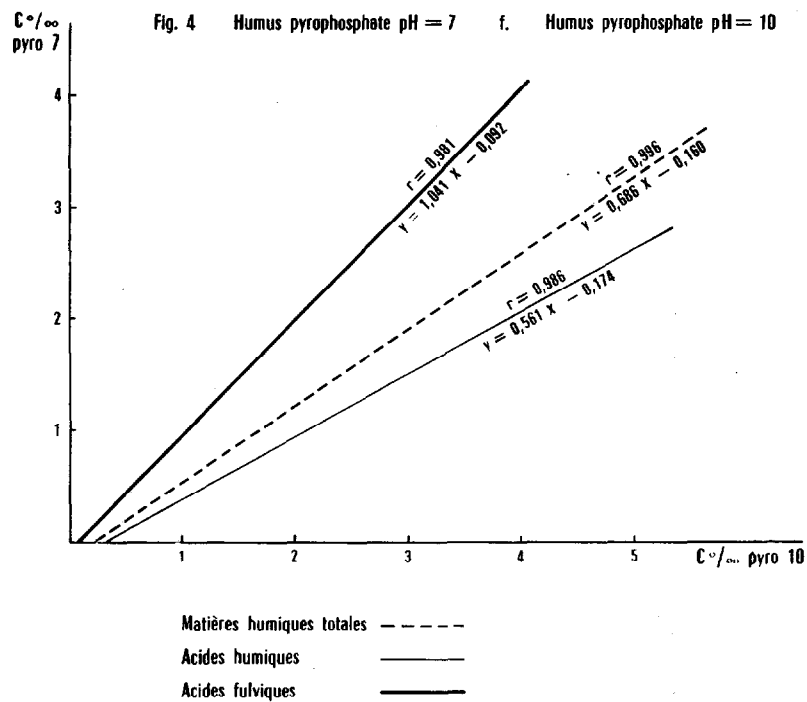
La soude en solution à 1 % est le réactif le plus énergique de l'humus, mais nous avons vu précédemment les inconvénients qu'elle présente. Comme pour FNa, il faut aussi faire subir quelques prétraitements aux sols (soit une décalcification par HCl, soit un prétraitement par $\text{SO}_4 \text{H}_2 \text{N}/2$).

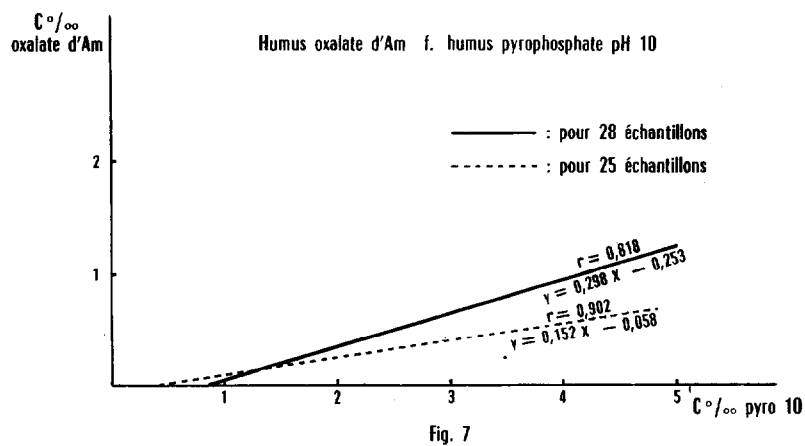
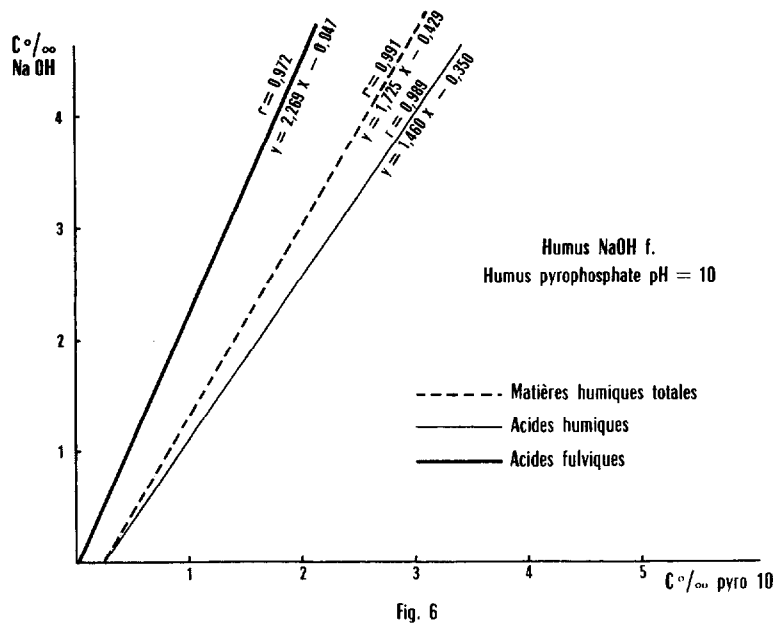
La quantité d'humus est augmentée par rapport à l'extraction au pyrophosphate de sodium pH = 10, dans les proportions suivantes : 150 % pour les matières humiques totales, 135 % pour les acides humiques, et 225 % pour les acides fulviques. Nous voyons donc que, si les acides humiques ne varient pas dans de grandes proportions, par contre les acides ful-

TABLEAU IV

CORRELATIONS ETABLIES ENTRE L'HUMUS EXTRAIT AU PYROPHOSPHATE DE Na à pH = 10 ET DIFFERENTS AUTRES REACTIFS D'EXTRACTION DE L'HUMUS (POUR 28 ECHANTILLONS = SOLS DIVERS)

Réactif d'extraction	Matières humiques totales	Acides humiques	Acides fulviques
Pyrophosphate de Na 0,1 M à pH = 7	$r = 0,996$ $y = 0,686 x - 0,160$	$r = 0,986$ $y = 0,561 x - 0,174$	$r = 0,981$ $y = 1,041 x - 0,092$
Fluorure de Na à 1 %	$r = 0,977$ $y = 0,523 x + 0,096$	$r = 0,937$ $y = 0,455 x - 0,175$	$r = 0,969$ $y = 0,736 x + 0,188$
Soude à 1 %	$r = 0,991$ $y = 1,725 x - 0,429$	$r = 0,989$ $y = 1,460 x - 0,350$	$r = 0,972$ $y = 2,269 x - 0,047$
Oxalate d'ammonium à 3 %	-	Pour 28 éch. = $r = 0,818$ $y = 0,298 x - 0,253$ Pour 25 éch. = $r = 0,902$ $y = 0,152 x - 0,058$	-





viques font plus que doubler; c'est bien ce que nous avaient montré les courbes précédentes.

Il s'ensuit une augmentation des coefficients d'humification, mais on a vu précédemment que cette quantité d'humus en excès correspond, pour une certaine part, à une altération de la matière organique non humifiée. Pour la même raison, le rapport $\frac{\text{acides humiques}}{\text{acides fulviques}}$ a diminué par rapport à ce qu'il était dans l'extraction du pyrophosphate de sodium à pH = 10.

D — COMPARAISON ENTRE LE PYROPHOSPHATE DE SODIUM (pH = 10) ET L'OXALATE D'AMMONIUM fig. 7 - tableau IV

Nous avons effectué l'extraction de l'humus à l'oxalate d'ammonium, car cette méthode fut longtemps employée dans nos laboratoires. Comme nous le voyons sur la fig. 7, ce réactif n'extrait qu'une faible partie des acides humiques du sol. Il a l'inconvénient de ne permettre que le dosage des acides humiques, l'oxalate qui reste en solution, empêchant le dosage des acides fulviques. Les coefficients de corrélation avec les acides humiques extraits au pyrophosphate de sodium à pH = 10 sont encore très hautement significatifs ($P > 0,001$). Si nous effectuons la corrélation sur 25 échantillons seulement, ayant éliminé les points aberrants tels que le sol hydromorphe de France, l'horizon inférieur de tourbe, et le sol ferrallitique sur basalte, nous obtenons des coefficients encore supérieurs.

Pour cette corrélation, r atteint 0,902, mais la proportion d'acides humiques extraits est très faible : l'oxalate d'ammonium ne "sort" que 13 % environ des acides humiques par rapport à la solution de pyrophosphate à pH = 10. Il semble que dans les sols tropicaux (sols ferrugineux tropicaux et sols ferrallitiques) une part importante des acides humiques se trouve sous une forme qui ne peut être extraite par le réactif ammoniacal. Les valeurs obtenues sont d'ailleurs insignifiantes, et ne peuvent permettre aucun classement des sols entre eux.

Précisons qu'ici, il s'agit moins d'une question de pH, puisque l'oxalate d'ammonium en solution donne un pH voisin de la neutralité, qu'une question de cation : Na formant des humates sodiques particulièrement solubles, semble préférable au cation Am.

E — CONCLUSION

Les fig. 8, 9 et 10 montrent la comparaison entre chacun des réactifs d'extraction utilisés, par rapport à l'extraction au pyrophosphate de sodium à pH = 10. Remarquons que, d'une façon générale, l'ordre croissant des différents extractants de l'humus est toujours le même, à savoir : l'oxalate d'ammonium, le fluorure de sodium, le pyrophosphate de sodium à pH = 7, le pyrophosphate de sodium à pH = 10, et la soude.

Pour les matières humiques totales (fig. 8), on voit nettement que le pyrophosphate de sodium à pH = 7 et le fluorure de sodium extraient, à peu de chose près, la même quantité d'humus, alors que la soude en extrait environ deux fois plus que ceux-ci, le pyrophosphate à pH = 10 se trouvant à la moyenne des deux.

Pour les acides humiques (fig. 9), l'oxalate d'ammonium en extrait très peu, F Na un peu plus, le pyrophosphate de sodium à pH = 7, très légèrement plus que F Na, le pyrophosphate à pH = 10 et la soude à peu près autant, mais la soude en extrait plus pour les valeurs plus élevées.

Pour les acides fulviques (fig. 10), F Na en extrait un peu moins que le pyrophosphate à pH = 7 et à pH = 10 ; pratiquement ceux-ci dissolvent exactement la même quantité d'acides fulviques, mais la soude en extrait 2 fois plus.

Il y aurait lieu de croire que chaque réactif extrait une partie plus ou moins importante d'un tout, dans des proportions variables, puisque tous les coefficients de corrélation entre les différents réactifs et le pyrophosphate de sodium à pH = 10, sont presque toujours supérieurs à 0,9. Cela ne veut pas dire pour autant que ces fractions plus ou moins importantes, suivant le réactif d'extraction utilisé, soient identiques chimiquement, et correspondent à des mêmes composés, car nous avons vu que la soude agit en détériorant les composés non humifiés, et en "fabriquant" des composés analogues aux composés humiques.

Remarquons que toutes les droites représentées sur les fig. 8, 9 et 10 ne partent pas

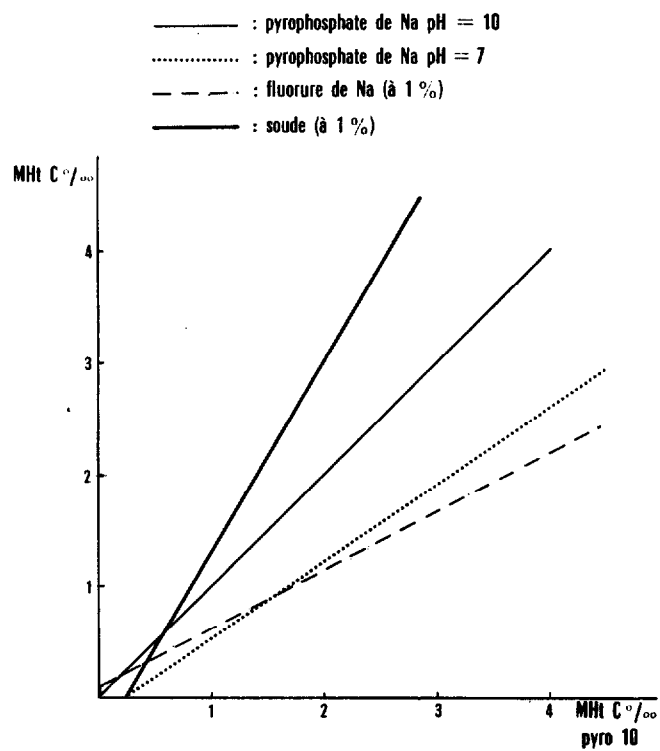
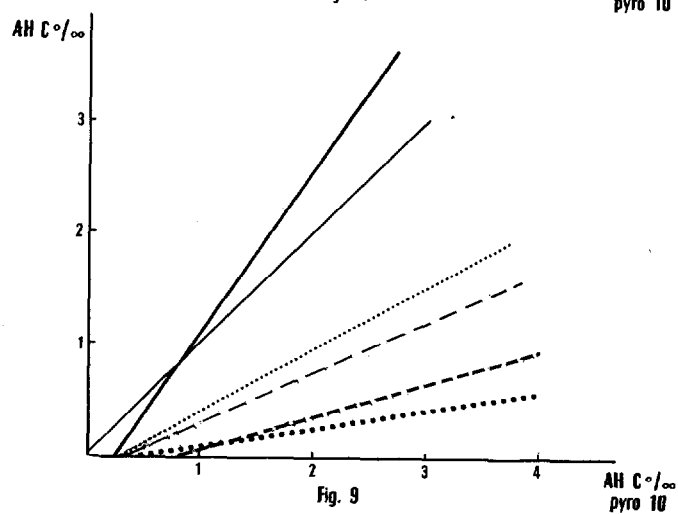
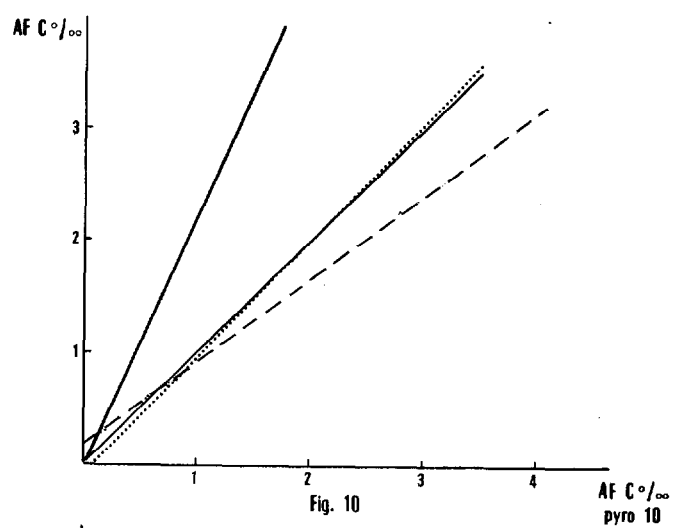


Fig. 8

- — — : fluorure de Na (à 1 %)
- : pyrophosphate de Na pH = 7
- : pyrophosphate de Na pH = 10
- : soude (à 1 %)
- - - - : oxalate d'Am (à 3 %) sur 28 échantillons
- : oxalate d'Am (à 3 %) sur 25 échantillons



exactement de l'origine, ceci est dû vraisemblablement aux erreurs d'expérience ; la précision semble meilleure cependant avec les acides fulviques qu'avec les acides humiques.

IV — APPLICATION A UN CAS PRECIS : LES SOLS FERRALLITIQUES DE BAMBARI (République Centrafricaine)

Nous avons voulu étudier les corrélations entre l'humus ainsi extrait, les propriétés physiques et les résultats agronomiques de sols ferrallitiques. Nous avons choisi les sols de la Station Expérimentale de Bambari, en République Centrafricaine, où des essais précis ont été faits sur un même type de sol, par M. QUANTIN. Les prélèvements, au nombre de 42, portant systématiquement sur 15 cm (horizon supérieur) comportent donc une certaine homogénéité ; ce sont des sols cultivés : la culture du coton y est étudiée en fonction de divers traitements (paillis, engrais, fumier). Nous étudierons successivement 2 propriétés physiques du sol, en fonction de l'humus, à savoir l'indice d'instabilité structurale et les pF (4,2 - 3,0 - 2,5), ainsi que la capacité d'échange et les rendements culturels. Ceci nous servira donc à interpréter les résultats d'analyses de l'humus, et à préciser son rôle dans le cas étudié. Nos corrélations et calculs statistiques ont d'ailleurs été revus par M. A. COMBEAU, Maître de recherches de l'O.R.S.T.O.M., que nous remercions très vivement ici, de sa très efficace collaboration.

Nous avons effectué les analyses d'humus de ces 42 échantillons, par l'extraction d'une part au pyrophosphate de Na à pH = 10, d'autre part à la soude à 1% pour comparer le rôle de chacune de ces fractions d'humus extraites. Comme toujours, le carbone total de ces sols a été aussi dosé (par la méthode ANNE), afin de connaître la teneur en matière organique totale, et de pouvoir calculer le coefficient d'humification.

A — COMPARAISON ENTRE L'HUMUS EXTRAIT AU PYROPHOSPHATE DE SODIUM A pH = 10 ET L'HUMUS EXTRAIT A LA SOUDE

résultats analytiques : tableau V
corrélations : tableau VI

La corrélation entre les 2 extractions est très bonne : r atteint 0,88 pour les matières humiques totales, 0,91 pour les acides humiques, mais seulement 0,51 pour les acides fulviques, tous ces coefficients étant très hautement significatifs ($P > 0,001$). Nous retrouvons les conclusions vues précédemment : la proportion d'acides humiques n'est pas augmentée très sensiblement quand on monte le pH jusqu'à 12, mais par contre, il y a une très nette variation sur les acides fulviques.

Comme cette augmentation d'acides fulviques extraits à la soude porte sur la matière organique non ou peu décomposée, étudions les corrélations possibles avec la matière organique totale :

nous remarquons tout d'abord que les matières humiques totales extraites au pyrophosphate à pH = 10 sont en moins bonne corrélation avec la matière organique totale que les matières humiques totales extraites à la soude (0,69 pour 0,88) ; si nous comparons les 2 extractions en faisant intervenir le carbone total, nous améliorons sensiblement les coefficients r, de plus le coefficient t2 dans le cas des acides fulviques extraits à la soude atteint 8,2, ce qui nous montre bien que ceux-ci sont étroitement liés à la teneur en matière organique totale. Si de plus, au lieu de C total, nous faisons intervenir la fraction non humifiée, représentée théoriquement par la valeur C total - matières humiques totales extraites au pyrophosphate à pH = 10, les "t" de Fisher se trouvent augmentés.

La soude extrait donc, par rapport au pyrophosphate de sodium à pH = 10, et en plus de celui-ci, une fraction humique exactement proportionnelle à la teneur en matière organique totale.

TABLEAU V
RESULTATS ANALYTIQUES — SOLS FERRALLITIQUES

Echantillons	C Total %	pH (eau)	Humus (pyrophosphate de Na à pH = 10)					Humus (soude à 1%)			
			MHt (C ‰)	humifi- cation %	A H (C ‰)	A F (C ‰)	$\frac{A H}{A F}$	MHt (C ‰)	humifi- cation %	A H (C ‰)	A F (C ‰)
BAM 304	1,42	5,9	2,97	20,9	1,73	1,24	1,4	4,58	32,3	1,92	2,66
305	1,53	5,65	3,11	20,3	1,85	1,26	1,45	5,06	33,1	2,17	2,89
306	1,41	5,45	3,09	21,9	1,90	1,19	1,6	4,57	32,4	1,93	2,64
307	1,14	5,3	2,74	24,0	1,56	1,18	1,3	3,96	34,7	1,57	2,39
308	1,09	5,0	2,68	24,6	1,40	1,28	1,1	3,90	35,8	1,37	2,53
309	1,08	5,35	2,50	23,1	1,24	1,26	1,0	3,86	35,7	1,26	2,60
310	1,06	5,25	2,32	21,9	1,07	1,25	0,85	3,76	35,5	1,12	2,64
311	1,13	5,75	2,23	19,7	1,13	1,10	1,0	3,84	34,0	1,35	2,49
312	1,00	5,2	2,43	24,3	1,26	1,17	1,1	3,51	35,1	1,22	2,29
313	1,17	5,3	2,78	23,8	1,69	1,09	1,55	4,05	34,6	1,67	2,38
314	1,34	5,55	2,93	21,9	1,91	1,02	1,9	4,52	33,7	2,05	2,47
315	1,17	5,25	2,69	23,0	1,69	1,00	1,7	4,06	34,7	1,71	2,35
316	1,09	5,1	2,77	25,4	1,73	1,04	1,7	4,01	36,8	1,84	2,17
317	1,13	5,55	2,44	21,6	1,58	0,86	1,85	3,83	33,9	1,67	2,16
318	1,12	5,4	2,40	21,4	1,46	0,94	1,55	3,91	34,9	1,57	2,34
319	0,85	5,1	2,14	25,2	1,16	0,98	1,2	3,24	38,1	1,13	2,11
320	0,88	4,9	2,29	26,0	1,17	1,12	1,05	3,10	35,2	0,90	2,20
321	0,96	5,3	2,35	24,5	1,19	1,16	1,0	3,34	34,8	1,22	2,12
322	1,06	5,6	2,37	22,4	1,36	1,01	1,35	3,53	33,3	1,43	2,10
323	1,22	6,1	2,48	20,3	1,45	1,03	1,4	3,75	30,7	1,60	2,15
324	1,00	5,3	2,47	24,7	1,32	1,15	1,15	3,53	35,3	1,33	2,20
325	0,91	5,0	2,40	26,4	1,24	1,16	1,05	3,58	39,3	1,41	2,17
326	1,00	5,3	2,39	23,9	1,16	1,23	0,95	3,76	37,6	1,41	2,35
327	0,90	5,4	2,30	25,6	1,07	1,23	0,85	3,36	37,3	1,13	2,23
328	0,78	4,75	2,19	28,1	0,99	1,20	0,85	2,89	37,1	1,02	1,87
329	0,88	4,8	2,26	25,7	1,06	1,20	0,9	3,13	35,6	1,08	2,05
330	1,05	5,6	2,42	23,0	1,25	1,17	1,05	3,65	34,8	1,47	2,18
331	1,07	5,8	2,24	20,9	1,14	1,10	1,05	3,62	33,8	1,47	2,15
334	0,94	5,1	2,22	23,6	1,13	1,09	1,05	3,35	35,6	1,28	2,07
335	1,22	6,0	2,32	19,0	1,32	1,00	1,3	3,70	30,3	1,72	1,98
336	0,91	5,5	1,96	21,5	0,99	0,97	1,0	2,95	32,4	1,00	1,95
337	0,98	5,7	2,11	21,5	1,06	1,05	1,0	3,19	32,6	1,24	1,95
338	0,95	5,4	2,22	23,4	1,12	1,10	1,0	3,33	35,1	1,16	2,17
339	1,17	5,85	2,36	20,2	1,39	0,97	1,45	3,76	32,1	1,52	2,24
340	1,18	6,0	2,33	19,7	1,35	0,98	1,4	3,58	30,3	1,46	2,12
341	1,09	5,7	2,24	20,6	1,22	1,02	1,2	3,52	32,3	1,37	2,15
342	1,24	5,75	2,44	19,7	1,34	1,10	1,2	3,98	32,1	1,59	2,39
343	1,21	5,5	2,36	19,5	1,18	1,18	1,0	3,87	32,0	1,31	2,56
344	1,20	5,7	2,36	19,7	1,13	1,23	0,9	3,70	30,8	1,19	2,51
345	1,27	6,05	2,25	17,7	1,21	1,04	1,15	3,67	28,9	1,35	2,32
346	1,16	5,7	2,25	19,4	1,23	1,02	1,2	3,50	30,2	1,35	2,15
347	1,34	6,0	2,37	17,7	1,41	0,96	1,45	3,84	28,7	1,61	2,23

MHt = Matières humiques totales — A H = acides humiques — A
C - MHt pyro = matière organique non humifiée — A + L = argile
Is = indice d'instabilité structurale — T = capacité d'échange —

DE BAMBARI (42 ECHANTILLONS)

$\frac{AH}{AF}$	C - MHt Pyro. %	A + L %	A %	I _s	pF 4,2	pF 3,0	pF 2,5	pF 2,5 - pF 4,2	T méq. %	S méq. %	Rende- ments kg/ha.
0,7	1,12	34,0	28,1	1,09	10,8	15,3	18,6	7,8	10,2	3,25	1 980
0,75	1,22	33,5	28,0	0,99	10,8	15,4	19,0	8,2	9,6	4,25	2 180
0,75	1,10	34,4	28,3	1,22	10,6	15,1	18,1	7,5	9,9	4,60	2 100
0,65	0,87	34,3	28,6	1,88	10,4	14,7	17,2	6,8	8,4	2,55	1 600
0,55	0,82	34,6	29,3	2,14	10,4	14,6	17,7	7,3	7,8	5,00	1 950
0,5	0,83	36,5	31,1	1,63	10,9	14,9	17,4	6,5	7,9	3,95	1 440
0,4	0,83	42,0	36,4	1,97	12,3	17,1	19,2	6,9	8,6	4,55	2 350
0,55	0,91	42,2	36,7	1,68	12,1	16,8	19,2	7,1	8,3	5,15	2 390
0,55	0,76	33,0	27,8	1,89	9,6	13,3	16,3	6,7	6,8	2,85	1 820
0,7	0,89	32,1	26,9	1,34	9,8	13,9	16,1	6,3	8,3	3,25	1 960
0,85	1,05	30,9	25,8	1,12	9,7	13,8	16,3	6,6	9,1	5,40	2 660
0,75	0,90	29,9	25,0	1,47	9,3	13,9	15,6	6,3	8,5	3,80	2 370
0,85	0,81	28,9	24,2	1,69	8,8	13,7	15,9	7,1	8,8	2,65	2 410
0,75	0,89	26,4	22,2	1,38	8,2	12,1	14,8	6,6	7,8	3,25	2 730
0,65	0,88	28,1	23,6	1,28	8,6	12,2	14,4	5,8	6,9	2,95	2 200
0,55	0,64	28,6	24,6	2,04	8,3	12,5	14,9	6,6	6,4	1,50	1 380
0,4	0,65	28,5	24,7	2,20	8,5	12,3	14,3	5,8	6,3	1,70	1 740
0,6	0,72	28,4	24,1	1,44	8,4	12,3	14,6	6,2	7,1	2,05	1 320
0,7	0,82	28,3	23,7	1,28	8,5	12,4	15,2	6,7	7,6	2,80	1 730
0,75	0,97	28,6	23,3	1,09	8,8	12,9	15,0	6,2	8,2	3,95	1 480
0,6	0,75	29,8	24,5	1,65	8,8	12,1	14,5	5,7	6,8	2,45	1 260
0,65	0,67	29,3	24,4	1,80	8,6	12,3	14,3	5,7	7,9	2,00	1 120
0,6	0,76	29,0	24,3	1,53	8,8	12,3	14,3	5,5	7,4	2,35	1 280
0,5	0,67	31,3	26,3	2,01	9,2	13,0	15,0	5,8	7,3	1,85	890
0,55	0,56	29,2	24,7	2,43	8,5	12,0	14,5	6,0	7,8	0,60	570
0,55	0,65	29,5	24,9	1,84	8,4	12,0	14,1	5,7	6,8	1,85	750
0,65	0,81	29,8	24,9	1,10	8,6	12,4	14,3	5,7	7,7	3,55	1 360
0,7	0,85	29,5	24,4	1,00	8,7	12,0	14,0	5,3	7,5	3,10	1 490
0,6	0,72	28,2	23,6	1,49	8,1	11,6	13,4	5,3	7,2	1,40	1 610
0,85	0,99	27,6	21,9	0,90	8,2	12,0	13,7	5,5	6,9	3,00	1 460
0,5	0,71	27,6	23,0	1,47	7,8	11,3	13,6	5,8	6,6	2,25	1 100
0,65	0,77	27,9	23,5	1,16	8,0	11,4	13,5	5,5	7,3	3,00	1 210
0,55	0,73	29,5	24,5	1,41	8,4	12,4	14,3	5,9	6,7	2,55	1 510
0,7	0,93	28,4	23,2	1,04	8,5	12,3	14,8	6,3	8,4	3,60	1 880
0,7	0,95	28,7	23,1	0,81	8,4	12,4	14,7	6,3	8,7	3,40	2 140
0,65	0,87	29,4	23,6	0,90	8,5	12,1	14,2	5,7	10,4	4,10	1 340
0,65	1,00	30,6	25,2	0,87	9,0	12,8	14,9	5,9	9,0	3,90	1 680
0,50	0,97	42,1	35,2	1,19	11,9	16,1	19,6	7,7	10,1	3,20	2 200
0,45	0,96	45,2	37,6	1,28	12,5	17,2	20,5	8,0	10,6	4,90	1 950
0,6	1,04	40,5	32,8	1,15	11,4	16,1	19,6	8,2	10,3	5,60	2 010
0,65	0,93	33,1	26,2	1,18	9,3	13,7	16,9	7,6	9,6	4,65	1 640
0,7	1,10	34,9	27,3	0,93	9,9	14,1	17,5	7,6	10,2	5,20	1 790

F = acides fulviques —

+ limon — A = argile —

S = Somme des bases échangeables —

TABLEAU VI

RELATIONS ENTRE L'HUMUS EXTRAIT AU PYROPHOSPHATE
DE Na (à pH = 10) ET L'HUMUS EXTRAIT A LA SOUDE

Relation	Equation de la régression	Coefficient de corrélation	
Pour les matières humiques totales	$y = 1,482 x + 0,104$	0,882	T H S
Pour les acides humiques	$y' = 1,047 x' + 0,041$	0,911	T H S
Pour les acides fulviques	$y'' = 1,066 x'' + 1,102$	0,509	T H S

RELATIONS ENTRE L'HUMUS EXTRAIT AU PYROPHOSPHATE
DE Na (à pH = 10) ET L'HUMUS EXTRAIT A LA SOUDE
EN FONCTION DU CARBONE TOTAL *

Relation	Equation de la régression	Coefficient de corrélation	
MHt pyro/C total	$y = 1,081 x + 1,242$	0,687	T H S
MHt NaOH/C total	$y = 2,322 x + 1,150$	0,878	T H S
MHt NaOH $\left\{ \begin{array}{l} \text{MHt pyro} \\ \text{C total} \end{array} \right.$	$y = 0,888 x_1 + 1,362 x_2 + 0,048$	$t_1 = 8,404$ $t_2 = 8,185$	THS R = THS 0,958
AH NaOH $\left\{ \begin{array}{l} \text{AH pyro} \\ \text{C total} \end{array} \right.$	$y' = 0,763 x'_1 + 0,587 x_2 - 0,228$	$t_1 = 8,256$ $t_2 = 4,184$	THS R = THS 0,940
AF NaOH $\left\{ \begin{array}{l} \text{AF pyro} \\ \text{C total} \end{array} \right.$	$y'' = 1,136 x''_1 + 0,923 x_2 + 0,007$	$t_1 = 6,478$ $t_2 = 8,173$	THS R = THS 0,853
MHt NaOH $\left\{ \begin{array}{l} \text{MHt pyro} \\ \text{Ct-MHt pyro} \end{array} \right.$	$y = 1,022 x_1 + 1,369 x_2 + 0,047$	$t_1 = 10,819$ $t_2 = 8,265$	THS R = THS 0,959
AH NaOH $\left\{ \begin{array}{l} \text{AH pyro} \\ \text{Ct-MHt pyro} \end{array} \right.$	$y' = 0,810 x'_1 + 0,606 x_2 - 0,166$	$t_1 = 9,864$ $t_2 = 4,372$	THS R = THS 0,942
AF NaOH $\left\{ \begin{array}{l} \text{AF pyro} \\ \text{Ct-MHt pyro} \end{array} \right.$	$y'' = 1,218 x''_1 + 1,012 x_2 + 0,065$	$t_1 = 6,700$ $t_2 = 7,770$	THS R = THS 0,842

* t_1 et t_2 représentent les valeurs de t de la table de Fisher pour les coefficients

b_1 et b_2 affectant les valeurs x_1 et x_2 dans l'équation : $y = b_1 x_1 + b_2 x_2 + c$

THS = très hautement significatif $P > 0,001$

HS = hautement significatif $P > 0,01$

S = significatif $P > 0,05$

plausible = $P > 0,1$

NS = non significatif

B — RELATIONS ENTRE L'HUMUS ET QUELQUES CARACTERISTIQUES ANALYTIQUES

1) Relations avec la stabilité structurale

- Comme cela avait été montré dans un article concernant ces mêmes sols (COMBEAU - 1960), mais portant sur le prélèvement annuel antérieur, nous retrouvons une relation étroite entre l'indice d'instabilité structurale (défini par S. HENIN) et la teneur en matière organique de l'échantillon.

En tenant compte de la granulométrie (éléments fins de 0 à 20 μ), cette relation est exprimée sous la forme :

$$I_s = 0,030 (A + L\%) - 1,99 (C\%) + 2,66$$

I_s = indice d'instabilité structurale

$A + L$ = argile + limon (déterminés par l'analyse granulométrique)

C = carbone total (déterminé par la méthode ANNE)

avec $t_1 = 2,96 - HS -$ (se rapportant à $A + L$)

$t_2 = 6,96 - THS -$ (se rapportant à C)

- Au lieu de faire intervenir le carbone total, établissons la même corrélation avec la matière organique non humifiée ($C - MHt$ pyro), nous aurons :

$$I_s = 0,033 (A + L\%) - 2,41 ((C - MHt)\%) + 2,44$$

$C - MHt$ = carbone total - matières humiques totales extraites au pyrophosphate de sodium à pH = 10

avec $t_1 = 3,66 - THS$ (se rapportant à $A + L$)

$t_2 = 8,49 - THS$ (se rapportant à $C - MHt$)

donc, la stabilité structurale s'améliore lorsque la quantité de matière organique non humifiée augmente.

- Etudions le rôle de chacun des constituants de la matière organique : la fraction humifiée et la fraction non humifiée :

$$I_s = 0,041 (A + L\%) - 3,61 ((C - MHt)\%) + 10,2 (MHt\%) + 0,78$$

avec $t_1 = 7,98 - THS$ (se rapportant à $A + L$)

$t_2 = 17,86 - THS$ (se rapportant à $C - MHt$)

$t_3 = 9,44 - THS$ (se rapportant à MHt)

ceci nous montre que la fraction humique, telle que nous la mesurons, aurait un rôle néfaste sur la stabilité structurale, dans ce cas précis. Par contre, on peut supposer que les corps organiques non stables (corps préhumiques), ou très polymérisés (polyuronides), non extraits par le réactif utilisé, auraient un rôle important sur la structure, et que peut-être certains acides humiques, très fortement liés aux argiles, et libérables seulement après une hydrolyse acide, auraient aussi une action efficace sur la stabilité structurale.

- La même relation, avec l'humus extrait à la soude, nous donne :

$$I_s = 0,032 (A + L\%) - 3,91 ((C - MHt \text{ soude})\%) + 3,3 (MHt \text{ soude}\%)$$

MHt = soude = matières humiques totales extraites à la soude

avec $t_1 = 4,25 - THS$ (se rapportant à $A + L$)

$t_2 = 9,40 - THS$ (se rapportant à $C - MHt$ soude)

$t_3 = 2,74 - HS$ (se rapportant à MHt soude)

les coefficients t sont donc très nettement inférieurs à ceux pour lesquels la corrélation a été calculée avec les matières humiques totales extraites au pyrophosphate de sodium à pH = 10.

2) Relations avec les pF

- Nous comparerons l'influence de la matière organique sur les différents pF : pF 4,2 ; pF 3,0 ; pF 2,5 ; pF 2,5 - pF 4,2.

le pF 4,2 est défini par la teneur en eau correspondant à un potentiel capillaire de 16 kg/cm² ; c'est la limite inférieure de la teneur en eau utilisable, ou point de flétrissement permanent.

le pF 3,0 est défini par la teneur en eau correspondant à un potentiel capillaire de 1 kg/cm² ; beaucoup d'auteurs estiment qu'il correspond à la capacité de rétention maximum.

le pF 2,5 est défini par la teneur en eau correspondant à un potentiel capillaire de 320 g/cm²; il peut représenter une valeur acceptable de la capacité au champ.

la différence pF 2,5 - pF 4,2 peut être considérée comme l'eau disponible pour les plantes, ou eau utile.

— Il est bien connu que la teneur en eau du sol est liée très étroitement à la granulométrie de l'échantillon (éléments fins de 0-20 μ), pour n'importe quelle valeur du pF; celle-ci rentrera donc dans toutes les corrélations, comme le montre le tableau suivant :

pF	Equation de la régression	r	
4,2	0,27 (A + L%) + 0,88	0,97	THS
3,0	0,33 (A + L%) + 2,96	0,94	THS
2,5	0,40 (A + L%) + 3,30	0,92	THS
2,5 - 4,2	0,13 (A + L%) + 2,42	0,71	THS

On constate donc que les éléments fins interviennent d'autant plus dans la teneur en eau que celle-ci est plus faible, la relation est plus étroite pour le pF 4,2 que pour le pF 2,5.

En tenant compte de l'influence des éléments fins, essayons de préciser l'action de la matière organique sur les différents pF.

Avec la matière organique totale, les relations sont les suivantes :

pF	Equation de la régression	t ₁ (A + L)		t ₂ (C)		R
4,2	0,25 (A + L%) + 1,34 (C%) - 0,04	25,23	THS	4,81	THS	0,98
3,0	0,30 (A + L%) + 2,31 (C%) + 1,38	17,84	THS	4,90	THS	0,96
2,5	0,35 (A + L%) + 3,58 (C%) + 0,85	16,60	THS	6,08	THS	0,96
2,5 - 4,2	0,10 (A + L%) + 2,24 (C%) + 0,89	5,52	THS	4,49	THS	0,82

Dans tous les cas, nous remarquons que la matière organique totale intervient efficacement sur la teneur en eau, d'autant plus que celle-ci est plus élevée.

La matière organique totale pouvant être fractionnée en 2 parties, d'une part l'humus, d'autre part la fraction non humifiée, nous obtiendrons les coefficients suivants, mettant ainsi en évidence le rôle de l'humus, principalement aux pF 4,2 et 3,0 :

pF	Equation de la régression	t ₁ (A + L)		t ₂ (MHt)		R
4,2	0,26 (A + L%) + 1,15 (MHt %) - 1,65	46,39	THS	11,53	THS	0,99
3,0	0,32 (A + L%) + 1,81 (MHt %) - 1,02	27,17	THS	8,72	THS	0,98
2,5	0,38 (A + L%) + 2,33 (MHt %) - 1,82	21,27	THS	7,34	THS	0,97
2,5 - 4,2	0,12 (A + L%) + 1,18 (MHt %) - 0,17	6,75	THS	3,76	THS	0,80

pF	t ₁ (A + L)		t ₂ (C - MHt)		t ₃ (MHt)		R
4,2	42,46	THS	0,57	NS	9,22	THS	0,99
3,0	24,68	THS	0,81	NS	6,55	THS	0,98
2,5	19,86	THS	2,34	S	4,89	THS	0,97
2,5 - 4,2	5,69	THS	2,35	S	1,83	P	0,83

Nous constatons en effet que les corrélations sont toutes très hautement significatives entre les différents pF, la granulométrie, et l'humus; les coefficients de corrélation (t₁ et t₂) étant très élevés, les relations sont d'autant plus étroites.

Il en est de même pour l'eau utilisable (pF 2,5 - pF 4,2); celle-ci est aussi en relation étroite avec la teneur en éléments fins et avec l'humus.

Si nous faisons intervenir la fraction non humifiée de la matière organique, représentée par la différence C total - humus, nous observons alors que cette fraction ne joue aucun

rôle pour les pF 4,2 et 3,0, mais elle devient significative dans le cas du pF 2,5 et de la différence pF 2,5 - pF 4,2. Donc, la teneur en eau aux fortes pressions dépend essentiellement du taux d'éléments fins et du taux d'humus ; pour les plus faibles valeurs du pH, la teneur en matière organique totale interviendra plus efficacement.

D'ailleurs, en comparant les "t" de Fisher, nous constatons que, dans le cas du pF 4,2, le t_2 est passé de 4,8 pour le carbone total à 11,5 pour l'humus ; de même dans le cas du pF 3,0, t_2 est passé de 4,9 à 8,7, alors que dans le cas du pF 2,5, il n'a presque pas augmenté (de 6,1 à 7,3).

Puisque l'humus est l'un des principaux facteurs de ces teneurs en eau du sol, précisons quelle fraction a le plus grand rôle, en dissociant l'humus en acides humiques et acides fulviques.

pF	t_1 (A + L)		t_2 (AH)		t_3 (AF)		R
4,2	41,72	THS	11,17	THS	4,42	THS	0,99
3,0	27,22	THS	9,68	THS	1,01	NS	0,98
2,5	22,28	THS	8,56	THS	0,15	NS	0,97
2,5 - 4,2	8,09	THS	4,83	THS	1,39	NS	0,84

— On peut remarquer que dans le cas du pF 4,2, les acides humiques et les acides fulviques ont une action positive, avec une prédominance pour les acides humiques, alors que dans les 3 autres cas (pF 3,0 ; pF 2,5 ; pF 4,2), seuls les acides humiques donnent des coefficients très hautement significatifs, les acides fulviques n'intervenant pas.

On peut donc établir les équations suivantes, nous donnant les relations des pF en fonction de la teneur en éléments fins et du taux d'acides humiques, pour lesquelles nous obtenons les coefficients les plus élevés, par rapport aux différents facteurs étudiés, excepté dans le cas du pF 4,2, puisqu'il faut aussi faire intervenir les acides fulviques.

pF	Equation de la régression	t_1 (A + L)	t_2 (AH)	R
4,2	$0,27 (A + L\%) + 1,10 (AH\%) - 0,69$	40,08 THS	8,75 THS	0,99
3,0	$0,34 (A + L\%) + 1,92 (AH\%) + 0,21$	31,05 THS	9,62 THS	0,98
2,5	$0,40 (A + L\%) + 2,56 (AH\%) - 0,36$	25,40 THS	8,71 THS	0,97
2,5 - 4,2	$0,13 (A + L\%) + 1,46 (AH\%) + 0,33$	8,27 THS	4,95 THS	0,83

Ainsi, nous avons pu mettre en relation l'influence de la matière organique sur quelques teneurs remarquables en eau du sol, compte tenu de la teneur en éléments fins. Il semble donc que, dans le cas des pF élevés, ce soit plus la fraction humifiée de la matière organique qui agisse, alors qu'aux faibles pF, la matière organique dans son ensemble intervient ; mais de toute façon, le rôle des acides humiques est très net, ce sont eux qui agissent en grande partie sur l'eau retenue.

3) Relations avec la capacité d'échange

— Pour cette série d'échantillons, on retrouve la même relation que pour ceux prélevés l'année précédente (10) : la capacité d'échange est essentiellement fonction de 2 facteurs, la teneur en matière organique, et le taux d'éléments fins.

$$T_{Ca} = 4,57 (C\%) + 0,10 (A + L\%) + 0,03$$

avec $t_1 = 6,17$ - THS (se rapportant à C)

$$t_2 = 3,72$$
 - THS (se rapportant à A + L)

On peut estimer approximativement que, d'après la relation, la matière organique intervient pour 60 % dans la capacité d'échange, et la teneur en éléments fins pour 40 % environ.

— Si l'on tente de dissocier la matière organique en ses composants, humus et matière organique non humifiée, on constate que pour l'humus, le "t" de Fisher n'est pas significatif, alors qu'il est très hautement significatif ($P > 0,001$) pour la matière organique non humifiée, et hautement significatif ($P > 0,005$) pour la granulométrie.

Donc, contrairement à ce que l'on pouvait prévoir, la capacité d'échange n'apparaît pas comme une fonction directe de la teneur en humus du sol, mais dépend très étroitement de la teneur en matière organique totale. Dans ce cas, comme dans le cas de la stabilité structurale, on peut attribuer ces propriétés du sol à une certaine fraction de la matière organique, qui ne serait pas comprise dans la fraction humus extraite au pyrophosphate, cette fraction, qui comprendrait un certain nombre de produits de décomposition de la matière organique fraîche, serait beaucoup plus active que l'humus proprement dit, peut-être déjà trop "stable".

— Parallèlement à la capacité d'échange, la somme des bases échangeables est en meilleure corrélation avec le carbone total ($P > 0,001$) qu'avec la fraction humus ($P > 0,05$).

C - RELATIONS ENTRE L'HUMUS ET LES RENDEMENTS DE LA CULTURE

- Les résultats de l'année passée (COMBEAU - OLLAT - QUANTIN, 1961) avaient montré que le rendement augmente en même temps que la teneur du sol en carbone ; pour les résultats de cette année, il semble bien que la relation soit linéaire, et qu'il n'y ait pas de taux limite de carbone comme cela avait pu être observé l'année dernière ; la relation est la suivante :
rendements = $1.936 (C\%) - 419$ ($P > 0,001$)

— L'influence de l'humus sur les rendements n'apparaît pas dans la corrélation simple, il semble, au contraire, que ce soit la matière organique non humifiée qui intervienne.

Cependant, si l'on prend en considération l'action d'un autre facteur, tel que la somme des bases échangeables, le rôle de l'humus est alors mis en évidence, et la relation devient :
rendements = $634 (MHt\%) + 206 (S. \text{ bases éch.}) - 505$, avec $P > 0,025$ pour l'humus, et $P > 0,001$ pour S ; dans le cas de la matière organique totale, nous avons : $P > 0,025$ pour C total, et $P > 0,2$ pour S, alors que la relation simple S - C est plus étroite ($P > 0,001$) que la relation S - MHt ($P > 0,05$).

On peut donc supposer que la matière organique totale "éclipse" certains facteurs, qui ne prennent toute leur importance qu'en liaison avec une certaine partie de cette matière organique. Ces divers résultats sont récapitulés dans le tableau suivant :

Relation	Equation	r ou R		t ₁		t ₂	
Rts f C total	$1936 (C\%) - 419$	0,64	THS	-	-	-	-
Rts f $\begin{cases} C - MHt \\ MHt \end{cases}$	-	0,65		3,38	HS	-	-
Rts f $\begin{cases} C \text{ total} \\ S \text{ b. éch.} \end{cases}$	-	0,67		2,34	S	-	-
Rts f $\begin{cases} MHt \\ S \text{ b. éch.} \end{cases}$	$634 (MHt\%) + 206 (S) - 505$	0,68		2,65	S	-	-
S f C total	$5,44 (C\%) - 2,71$	0,75	THS	-	-	-	-
S f MHt	$1,57 (MHt) - 0,54$	0,34	S	-	-	-	-

- Il ne nous a pas été possible de vérifier la relation : rendement-indice d'instabilité structurale, qui avait donné une bonne corrélation l'an passé ; même en faisant intervenir la matière organique, sous l'une quelconque de ses formes, cette relation ne s'améliore pas (P , au maximum $> 0,1$).

Comme on peut observer, pour une bonne partie des échantillons, une certaine dégradation de la structure par rapport à l'année dernière, peut-être celle-ci, pour des valeurs aussi peu différenciées, ne joue-t-elle plus sur les rendements.

De toute façon, les rendements ne dépendent pas seulement de facteurs physico-chimiques du sol, mais aussi de conditions extérieures, le climat en particulier, qui peuvent être prédominantes par rapport aux premiers.

D — CONCLUSION

Cette étude statistique sur quelques propriétés de 42 échantillons de sols ferrallitiques soumis à la culture, nous a montré que dans la plupart des cas, c'est la matière organique totale qui est le facteur prédominant.

La fraction humifiée, telle que nous la mesurons, paraît avoir un rôle "positif" sur la rétention d'eau, et sur les rendements ; pour ceux-ci, en liaison avec la somme des bases échangeables. Son rôle apparaît comme "négatif" dans la stabilité structurale, ainsi que pour la capacité d'échange, alors qu'au contraire, la matière organique non humifiée paraît avoir une influence primordiale.

V — CONCLUSION

Nous avons voulu préciser une méthode d'extraction de l'humus, qui soit adaptable, sans trop de difficultés techniques, aux sols tropicaux.

Nous reconnaissons que le fait de travailler à pH = 10 peut être critiquable, mais la quantité de corps de propriétés comparables à celles des acides humiques formés sous l'action d'un réactif à pH élevé, est d'après les courbes que nous avons obtenues, très faible. La valeur choisie du pH représente un palier dans ces courbes, et permet une dispersion maximum des composés argilo-humiques. Nous pensons donc que la méthode proposée permet de chiffrer avec assez d'approximation, l'état humique d'un sol.

D'après les études poursuivies parallèlement à celle des sols de Bambari, il nous sera possible de généraliser d'abord sur les sols ferrallitiques, puis sur d'autres types de sols, un certain nombre de conclusions mettant en évidence le rôle de la matière organique totale, et plus spécialement de l'humus, sur le plus grand nombre possible de caractéristiques du sol. Nous avons pu préciser, dans un cas particulier, quelques corrélations entre la matière organique totale, ou bien l'humus, et la stabilité structurale, les teneurs en eau (pF 4,2 3,0 et 2,5), la capacité d'échange et les rendements de la culture.

Cette extraction et ce dosage de l'humus ne nous donnent qu'une idée quantitative de la matière humique et ses principaux composants : les acides humiques et les acides fulviques. Il serait souhaitable de mieux la connaître aussi qualitativement ; mais si la technique décrite ici est particulièrement simple, par contre, le fractionnement tel que le préconise TIURIN en un certain nombre d'acides humiques et d'acides fulviques, est beaucoup plus long ; il serait difficilement réalisable pour des études statistiques telles que nous les poursuivons.

BIBLIOGRAPHIE

- ALEXANDROVA L.N. — 1960 — Sur l'emploi du pyrophosphate de Na pour isoler du sol les substances humiques libres et leurs composés organo-minéraux.
Pédologie (Moscou) - N° 2.
- BREMNER J.M. et LEES H. — 1949 — Etude sur la matière organique du sol - 2ème partie : l'extraction de la matière organique du sol par des réactifs neutres.
J. of Agri. Sc. - N° 39.
- CHAMINADE R. — 1946 — Sur une méthode de dosage de l'humus des sols. Ann. Agro. 2. 119-132.
- COMBEAU A. — 1960 — Observations sur certains facteurs de la rétention d'eau par le sol pour diverses valeurs remarquables du pF. Application à quelques types de sols tropicaux.
O.R.S.T.O.M. - Paris.
- COMBEAU A., OLLAT C. et QUANTIN P. — 1961 — Observations sur certaines caractéristiques des sols ferrallitiques. Relations entre les rendements et les résultats d'analyses des sols - Fertilité N° 13.
- DUCHAUFOR Ph. — 1960 — Précis de Pédologie - Masson éditeur - Paris.
- EVANS L.T. — 1959 — Sur l'emploi des réactifs chélatants et des solutions alcalines, dans l'extraction de la matière organique du sol.
Journal of Soil Science - Vol. 10 - N° 1.
- KONONOVA M.M. — 1958 — Les substances humiques du sol.
Veb Deutscher Verlag Der Wissenschaften - Berlin.
- POCHON J. et BARJAC H. de — 1958 — Traité de Microbiologie des Sols.
Dunod éditeur - Paris.
- SPRINGER U. et KLEE J. — 1958 — Sur la caractérisation et la différence entre les composés humiques de forêts, par extraction à la soude et au pyrophosphate de Na, et sur leur fractionnement.
Zeitsch. Pflanz. Düng Bodenkunde. Vol. 80 - N° 2.
- TINSLEY J. et SALAM A. — 1961 — Extraction de la matière organique du sol par des solvants aqueux.
Soils and Fertilizers - Vol. 24 - N° 2.