

Le phosphore dans les vertisols de la Martinique (Petites Antilles) Relations avec la matière organique

Michel BROSSARD (1) et Jean-Yves LAURENT (2)

(1) Orstom clo CPB-CNRS - BP 5, 54501 Vandœuvre-lès-Nancy cedex.

(2) Laboratoire matière organique des sols tropicaux, Orstom, BP 8006, 97259 Fort-de-France cedex.

RÉSUMÉ

Suite à un inventaire agropédologique des vertisols du sud-est de la Martinique, neuf situations caractérisées par des histoires culturales très différenciées ont été sélectionnées. Les phosphores total (P_t), inorganique (P_i) et organique (P_o) ont été déterminés sur sols totaux et sur les fractions granulométriques de deux sols, l'un portant une prairie (Pr9) et l'autre un maraîchage (M11). Les cultures maraîchères (M) sont comparées aux jachères longues (J) et prairies (Pr). Ces sols se caractérisent par de fortes différences de teneurs de matière organique. Les teneurs de P_t dans les sols M et J sont comparables, mais sont inférieures à celles observées sous Pr. Jachères et prairies induisent l'accumulation de P_o . Les teneurs élevées de matière organique dans les sols sous jachère et prairies sont dues à l'abondance de débris végétaux (fractions $> 50 \mu\text{m}$) et à la fraction organo-minérale 0-5 μm . La comparaison des horizons 0-10 cm des sols Pr9 et M11 fait apparaître un contenu élevé de P_o sous prairie dans la fraction 0-5 μm et de P_i dans les fractions $> 50 \mu\text{m}$. Le contenu de P_o de la fraction 0-5 μm explique 51 % de la différence de P_i entre Pr9 et M11. Les mécanismes impliqués dans le stockage du phosphore de ces vertisols sont discutés.

MOTS CLÉS : Phosphore total – Phosphore inorganique – Phosphore organique – Carbone – Fractionnement granulométrique – Pâturage – Maraîchage.

ABSTRACT

PHOSPHORUS IN VERTISOLS OF MARTINIQUE (WEST INDIES). RELATIONS WITH ORGANIC MATTER

In an agropedological inventory nine sites were chosen as representative of different farming practices on vertisols. Total (P_t), inorganic (P_i) and organic (P_o) phosphorus were quantified in whole soils, and in particle size fractions of two situations, pasture (Pr9) and market gardening (M11). Systems with short fallows (M) are compared to long term fallows (J) and to pastures (Pr) (table II). The amounts of total phosphorus (P_t) are equivalent in M and J sites, and lower than in Pr sites (table II, fig.1). Fallows and pastures improve the P_o accumulation (fig. 3). In comparison with soils under market gardening the high levels of organic matter in soils observed after fallows or pastures are mostly due to an increase of plant residues (fractions $> 50 \mu\text{m}$), and to the organo-mineral fraction (fraction $< 5 \mu\text{m}$) (table III and IV). The comparison between the 0-10 cm layer of the M11 and Pr9 sites showed a high level of P_o in 0-5 μm fraction under pasture and an accumulation of P_i in the $> 50 \mu\text{m}$ fractions. The P_o content in the 0-5 μm fraction explains 51 % of the P_i difference between M11 and Pr9. These results are discussed in terms of soil-P processes.

KEY WORDS: Total phosphorus – Inorganic phosphorus – Organic phosphorus – Carbon – Particle size fractionation – Pasture – Market gardening.

INTRODUCTION

Depuis une vingtaine d'années dans le sud-est de la Martinique, suite à l'abandon de la monoculture de la canne à sucre, des cultures prairiales et maraîchères se sont largement développées sur vertisols grâce à l'installation d'un vaste réseau d'irrigation. Or, selon le mode de gestion des vertisols, prairies ou cultures maraîchères, et le niveau d'intensification, on observe, en 5 à 10 ans, une forte différenciation des teneurs de matière organique des horizons de surface : teneurs voisines de 2 % sous cultures maraîchères et de 5 % sous prairies (ALBRECHT *et al.*, 1992 a).

Le mode d'utilisation du sol, et en particulier le type de couverture végétale, influence son contenu de phosphore organique sous climats tempérés (HARRISON, 1987). La mise en culture de sols tropicaux modifie leur contenu de phosphore organique (ENWEZOR et MOORE, 1966). Cependant, les travaux ayant pour thème l'étude des formes du phosphore en relation avec la matière organique (quantité et nature) dans les vertisols sont peu nombreux (HARRISON, 1987).

Il apparaît donc intéressant de comparer les effets du type de situations culturales sur la distribution du phosphore entre formes organiques et inorganiques, et ce, en relation avec les modifications des stocks organiques.

L'étude porte sur l'analyse des teneurs de phosphore total, inorganique et organique dans diverses situations agropédologiques. Une approche par fractionnement granulométrique du sol permet ensuite de préciser les relations matière organique-phosphore.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Les sols et les situations étudiés

Les caractéristiques analytiques moyennes des sols sont présentées dans le tableau I. Les situations agropédologiques (tabl. II) ont été inventoriées par TYBURN (1986). Il s'agit de vertisols lithomorphes (vertisols à drainage externe, à structure anguleuse, modaux ; CPCS, 1967). L'épaisseur des sols est variable, de 40 à plus de 80 cm.

Dans le sud-est de la Martinique la durée de la saison sèche est de 4 à 6 mois en moyenne, avec cependant de très fortes variations inter-annuelles. L'irrigation est essentielle pour assurer une production végétale régulière. Les situations suivantes sont étudiées (tabl. II) : prairies à *Digitaria decum-*

bens (Pr), jachères pâturées (JP) (avec parfois introduction ancienne de *Digitaria decumbens*) et jachères arborées (Ja), cultures maraîchères (M). Les situations prairiales et maraîchères peuvent être plus ou moins intensifiées. Sont considérées comme intensifiées : 1. les prairies plantées ou semées, disposant de l'irrigation toute l'année, et d'une fertilisation fractionnée ; 2. les cultures maraîchères irriguées continues dont la jachère intercalaire entre deux cycles n'a pas une durée excédant 6-7 mois, le sol restant généralement sans végétation pendant cette période. Dans les situations intensives les quantités annuelles de phosphore-engrais (di-ammonium phosphate, phosphate mono-calcique) apportées aux prairies et maraîchages sont équivalentes, de 70 à 80 kg P.ha⁻¹.an⁻¹. La profondeur de labour est comprise, en général, entre 15 et 20 cm.

Deux échantillons de sols (0-10 cm), Pr9 et M11, prairie et cultures maraîchères intensifiées (Station d'Études en Cultures Irriguées, Sainte-Anne), sont plus particulièrement étudiés. L'historique des successions culturales de ces parcelles est le suivant :

– Pr9 : avant 1973 canne à sucre, 1973-78 jachère, prairie à *Digitaria decumbens* depuis 1978, prélèvement en 1987 ;

TABLEAU I
Caractéristiques analytiques moyennes
et valeurs extrêmes observées des horizons 0 à 20 cm
des vertisols étudiés (n = 8)
*Analytical data of 0 to 20 cm layers of studied vertisols
(mean and limit values)*

	min.	max.	moyenne
Texture : 0-20 µm %	60	70	68
γ _a g.cm ⁻³	0,7	1,2	1,1
pH eau	5,5	7	6,3
pH KCl	4,7	5,9	5,2
MO % 0-20 cm	2	7	4,4
Pt µg.g ⁻¹	100	400	220
CEC cmol.kg ⁻¹	40	60	55
S "	36	58	46
Ca ⁺⁺ "	15	28	22
Mg ⁺⁺ "	9	25	16
K ⁺ "	0,3	1,4	0,7
Na ⁺ "	2,2	6	3,3
Al ⁺⁺⁺ + H ⁺ "	0,1	0,5	0,2
S/CEC %	74	97	88

γ_a : densité apparente

S : Σ cations

– M11 : avant 1975 canne à sucre, depuis 1975 cultures maraîchères intensives, prélèvement en 1986.

Les méthodes

ANALYSE DU PHOSPHORE

Le phosphore total (P_t) est déterminé après calcination (550 °C) de l'échantillon et reprise par l'acide nitrique pur à chaud. La quantité de phosphore organique (P_o) est obtenue par le calcul de la différence des quantités de phosphore extraites à l'acide sulfurique 2N avant et après calcination (ANDERSON, 1960). Le phosphate de tous les extraits est dosé par colorimétrie (DUVAL, 1962). Le phosphore total extractible par l'eau au pH du sol et à pH 10, lors de la dispersion des sols qui précède le fractionnement granulométrique, est déterminé après attaque nitrique. La teneur de phosphore inorganique de ces extraits est déterminée par colorimétrie selon JOHN (1970).

FRACTIONNEMENT GRANULOMÉTRIQUE DU SOL

La méthode est celle précédemment utilisée lors de l'étude de la matière organique des mêmes sols (ALBRECHT *et al.*, 1986). La dispersion des échantillons est effectuée par agitation dans l'eau (rapport sol/eau = 1/10) pendant 17 heures, puis le mélange est amené et maintenu à pH 10 (q.s.p. NaOH 0,1 N à l'aide d'un titrateur automatique) sous agitation pendant deux heures. La phase soluble est séparée par décantation rapide ; le culot est tamisé sous eau à 200, 50 et 20 μm ; les fractions 5-20 et 0-5 μm sont séparées par sédimentation. Il est ainsi obtenus les fractions $F > 200$, $F 50-200$, $F 20-50$, $F 5-20$, $F 0-5 \mu\text{m}$. Par densimétrie dans l'eau les fractions légères $F_l > 200$ et $F_l 50-200$ sont séparées des fractions denses (sableuses) $F_d > 200$ et $F_d 50-200$ (FELLER, 1979). Les échantillons Pr9 et M11 ont été fractionnés selon ce protocole.

Le carbone et l'azote des sols et des fractions granulométriques ont été déterminés par voie sèche (auto-analyseur CNS NA 1500 Carlo Erba).

ERREUR SUR LA MESURE DES STOCKS DE PHOSPHORE

Les coefficients de variation sont compris entre 1,7 et 3 % ($n = 3$) lors de la détermination de la teneur de P_t d'un horizon. Les écart-types varient de 4,4 à 9,6 $\text{kg } P_t \cdot \text{ha}^{-1}$ pour l'ensemble des horizons étudiés. Aussi pour un même horizon (0-10, 10-20, 20-40 cm) les stocks de deux situations ont été considérés : 1. non différents si la différence de P_t est comprise entre 0 et 10 $\text{kg } P_t \cdot \text{ha}^{-1}$; 2. diffé-

rents si la différence est supérieure à 10 $\text{kg } P_t \cdot \text{ha}^{-1}$. Les coefficients de variation des déterminations de la teneur de phosphore des extraits H_2SO_4 sont de 2,5 à 3 %, soit de 5 à 6 % pour la détermination du P_o d'un horizon.

RÉSULTATS

Phosphore total (P_t), organique (P_o) et inorganique (P_i) des sols

Toutes situations confondues les teneurs de phosphore total des horizons 0-10 cm sont comprises entre 174 et 363 $\mu\text{g } P_t \cdot \text{g}^{-1}$ sol ; celles des horizons 10-20 cm entre 96 et 271 $\mu\text{g } P_t \cdot \text{g}^{-1}$ sol (fig. 1).

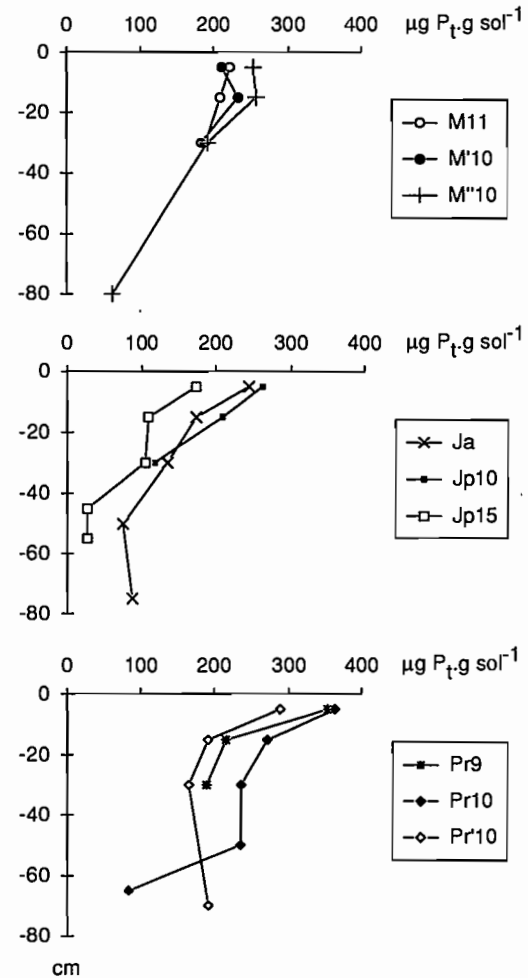


FIG. 1 – Répartition des teneurs de phosphore total dans les profils de sols sous maraîchage (M), jachères (J) et prairies (Pr). Total phosphorus contents in soil under market gardening (M), fallows (J) and pastures (Pr).

Seules les teneurs de P_t des horizons 0-10 cm des prairies sont significativement supérieures à celles observées sous maraîchages et jachères. Les valeurs de P_t diminuent avec la profondeur. Les teneurs de P_t des horizons 20-40 cm sous maraîchages sont comparables à celles observées sous prairies, et supérieures à celles observées sous jachères. À plus de 40 cm de profondeur les teneurs de P_t sont inférieures à $100 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ et sont semblables, sauf pour la situation Pr'10 qui est un des sols les plus profonds.

Il existe une relation linéaire positive entre les stocks de carbone et de phosphore total des horizons 0-10 et 10-20 cm des sols étudiés (fig. 2).

Le classement des stocks de phosphore total de la couche de sol 0-40 cm exprimés en $\text{kg P}\cdot\text{ha}^{-1}$ est le suivant (tabl. II) :

Jp15 < Ja < M'10 ≤ Jp10 < M11 < < M''10 < Pr'10 ≤ Pr9 < Pr10
 avec : $529 < J < 791 \text{ kg P}\cdot\text{ha}^{-1}$;
 $751 < M < 899 \text{ kg P}\cdot\text{ha}^{-1}$;
 et $942 < Pr < 1270 \text{ kg P}\cdot\text{ha}^{-1}$.

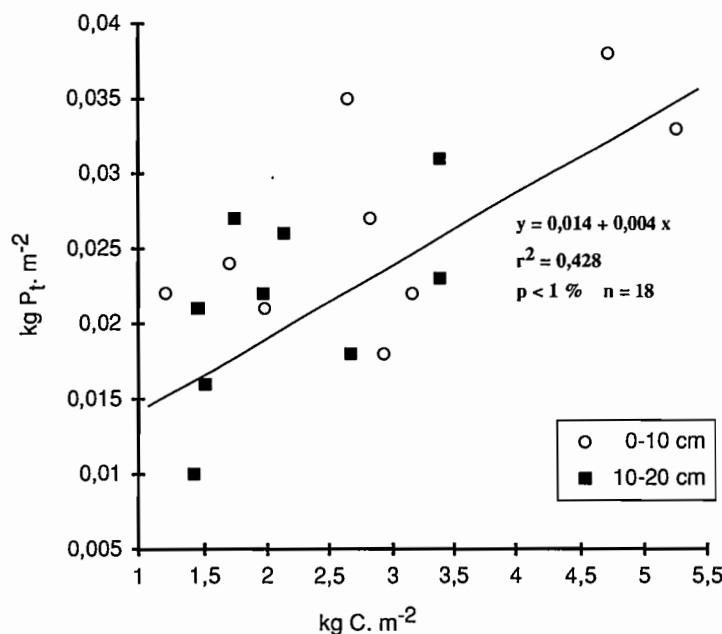


FIG. 2 – Relation entre les contenus de carbone et de phosphore total des horizons 0-10 et 10-20 cm.
 Total carbon and phosphorus contents relation in 0-10 and 10-20 cm layers.

La figure 3 illustre la répartition de 0 à 40 cm de profondeur des quantités ($\text{kg P}\cdot\text{ha}^{-1}$) de P_t , P_i et P_o des situations M11, M'10, Pr9 et Ja. Le phosphore inorganique est le plus abondant sous maraîchage ($P_o/P_i < 1,1$), alors que le phosphore organique domine sous jachère et prairie ($P_o/P_i > 1,2$). Les quantités relatives de P_i et P_o sont dépendantes du mode d'exploitation du sol. Pour la couche de sol 0-40 cm, les stocks de P_o et P_i se classent de la manière suivante :

pour P_o : M11 < M'10 = Ja < Pr9 ;
 pour P_i : Ja < M'10 = Pr9 < M11.

Les rapports C/P_o (fig. 3) sont les plus élevés dans le sol sous jachère (Ja) : 295, 238, et 254 de 0 à 40 cm de profondeur. Les situations M11, M'10

présentent des rapports C/P_o voisins dans les deux horizons superficiels, entre 177 et 189. Les C/P_o les plus faibles sont observés dans le sol Pr9, 141 en surface et 117 en profondeur.

Fractionnement granulométrique des sols M11 et Pr9 et distribution du phosphore dans les fractions

BILANS DES FRACTIONNEMENTS

La comparaison des résultats pondéraux du fractionnement granulométrique (sans destruction de MO) avec l'analyse mécanique (après destruction MO) montre que l'échantillon M11 a été bien dispersé lors du fractionnement granulométrique (tabl. III). Par contre les fractions F 5-20 et F 20-50

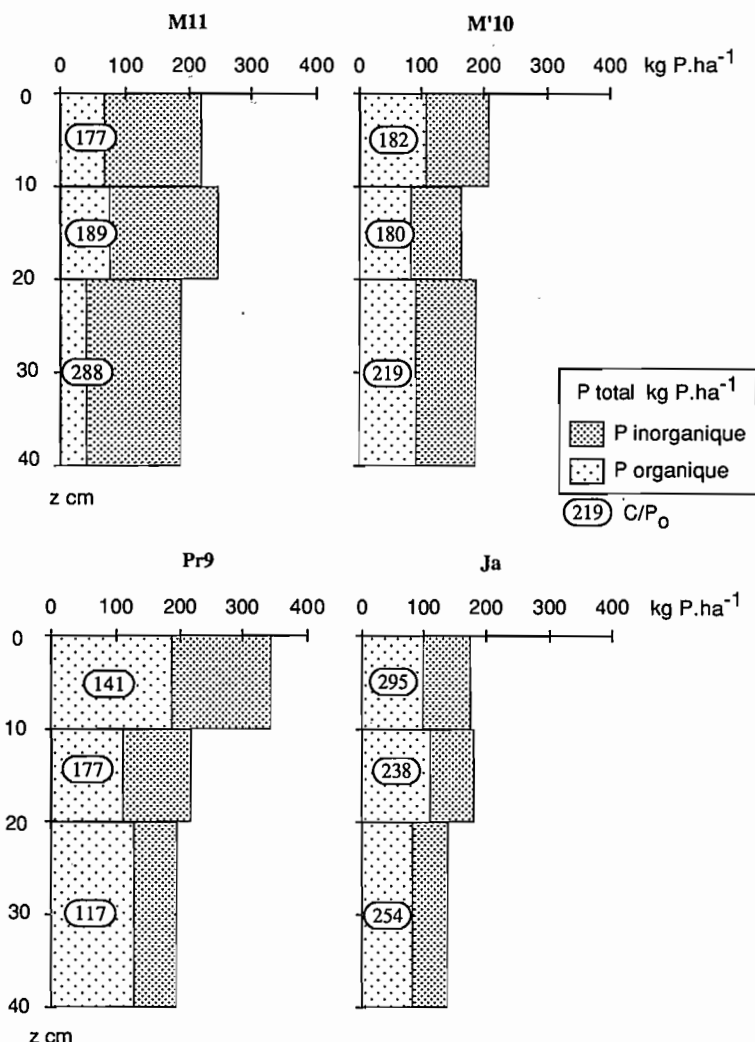


FIG. 3 – Répartition du phosphore total, inorganique et organique (kg.ha^{-1}) et rapports C/P_0 de vertisols sous maraîchages (M'10 et M11), prairie (Pr9) et jachère arborée (Ja).

Distribution of total, inorganic and organic phosphorus (kg.ha^{-1}) and C/P_0 ratios of vertisols with market gardening (M'10 and M11), pastures (Pr9) and arborescent fallows (Ja).

de l'échantillon Pr9 ne sont pas totalement dispersées après fractionnement granulométrique (présence d'argiles) puisque leurs teneurs pondérales sont supérieures à celles obtenues par l'analyse mécanique. L'observation de ces fractions au microscope confirme la présence d'agrégats organo-limono-argileux.

Les sommes des fractions pour Pt, Pi, Po ($\mu\text{g.g sol}^{-1}$), et C (mg.g sol^{-1}) sont comprises respectivement entre 105 % et 107 %, 107 % et 116 %, 102 % et 99 %, et 89 % et 100 % de l'élément dosé directement sur le sol total (tabl. IV). Ces bilans sont acceptables compte tenu du nombre de fractions séparées.

NATURE ET CONTENU DE CARBONE DES FRACTIONS (tabl. III et IV)

Les fractions Fd sont essentiellement constituées de sables siliceux. Les fractions F1 sont constituées de débris racinaires fragmentés peu décomposés. Les teneurs ($\text{mgC.g fraction}^{-1}$) et le contenu (mgC.g sol^{-1}) de carbone des fractions minérales Fd > 200 et Fd 50-200 sont négligeables dans ces sols, sauf pour la fraction Fd > 200 de l'échantillon Pr7, dans laquelle des débris végétaux subsistent suite à une séparation imparfaite. La somme des fractions F1 représente respectivement 11 % et 27 % du carbone total des échantillons M11 et Pr9.

TABLEAU III

Bilans pondéraux de l'analyse mécanique et du fractionnement granulométrique, rapports C/N et nature des fractions
Weight balance of the particle size analysis and particle size fractionation, C/N ratios and nature of fractions

Fractions μm	Masse g.100 g sol^{-1}		C/N	Nature des fractions *
	Analyse mécanique	Fractionnement granulométrique moyenne écart-type		
Maraîchage				
Fd > 200	9,0	10,1 0,8	6,8	sables siliceux, bipyramidaux
Fl > 200		0,3 0,1	19,5	débris de racines fragmentés
Fd 50-200	14,2	14,1 0,8	13,6	sables siliceux
Fl 50-200		1,4 0,2	19,0	débris de racines fragmentés
F 20-50	6,0	8,7 1,9	14,7	particules minérales siliceuses propres, débris végétaux en cours de décomposition
F 5-20	10,8	10,4 0,8	12,3	particules minérales siliceuses propres, débris végétaux humifiés
F 0-5	55,9	52,8 1,8	7,7	** Montmorillonite, interstratifiés, cristobalite
M.O.	2,1			
Σ fractions	98,0	97,9		
Sol total	100,0	100,0	11,1	
Prairie				
Fd > 200	14,5	13,9 1,0	88,1	sables siliceux, bipyramidaux
Fl > 200		0,9 0,1	26,4	racines fines et débris de racines fragmentés
Fd 50-200	17,7	17,9 0,7	11,5	sables siliceux
Fl 50-200		2,4 0,4	16,1	débris de racines fragmentés, partiellement décomposés
F 20-50	2,9	9,1 0,7	13,1	particules minérales siliceuses propres, débris végétaux décomposés, agrégats non dispersés
F 5-20	10,8	15,6 0,9	13,2	particules minérales siliceuses propres, débris végétaux humifiés, agrégats non dispersés
F 0-5	50,5	36,6 1,0	8,6	** Montmorillonite, interstratifiés, cristobalite
M.O.	4,7			
Σ fractions	100,9	96,4		
Sol total	100,0	100,0	11,9	

* Observations optiques et ** diffraction RX sur fraction 0-2 μm

Les fractions F 20-50 et F 5-20 sont constituées de limons siliceux et de débris végétaux et fongiques, elles contiennent moins de 10 % du carbone total des sols. Dans le cas de l'échantillon Pr9 nous avons observé quelques agrégats incomplètement dispersés.

L'observation en microscopie électronique à transmission (CHOTTE, comm. pers.) des fractions F 0-5 montre qu'elles sont constituées de colloïdes organo-minéraux, de bactéries, de débris figurés non identifiables. Respectivement 57 % et 43 % du carbone du sol sont contenus dans la fraction F 0-5 des échantillons M11 et Pr9.

Les quantités de carbone dans la fraction soluble n'ont pas été dosées ici, mais, pour d'autres échantillons provenant des mêmes situations, cette fraction représente environ 4 % du carbone total.

TENEURS DE P_T , P_I ET P_O DANS LES FRACTIONS GRANULOMÉTRIQUES (tabl. IV)

Les teneurs de P_T , P_I , et P_O des fractions du sol Pr9 sont supérieures à celles du sol M11, sauf pour la fraction F 5-20 μm dont les teneurs de phosphore sont identiques.

DISTRIBUTION DU PHOSPHORE DANS LES FRACTIONS GRANULOMÉTRIQUES

Les fractions supérieures à 50 μm contiennent 11 % et 23 % du P_t respectivement dans les échantillons Pr9 et M11. Les fractions comprises entre 5 et 50 μm représentent 14 % et 15 % P_t , les fractions 0-5 μm 64 % et 54 % du P_t respectivement dans les échantillons Pr9 et M11. La fraction soluble représente de 13 à 15 % du P_t , et est dominée par du phosphore minéral (63 à 73 %) (tabl. IV).

La différence $\Delta P_t = 143 \mu\text{g.g sol}^{-1}$ de P_t entre les deux échantillons est due essentiellement au contenu de P_o ($\Delta P_o / \Delta P_t = 0,83$). Les fractions F 0-5 μm et supérieures à 50 μm représentent respectivement 62 et 25 % de ΔP_o .

DISCUSSION ET CONCLUSIONS

Contenu de phosphore des sols

Les contenus de phosphore total des sols cultivés sont déterminés par la teneur de phosphore des roches-mères et les apports d'engrais. Dans

TABLEAU IV
Phosphore et carbone des fractions granulométriques des sols maraîcher M11 et prairial Pr9
Phosphorus and carbon distribution in particle size fractions, market gardening M11 and pasture Pr9 soils

Fractions μm	P total		P inorganique				P organique				CARBONE			
	masse %	$\mu\text{g sol}^{-1}$	$\mu\text{g fract}^{-1}$	Pt %Pt	Pi %Pi	Pi %Pt	$\mu\text{g fract}^{-1}$	$\mu\text{g sol}^{-1}$	Po %Po	Po %Pt	C/Po	mg.g fract ⁻¹	mg.g sol ⁻¹	C % Ctotal
Maraîchage														
Fd > 200	10,14	7,02	69,19	3,16	5,64	3,67	55,57	13,62	1,38	2,01	0,62	1,08	0,11	0,9
FI > 200	0,3	1,11	375,2	0,5	0,06	0,04	20,65	354,55	1,06	1,55	0,48	70,42	0,21	1,7
Fd 50-200	14,14	11	77,83	4,95	8,76	5,70	61,98	15,85	2,24	3,26	1,01	1,36	0,19	1,58
FI 50-200	1,44	5,12	355,33	2,3	0,29	0,19	20,00	335,33	4,83	7,04	2,17	79,51	1,15	9,4
F 20-50	8,68	16,99	195,69	7,64	13,82	8,99	159,19	36,5	3,17	4,62	1,43	13,92	1,21	9,91
F 5-20	10,42	15,35	147,26	6,9	14,37	9,35	137,88	9,38	0,98	1,43	0,44	9,21	0,96	7,87
F 0-5	52,75	143,21	271,46	64,4	96,09	62,49	182,14	89,32	47,12	68,67	21,19	13,23	6,98	57,21
soluble		34,29		15,42	24,87	16,17			9,42	13,73	4,24		nd	
Σ fractions	97,87	234,08		105,3	163,90	106,59			70,20	102,31	31,57		10,8	88,56
Sol total		222,38		100	153,76	100			68,62	100	30,86		12,2	100
Prairie														
Fd > 200	13,92	33,04	237,3	9,35	19,11	11,74	137,24	100,06	13,93	7,31	3,94	25,56	3,56	13,19
FI > 200	0,92	5,01	542,8	1,42	0,29	0,18	31,40	511,4	4,70	2,47	1,33	333,61	3,08	11,42
Fd 50-200	17,9	22,47	125,5	6,36	23,42	14,39	130,83	0	0	0,00	0,00	3,1	0,55	2,06
FI 50-200	2,4	21,03	875,51	5,95	0,77	0,47	32,04	843,47	20,24	10,62	5,73	171,56	4,12	15,28
F 20-50	9,08	33,07	364,39	9,36	21,18	13,02	233,39	131	11,89	6,24	3,37	23,69	2,15	7,97
F 5-20	15,63	22,13	141,6	6,26	21	12,90	134,33	7,27	1,14	0,60	0,32	11,34	1,77	6,57
F 0-5	36,58	192,59	526,47	54,51	72,86	44,77	199,16	327,31	119,74	62,83	33,89	31,95	11,69	43,32
soluble		47,64		13,48	30,12	18,51			17,52	9,19	4,96		nd	
Σ fractions	96,44	376,99		106,7	188,75	115,99			189,17	99,26	53,54		26,93	99,81
Sol total		353,3		100	162,73	100			190,57	100	53,94		26,98	100

l'ensemble des situations étudiées les teneurs de P_t des roches-mères, non ou peu altérées, sont semblables (GRUNEVALD, 1965). Les sols étudiés ont un fort pouvoir fixateur vis-à-vis des ions phosphate (BROSSARD *et al.*, 1988). En l'absence de données initiales sur le phosphore des sols sous culture de canne à sucre, avant la mise en place des prairies et maraîchages, le fond géochimique de phosphore peut être estimé par les teneurs de P_t observées sous cultures de très longue durée de canne à sucre. COLMET DAAGE *et al.* (1967-70) indiquent une teneur de P_t de l'horizon 0-20 cm de 318 $\mu\text{g P.g sol}^{-1}$, soit 668 $\text{kg P}_t \cdot \text{ha}^{-1}$ (densité apparente γ de 1,05 g.cm^{-3}). Ce stock est équivalent à celui mesuré dans la situation Pr10, légèrement supérieur à celui mesuré en Pr9 et Pr'10, et supérieur à ceux des autres situations pour une couche de sol de même épaisseur (tabl. II). Compte tenu de la variabilité inter-parcellaire existante, les prairies étudiées contribuent à maintenir le stock de P_t issu de la culture de canne.

Les stocks plus faibles de P_t observés dans les jachères et M'10 sont expliqués par l'absence de fertilisation depuis la fin de la culture de canne. Les apports de phosphore ne peuvent provenir que des déjections animales. Or, celles-ci sont faibles (moins de 10 brebis/ha) sur parcelles non irriguées (MAHIEU, 1990).

Malgré une fertilisation identique, les stocks de P_t sous cultures maraîchères intensives sont plus faibles que ceux observés sous prairies. Ceci peut être dû à une érosion en nappe importante des parcelles maraîchères (ALBRECHT *et al.*, 1992 b) entraînant en bas de pente du phosphore associé aux particules argileuses.

Relation carbone-phosphore des sols

Dans la couche 0-40 cm, les teneurs élevées de carbone dans les sols sont induites par des longues durées de jachères ou de prairies. Elles s'accompagnent d'un contenu élevé de phos-

phore organique. La situation Ja est un exemple en l'absence de fertilisation, la situation Pr9 un exemple en présence de fertilisation (fig. 3). Les cultures intensives, M11, conduisent à privilégier le stockage de phosphore sous forme inorganique. M'10 est une situation où les durées de jachères sont plus longues et le sol enherbé, si bien que l'on observe un équilibre entre P_o et P_i . Le rôle de stockage du phosphore par la matière organique du sol est illustré par la relation entre les quantités de carbone et de phosphore contenus dans les horizons superficiels (fig. 2).

Comparaison des sols de type maraîcher et prairial

La différence de stock de phosphore total entre le sol M11 et le sol Pr9 est expliquée par l'horizon 0-10 cm : M11 contient 220 kg P_{ha}^{-1} , dont 31 % de P_o , et Pr9 346 kg P_{ha}^{-1} , dont 54 % de P_o . Dans ces horizons les contenus de P_i ne sont pas significativement différents : 152 kg $P_i \cdot \text{ha}^{-1}$ dans M11 et 159 kg $P_i \cdot \text{ha}^{-1}$ dans Pr9. P_o explique donc les différences entre M11 et Pr9.

Le fractionnement granulométrique de ces sols permet de préciser la répartition des formes du phosphore total, organique et inorganique des sols.

Dans le sol M11 le stock de phosphore est inorganique et contenu dans la fraction 0-5 μm . Ceci s'explique par le fait que les sols étudiés ont une texture très argileuse, et que ce sont les fractions argileuses qui présentent le pouvoir fixateur le plus élevé à l'égard du phosphore, les fractions limono-sableuses constituées de silice cristallisée étant peu fixatrices (SEXE, 1989). Aussi, en l'absence d'une forte densité racinaire, les apports d'engrais sont préférentiellement fixés par les fractions minérales du sol. Sous prairie le feutrage dense de racines en surface du sol sur une épaisseur de 3 à 5 cm constitue un facteur d'interception de l'apport plus efficace que celui existant sous les cultures maraîchères.

Les fractions F 0-5 μm et de taille supérieure à 50 μm représentent respectivement 62 % et 25 % de la différence de P_o entre les deux sols. Deux compartiments de stockage du phosphore sont mis en évidence. Le premier est formé par les débris végétaux associés aux fractions sableuses, le second par la fraction organo-argileuse F 0-5 μm . La fraction F 5-20 joue un rôle négligeable dans le stockage du phosphore total, et en particulier du phosphore organique. Ces compartiments varient quantitativement et qualitativement selon le

niveau des restitutions racinaires comme le montre la comparaison prairie-maraîchage. Ces résultats rejoignent les données bibliographiques. WILLIAMS et STEINBERG (1958) envisagent deux compartiments de P_o , l'un ayant des C/P_o voisins de 100 où le phosphore est combiné à C, N ou S dans les colloïdes, l'autre où le P_o n'est pas associé à la matière organique. TURCHENEK et OADES (1979) montrent que le P_i de fractions granulométriques est associé aux fractions densimétriques les plus légères constituées de débris végétaux (taille > 20 μm), et aux « matériaux » microbiens associés aux limons fins et argiles. Dans les chernozems sous prairies, les teneurs de P_o les plus élevées sont mesurées dans les fractions granulométriques comprises entre 0,2 et 5 μm (TIESSEN et STEWART, 1983), fractions qui sont caractérisées par des contenus élevés de carbone avec des rapports C/N d'environ 10 et des rapports C/P_o voisins de 50 (TIESSEN *et al.*, 1983). Dans un sol ferrugineux tropical à texture sableuse, 43 à 71 % du P_i est contenu dans la fraction granulométrique 0-50 μm , le restant étant dans les fractions de taille supérieure à 50 μm (FELLER *et al.*, 1987).

Le phosphore des fractions F1 est originaire de débris végétaux variés (parties aériennes, racines). Ces débris F1 > 200 μm de Pr9 sont peu décomposés (teneur de C = 334 %, C/N = 26,4) et présentent le rapport $C/P_o = 652$ le plus élevé des fractions F1. La valeur de ce rapport est inférieure dans la fraction F1 50-200 pour lequel $C/P_o = 203$. Elle correspond à une décomposition accrue des structures végétales avec baisse de la teneur de carbone (172 %) et C/N = 16. Si les rapports C/N de 12,3 et 13,2 des fractions F 5-20 illustrent l'existence d'un mélange de matières organiques à caractère végétal et amorphe, leur rapport $C/P_o > 900$ indique que la matière organique a perdu une partie importante du phosphore initialement présent, le phosphore restant étant essentiellement sous forme minérale.

Deux processus permettent d'expliquer le stockage de P_o dans la fraction F 0-5 μm :

(1) l'adsorption directe de composés organo-phosphatés issus de débris végétaux ou des produits de l'activité racinaire et microbienne (exsudats, mucilages, etc.) sur les colloïdes minéraux. Il existe une affinité des composés organo-phosphatés simples pour les constituants minéraux du sol (ANDERSON, 1980 ; SHANG *et al.*, 1990). Les

vertisols étudiés présentent moins de 2 % de Fe_2O_3 et d' Al_2O_3 dans l'extrait citrate-bicarbonate-dithionite, ces quantités de fer et aluminium ne sauraient seules expliquer les valeurs de P_0 observées. L'adsorption par les argiles est l'hypothèse la plus probable. SÁNCHEZ CAMAZANO et SÁNCHEZ MARTÍN (1983) démontrent l'adsorption de pesticides organo-phosphorés dans l'espace inter-foliaire d'une montmorillonite-Ca. LAHEURTE (1985) montre que des composés insolubles provenant de l'exsudation racinaire d'un maïs sont fixés à 80 % sur la montmorillonite. Les pH_{eau} des vertisols sont compris entre 5,5 et 7 (tabl. I), domaine de pH pour lequel GREAVES et WILSON (1969) ont démontré l'adsorption d'acides nucléiques sur les surfaces externes des feuillets de montmorillonite ;

(2) l'immobilisation microbienne des phosphates apportés et du phosphore racinaire lors des processus de décomposition-humification. L'immobilisation microbienne des ions phosphates a été montrée par de nombreux auteurs (MAYAUDON et SIMONART, 1964 ; GHOSHAL, 1975). Ceci nécessite la présence de substrats carbonés, condition assurée dans la situation prairiale puisque les racines de *Digitaria* sont constamment renouvelées. Les tests respirométriques d'échantillons des parcelles Pr et M ont montré que l'activité microbienne était deux fois plus intense dans l'échantillon Pr que dans l'échantillon M (CHOTTE, comm. pers.).

On observe que le rapport $C/P_0 = 98$ de la fraction 0-5 μm de l'échantillon Pr9 est nettement inférieur à celui de la même fraction de l'échantillon M11 ($C/P_0 = 148$). Ceci peut être interprété par une abondance plus importante de débris microbiens et fongiques et de produits issus de leur activité. Les valeurs de C/P_0 varient dans le même sens que celles des C/N , ils décroissent avec la diminution de la taille des fractions. Les F 5-20 étant exclues de par le caractère minéral du phosphore qu'elles contiennent, on obtient la relation suivante entre C/N et C/P_0 des fractions granulométriques :

$$C/P_0 = 21,01 C/N - 74,72 ;$$

avec $n = 8$, $r^2 = 0,522$ et $p = 0,026$.

Le sens de la variation est conforme à celui observé par TIESSEN et STEWART (1983). Ces auteurs observent que le C/P_0 varie de 141 dans les fractions $> 50 \mu\text{m}$ (constituées de débris végétaux et de sables) à 51-54 dans les fractions de taille inférieure à 2 μm . ENWEZOR (1976) montre

que l'immobilisation microbienne du phosphore de débris végétaux a lieu lorsque le C/P_t des débris décroît — de 501 à 112 — au cours de l'incubation dans un sol tropical. Pour des sols de régions tempérées, BROOKES *et al.* (1984) estiment que 5 à 24 % du phosphore organique est contenu dans la biomasse microbienne, dont les rapports C/P_t sont compris entre 11,7 et 25,6 dans les sols prairiaux. Les valeurs de C/P_0 et une activité microbienne plus intense dans le sol prairial militent en faveur d'un transfert d'une partie du phosphore contenu dans les débris racinaires vers la biomasse microbienne lors des processus de décomposition.

La plus grande partie du P_0 des sols M et Pr est contenue dans la fraction 0-5 μm . Ces résultats sont en accord avec ceux de BRANNON et SOMMERS (1985) qui montrent que des composés organo-phosphatés, des ester-phosphates associés à des groupements aminés incorporés à des substances humiques, sont résistants aux hydrolyses chimiques et enzymatiques. La stabilité chimique et biochimique du phosphore organique serait renforcée par une stabilité physique d'une partie des colloïdes organiques associés aux micelles argileuses, même après de très longues durées de cultures en continu sur vertisols, comme le montrent SKJEMSTAD *et al.*, (1986).

CONCLUSION

Cet inventaire a permis de préciser le rôle du type de situations culturales sur la distribution du phosphore de vertisols. Les situations peuvent être classées selon la quantité de phosphore total dans la couche 0-40 cm : jachères \leq maraichages $<$ prairies. Les quantités d'engrais ont modulé ce classement, toutefois les prairies fertilisées contribuent au maintien d'un stock de phosphore équivalent à celui observé sous cultures de canne à sucre de longue durée. Il est mis en évidence une relation linéaire positive entre les quantités de carbone et de phosphore total des horizons superficiels des sols. La mise en réserve de phosphore organique est assurée en présence de restitutions racinaires relativement importantes, sous jachères et prairies. L'étude de la répartition des formes organique et inorganique du phosphore montre que sont concernées les fractions du sol de taille supérieure à 20 μm (constituées par des débris végétaux) et la fraction organo-argileuse de taille inférieure à 5 μm . Sous prairies, l'adsorption directe de pro-

duits organo-phosphatés sur les colloïdes minéraux et l'immobilisation microbienne des phosphates des engrais et du phosphore racinaire sont les processus qui conduisent à la réserve de phosphore organique observée. Dans les situations à faibles restitutions

racinaires, le stockage de phosphore est régi par les propriétés des minéraux du sol qui conduisent à une réserve de phosphore inorganique.

Manuscrit accepté par le Comité de rédaction le 5 avril 1993.

BIBLIOGRAPHIE

- ALBRECHT (A.), BROSSARD (M.), FELLER (C.), 1986. – Étude de la matière organique par fractionnement granulométrique. 2 – Augmentation par une prairie à *Digitaria decumbens* du stock organique de vertisols cultivés en Martinique. *C. R. 13^e Cong. Intern. AISS*, Hambourg, vol. II : 214-215.
- ALBRECHT (A.), BROSSARD (M.), CHOTTE (J.L.), FELLER (C.), 1992 a. – Les stocks organiques des principaux sols cultivés de la Martinique. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, vol. XXVII, n° 1 : 23-36.
- ALBRECHT (A.), RANGON (L.), LAURENT (J.Y.) 1992 b. – *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, vol. XXVII, n° 1 : 00-00.
- ANDERSON (G.), 1960 – Factors affecting the estimation of phosphate-esters in soils. *J. Sci. Food Agric.*, 11 : 497-503.
- ANDERSON (G.), 1980. – « Assessing organic phosphorus in soils » in KHASAWNEH F.E., SAMPLE E.C. et KAMPRATH E.J. (eds.), 1980 : 411-431.
- BRANNON (C.A.), SOMMERS (L.E.), 1985. – Stability and mineralization of organic phosphorus incorporated into model humic polymers. *Soil Biol. Biochem.*, 17 : 221-227.
- BROOKES (P.C.), POWLSON (D.S.), JENKINSON (D.S.), 1984. – Phosphorus in the soil microbial biomass. *Soil Biol. Biochem.*, 16 : 169-175.
- BROSSARD (M.), FARDEAU (J.C.), MONTEAU (J.P.), LAURENT (J.Y.), 1988. – « Matière organique et mobilité du phosphore dans quelques types de sols » in *Fertilité des sols dans les agricultures paysannes caribéennes*, Rapp. Convention CEE-Orstom, multigr., Martinique : 69-84.
- COLMET-DAAGE (F.), GAUTHEYROU (J.), GAUTHEYROU (M.), 1967-1970. – Sélection de profils des Antilles avec rattachement à la classification des sols des Antilles au 1/20000^e. Publ. Orstom-Antilles n° 44, 1199 p.
- CPCS, 1967. – *Classification des sols*. École nationale supérieure agronomique Grignon, 87 p.
- DUVAL (L.), 1962. – Dosage céruléomolybdique de l'acide phosphorique dans les sols, les végétaux et les engrais. *Ann. Agron.* : 469-482.
- ENWEZOR (W.O.), 1976. – The mineralization of nitrogen and phosphorus in organic materials of varying C/N and C/P ratios. *Plant and Soil*, 44 : 237-240.
- ENWEZOR (W.O.), MOORE (A.W.), 1966. – Phosphorus status of some Nigerian soils. *Soil Sci.*, 102 : 322-328.
- FELLER (C.), 1979. – Une méthode de fractionnement granulométrique de la matière organique des sols. Application aux sols tropicaux à textures grossières, très pauvres en humus. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, vol. XVII, n° 4 : 339-346.
- FELLER (C.), CHOPART (J.L.), DANCETTE (F.), 1987. – Effet de divers modes de restitution de pailles de mil sur le niveau et la nature du stock organique dans deux sols sableux tropicaux (Sénégal). *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, vol. XVIII, n° 4 : 237-252.
- GHOSHAL (S.), 1975. – Biological immobilization and chemical fixation of native and fertilizer phosphorus in soil. *Plant and Soil*, 43 : 649-662.
- GREAVES (M.P.), WILSON (M.J.), 1969. – The adsorption of nucleic acids by montmorillonite. *Soil Biol. Biochem.*, 1 : 317-323.
- GRUNVALD (H.), 1965. – *Géologie de la Martinique*. Mém. de la Carte Géol. de la France, Imp. Nat., 144 p.
- HARRISON (A.F.), 1987. – *Soil organic phosphorus*. CAB International, 257 p.
- JOHN (M.K.), 1970. – Colorimetric determination of phosphorus in soil and plant materials with ascorbic acid. *Soil Sci.*, 109 : 214-220.
- KHANAWNEH (F.E.), SAMPLE (E.C.), KAMPRATH (E.J.) (eds.), 1980. – *The role of phosphorus in agriculture*.
- LAHEURTE (F.), 1985. – *Recherches sur quelques mécanismes d'interactions rhizosphériques en modèles expérimentaux : altération microbienne et racinaire, exsudation et humification*. Thèse Univ. Nancy-I, 178 p. et annexes.
- MAHIEU (M.), 1990. – Irrigation et élevage. 1^{res} journées de l'agriculture et de l'élevage à Ste Anne, Martinique, 5 p.
- MAYAUDON (J.), SIMONART (P.), 1964. – Assimilation of 32P orthophosphate by soil micro-organisms. *Annl. Inst. Pasteur*, 107 : 188-196.
- SÁNCHEZ CAMAZANO (M.), SÁNCHEZ MARTÍN (M.J.), 1983. – Factors influencing interactions of organophosphorus pesticides with montmorillonite. *Geoderma*, 29 : 107-118.
- SEXE (M.), 1989. – *Biodisponibilité du phosphore dans un vertisol soumis à deux systèmes de culture différents (Martinique)*. Mém. DEA de Pédologie, Orstom-Martinique, ENSIA-Nancy, 39 p. et annexes.
- SHANG (C.), HUANG (P.M.), STEWART (J.W.R.), 1990. – Kinetics of adsorption of organic and inorganic phos-

- phates by short-range ordered precipitate of aluminium. *Can. J. Soil Sci.*, 70 : 461-470.
- SKJEMSTAD (J.O.), DALAL (R.C.), BARRON (P.F.), 1986. – Spectroscopic investigations of cultivation effects on organic matter of vertisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50 : 354-359.
- TIESSEN (H.), STEWART (J.W.B.), 1983. – Particle-size fractions and their use in studies of soil organic matter : II. Cultivation effects on organic matter composition in size fractions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47 : 509-514.
- TIESSEN (H.), STEWART (J.W.B.), MOIR (J.O.), 1983. – Changes in organic and inorganic phosphorus composition of two grassland soils and their particle size fractions during 60-90 years of cultivation. *J. of Soil Sc.*, 34 : 815-823.
- TURCHENEK (L.W.), OADES (L.M.), 1979. – Fractionation of organo-mineral complexes by sedimentation and densities techniques. *Geoderma*, 21 : 311-343.
- TYBURN (P.), 1986. – *Effet de l'intensification des cultures maraîchères et prairiales sur les propriétés de vertisols et ferrisols de la Martinique*. Mém. Istom, rapp. mult. Irat-Orstom, Martinique.
- WILLIAMS (C.H.), STEINBERG (A.), 1958. – Sulfur and phosphorus in some eastern Australian soils. *Aust. J. Agric. Res.*, 9 : 483-491.