

POUVOIR FIXATEUR VIS-À-VIS DES IONS PHOSPHATE  
ET TENEUR EN PHOSPHORE DE SOLS FERRUGINEUX ET FERRALLITIQUES D'AFRIQUE DE  
L'OUEST

PHOSPHATE FIXING CAPACITY AND PHOSPHORUS CONTENT  
OF SOME LOW ACTIVITY CLAY SOILS FROM WEST AFRICA

E. Frossard<sup>1</sup>, M. Brossard<sup>2</sup>, C. Feller<sup>3</sup> et J. Rouiller<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ENSAIA-INRA, BP 172, 54505 Vandoeuvre-les-Nancy Cedex, France;

<sup>2</sup>ORSTOM, BP 8006, 97259 Fort-de-France Cedex, Martinique, France;

<sup>3</sup>ORSTOM c/o CPB-CNRS, BP5, 54501 Vandoeuvre-les-Nancy Cedex, France;

<sup>4</sup>CPB-CNRS, UPR 6831 du CNRS, associé à l'Université de Nancy I, BP5, 54501  
Vandoeuvre-les-Nancy Cedex, France;

Résumé

L'objet de ce travail est l'étude des différents paramètres déterminant le pouvoir fixateur vis-à-vis des ions phosphate ( $P_{FIX}$ ) et la teneur en phosphore total (Pt) de sols ferrugineux et ferrallitiques bien drainés d'Afrique de l'Ouest. Une comparaison est faite avec quelques situations des Antilles et du Brésil. L'analyse est menée au niveau des échantillons de sols totaux (0-2 mm) et de leur fractions granulométriques. Le pouvoir fixateur est estimé par une méthode isotopique (Fardeau, 1981). On constate que:

(i) Le pouvoir fixateur des échantillons de sols totaux (0-2 mm) est directement lié à la teneur en fer total (et/ou argile). Le pouvoir fixateur des différentes fractions granulométriques est déterminé essentiellement par leur teneur en  $Fe_2O_3$  et suit la même loi que celle obtenue pour les échantillons totaux. Un rôle inhibiteur de la matière organique vis-à-vis de la fixation des ions phosphate est mis en évidence pour les fractions argileuses. Ce rôle est discuté en termes de microagrégation d'une part et/ou de compétition entre la MO et les ions phosphate vis-à-vis des sites de fixation, d'autre part.

(ii) Les teneurs en Pt des échantillons étudiés dépendent à la fois de leurs teneurs en fer et en MO. Le rôle de la MO est prépondérant pour les sols sableux à sablo-argileux d'Afrique de l'Ouest. La distribution de Pt dans les différentes fractions granulométriques est discutée.

Abstract.

The objective of this study was to assess the most important parameters in the determination of the phosphate fixing capacity ( $P_{FIX}$ ) and of the total phosphorus content (Pt) of well drained low activity clay (LAC) soils from West Africa compared to LAC soils from Brazil and the West Indies. This study was done on bulk soil samples (0-2 mm) and on their particle size fractions. The phosphate fixing capacity, estimated by an isotopic exchange method (Fardeau, 1981), was highly related to the clay content of the soils, and to the total iron content of the soils and of their particle size fractions. The organic matter was shown to decrease the phosphate fixing capacity in the clay fraction. The mechanisms involved were discussed in terms of microaggregation

and of competition between organic matter and phosphate ions for similar fixation sites.

(ii) The total phosphorus content was shown to depend on total iron and carbon contents. However, for the coarse textured soils of West Africa, carbon was the most important factor in the determination of the total P. The role of the different particle size fractions in the storage of phosphorus was discussed.

## Introduction

Dans un système sol-plante la disponibilité du phosphore (P) pour la plante est fonction de l'aptitude du sol à maintenir une concentration donnée en ions phosphate sous forme soluble (White et Beckett, 1964). Pour les horizons de surface cette concentration dépend à la fois des réserves en P du sol (et de leur nature) et des caractéristiques minéralogiques, physico-chimiques, organiques et biologiques du sol. Les réserves (niveau et nature) en P minéral du sol dépendent du type de sol et de sa gestion (fertilisation ou non). Les caractéristiques minéralogiques et physico-chimiques vont imposer au sol un pouvoir fixateur (vis-à-vis des ions phosphate). La matière organique (nature et quantité) permet la mise en réserve de quantités non négligeables de phosphore dit "organique" (Friend et Birch, 1960; Acquaye, 1963; Omotoso, 1971; Adepetu et Corey, 1976; Lopez Hernandez, 1989; Condrón et al., 1990) dont une fraction est considérée comme labile sous l'effet de l'activité phosphatasique (Appiah et Thomas, 1982; Stewart et Tiessen, 1987).

Dé manière générale les sols ferrugineux et ferrallitiques, très largement représentés en Afrique de l'Ouest (Boulet et al., 1971), sont souvent fortement carencés en phosphore (Gigou, 1987). Cette carence peut être le fait de faibles réserves en P et/ou d'un pouvoir fixateur élevé du sol. En effet divers travaux basés sur la méthode de Chang et Jackson (1957) ont montré que dans ces sols le P était généralement associé aux oxyhydroxydes de fer et d'aluminium, formes considérées comme peu mobilisables à court terme (Dabin, 1971; Pichot et al., 1973). Corrélativement de nombreuses études d'estimation du pouvoir fixateur ont confirmé qu'il existait une relation entre le pouvoir fixateur et les teneurs en oxyhydroxydes de fer et d'aluminium et/ou en argile (Juo et Fox, 1977; Sanchez et al., 1989; Parfitt, 1989). C'est le cas en particulier de l'enquête IMPHOS portant sur plus de 250 sols ferrugineux et ferrallitiques provenant de 35 pays répartis sur tous les continents (Roche et al., 1980).

Pour des raisons pédogénétiques (Fauck, 1972; Chauvel, 1977) de nombreux sols ferrugineux et ferrallitiques d'Afrique de l'Ouest ont des horizons de surface appauvris en argile et en oxyhydroxydes de fer et d'aluminium. Selon les conditions locales (roche-mère, topographie, etc) les textures des horizons de surface varient entre les pôles sableux à argilo-sableux (de 3 à 30% d'argile environ). On peut donc s'attendre à des variations importantes de leur pouvoir fixateur. Parallèlement, il a été montré (Feller et al., 1991a) que les stocks et la dynamique des matières organiques des horizons de surface de ces sols sont largement déterminés par la texture.

Aussi, il apparaît particulièrement intéressant de préciser l'effet de la texture, de la teneur en fer total ( $Fe_2O_3$ ) et de la matière organique sur le pouvoir fixateur et le phosphore total des sols ferrugineux et ferrallitiques d'Afrique de l'Ouest. L'étude est menée à deux niveaux: (i) sur

les échantillons totaux (sol 0-2mm), (ii) sur leurs différentes fractions granulométriques.

Tous les sols d'Afrique de l'Ouest étudiés ici sont des sols ferrugineux et ferrallitiques bien drainés, et non gravillonnaires dans leurs horizons de surface. Une comparaison est faite avec des sols ferrallitiques des Antilles et du Brésil dont les horizons de surface ont une texture argileuse et sont beaucoup plus riches en oxyhydroxydes de fer et d'aluminium.

## Matériel et méthodes

**Situations.** Les situations retenues pour ce travail sont présentées au tableau I et quelques caractéristiques analytiques des 20 échantillons étudiés (horizons 0-10 cm) sont portées dans le tableau II.

Tableau 1. Présentation générale des situations étudiés.  
Table 1. General properties of the studied sites.

Symbole	Localisation	Type de sol*	Pluvio-métrie (mm)	Roche mère**	Références des études concernées
TNR	Sénégal (centre)	FL	800	G	F & M, 1977 <sup>1</sup>
V, P, T	Côte d'Ivoire (nord)	FL, FR	1360	M	HYPERBAV, 1990
DAV	Togo (sud)	FR	1040	G	Poss et al., 1984
FTN	Martinique	FR	2000	A	C & al., 1986 <sup>2</sup>
MSP	Brésil (São-Paulo)	FO	1200	B	Cerri et al 1991
MPR	Brésil (Ponta Grossa)	FO	1000	D	Frossard & al'92

\* Abréviations: FL = sol ferrugineux tropical lessivé à taches et concrétions en profondeur; FR = sol ferrallitique faiblement désaturé; FO = sol ferrallitique fortement désaturé (à caractère oxisol).

\*\* Abréviations: G = grès du Continent Terminal; M = formation gneisso-migmatitique; A = brèches andésitiques; B = basalte; D = formation sédimentaire à composition de diabase.

<sup>1</sup> Feller et Milleville, 1977

<sup>2</sup> Chevignard et al., 1986

Les sols sont de type: ferrugineux tropical lessivé à taches et concrétions (FL), ferrallitique faiblement (FR) ou fortement désaturés (FO) (Classification française CPCs, 1967). Seize échantillons proviennent d'Afrique de l'Ouest. Leur teneur en argile varie de 4 à 23% et celle en oxyde de fer total ( $Fe_2O_3$ ) de 1 à 6%. Les 4 échantillons provenant de la Martinique et du Brésil ont des teneurs en argile et en fer total variant respectivement de 47 à 65% et de 12 à 18%.

Rappelons que les sols des situations P et T du nord de la Côte d'Ivoire appartiennent à une toposéquence de quelques centaines de mètres dans la zone de contact forêt-savane où l'on passe de sols ferrallitiques rouges (P) sur le

plateau à des sols ferrallitiques rouges et ocres (T1, T3) en haut de pente puis à des sols ferrugineux beiges (T8, T12) à mi- et en bas de pente.

Les parcelles sont soit sous "végétation naturelle", soit sous jachère (J), soit sous cultures (C) continues après défrichement (tableau 2). A l'exception de la parcelle DAV000 faisant partie d'un essai agronomique mais ne recevant aucune fumure NPK, toutes les parcelles cultivées sont gérées dans des agricultures paysannes à faibles intrants. En d'autres termes, les parcelles analysées ici n'ont pratiquement pas reçu d'engrais.

Tableau 2. Caractéristiques analytiques et pouvoir fixateur (PFI) des échantillons étudiés.

Table 2. Analytical characteristics and fixing capacity (PFI) of the studied soil samples.

n°	Situation			Données analytiques (0-10cm)				
	Symbole	sol	Végétation**	C	0-2 µm	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Pt.	PFI
				mg.kg <sup>-1</sup>	---g100g <sup>-1</sup> ---	mg.kg <sup>-1</sup> .		
1	TNR101	FL	SA	8.9	7.6	1.1	104	1.4
2	TNR141	FL	C12	5.1	4.3	1.0	81	1.1
3	P	FR	F	17.1	21.3	4.3	271	7.1
4	T1	FR	SA	15.8	23.2	5.6	251	6.7
5	T3	FR/FL	SA	12.8	18.6	2.7	286	3.1
6	T8	FL	Sa	11.6	12.0	2.7	299	2.0
7	T12	FL	Sh	7.6	6.5	1.6	168	1.4
8	V1	FR	F	16.8	18.6	3.9	214	3.2
9	V2	FR	C2	12.6	19.1	nd	171	nd
10	V3	FR	C10	9.7	20.7	2.2	152	3.6
11	V4	FR	J5	10.7	17.1	nd	192	nd
12	V5	FR	J12	15.9	18.6	3.9	187	3.9
13	V6	FR	J30	11.3	12.4	nd	176	nd
14	DAV F	FR	F	19.4	16.3	2.26	309	nd
15	DAV J	FR	J6	12.4	6.4	1.49	152	nd
16	DAV000	FR	C14	5.3	8.9	1.49	117	nd
17	FTN1	FR	F	42.6	49.0	nd	288	10.0
18	FTN2	FR	F	37.1	46.9	nd	445	14.3
19	MSP41	FO	F	42.5	56.0	11.6	547	1.8
20	MPR51	FO	Pn	40.9	65.3	17.8	561	11.1

\* Abréviations: voir tableau I

\*\* Abréviations: F= forêt; S (A, a, h) = savane (arborée, arbustive, herbacée); Pn = prairie naturelle; J12 = jachère de 12 ans; C14 = culture continue depuis 14 ans après défrichement de savane ou de forêt.

nd non déterminé

**Analyses totales sur échantillons de sol 0-2 mm.** Le carbone est dosé à l'aide d'un analyseur élémentaire "CHN Carlo Erba mod.1106". Le fer total exprimé en oxydes (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) est déterminé selon Jeanroy (1974) après fusion au métaborate de strontium. Le phosphore total (Pt) est dosé en colorimétrie selon Murphy et Riley (1962) après calcination de l'échantillon à 550°C,

attaque par  $\text{HNO}_3$  concentré et mise en solution dans  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0.5M. Les teneurs en argiles (0-2  $\mu\text{m}$ ) sont celles obtenues par la méthode de fractionnement granulométrique décrite ci dessous.

**Fractionnement granulométrique des sols.** En vue d'étudier la nature des matières organiques (MO) associées aux fractions granulométriques de sols tropicaux, une méthode basée sur la dispersion des éléments fins par une résine sodique a été publiée récemment (Feller et al., 1991b) et appliquée, entre autres, aux échantillons étudiés ici (Feller et al., 1991a). Dans cette dernière étude les fractions obtenues étaient les suivantes: 20-2000  $\mu\text{m}$ , 2-20  $\mu\text{m}$ ; 0.2-2  $\mu\text{m}$  et 0-0.2  $\mu\text{m}$ . Le schéma de fractionnement granulométrique des sols est rappelé dans ce volume (Feller et al., 1991d). Les matières organiques (MO) associées aux fractions 20-2000  $\mu\text{m}$  sont essentiellement constituées de débris végétaux à divers degrés de décomposition (C/N#20). Les MO associées aux limons fins (2-20  $\mu\text{m}$ ) sont des mélanges de débris végétaux et fongiques et de MO intégrées dans des microagrégats organo-limoneux très stables et non dispersés au cours du fractionnement (C/N#15); enfin les MO associées aux argiles ont un caractère amorphe beaucoup plus marqué avec des rapports C/N proches de 10. Une modification concernant la fraction 20-2000  $\mu\text{m}$  a été apportée dans ce travail en vue de séparer les sables et les limons grossiers des MO qui leur sont associées. On opère par densimétrie dans l'eau selon Feller (1979). On obtient ainsi une fraction "légère" (F1 20-2000) riche en MO (les teneurs en carbone varient de 30 à 100 mg  $\text{C.g}^{-1}$  de fraction) et une fraction "dense" (Fd 20-2000) très pauvre en MO (les teneurs en carbone varient de 0.5 à 1.0 mg  $\text{C.g}^{-1}$  de fraction). En résumé, les fractions suivantes sont considérées dans ce travail: F1 20-2000, Fd 20-2000, 2-20, 0.2-2.0 et 0-0.2  $\mu\text{m}$ .

**Mesure du "pouvoir fixateur" ( $P_{\text{FIX}}$ ).** Le pouvoir fixateur d'un sol vis-à-vis des ions phosphates caractérise son aptitude à transférer les ions  $\text{PO}_4$  introduits en solution vers des formes de moins en moins extractibles. Il est mesuré ici par la méthode des cinétiques de dilution isotopique (Fardeau, 1981). Expérimentalement on introduit dans un système sol-solution en équilibre dynamique une quantité donnée de radioactivité (R) sous forme d'ions  $\text{H}_3^{32}\text{PO}_4$ , puis on suit la décroissance de la radioactivité en solution au cours du temps. Si  $r_1$  représente la quantité de radioactivité restante en solution après une minute d'échange isotopique, le rapport  $R/r_1$ , appelé ici  $P_{\text{FIX}}$  est une mesure du pouvoir fixateur du sol vis-à-vis des ions phosphate. Le pouvoir fixateur d'un échantillon de sol est d'autant plus élevé que son  $P_{\text{FIX}}$  est grand. En utilisant l'échelle fournie par Fardeau (1981) le pouvoir fixateur sera élevé pour  $P_{\text{FIX}} > 5$  et il sera faible pour  $P_{\text{FIX}} < 2.5$ . Pour les échantillons de sol (0-2 mm) de cette étude nous avons effectué les mesures de  $P_{\text{FIX}}$  dans les mêmes conditions que celles préconisées par Fardeau (1981) (suspension de 10 g de sol dans 99 ml d'eau distillée plus 1 ml de solution aqueuse contenant  $\text{H}_3^{32}\text{PO}_4$ ). Par contre pour les fractions granulométriques des sols TNR101 et V1 les mesures ont été faites sur des suspensions de 200 mg d'échantillon avec 19 ml de  $\text{CaCl}_2$  0.1M plus 1 ml de solution aqueuse contenant  $\text{H}_3^{32}\text{PO}_4$ . Toutes les valeurs de  $P_{\text{FIX}}$  sont des moyennes de trois répétitions avec un coefficient de variation d'environ 7 %.

Par rapport à d'autres techniques d'estimation du pouvoir fixateur des sols comme celles basées sur les isothermes d'adsorption (voir par exemple Holford et al., 1974) la technique de Fardeau présente l'intérêt de ne pas

modifier les équilibres sol-solution puisque, l'expérience étant menée sans "entraîneur", la masse de phosphore introduite ( $10^{-5}$   $\mu\text{gP.g}^{-1}$  de sol) est négligeable par rapport à la concentration d'ions phosphate présents dans la solution du sol.

**Traitement à  $\text{H}_2\text{O}_2$  du sol TNR 101 et de ses fractions.** Le sol TNR 101 et ses fractions ont été traités à  $\text{H}_2\text{O}_2$  comme suit: 0.5 g d'échantillon additionnés de 100ml de  $\text{H}_2\text{O}_2$  15 vol. (stabilisée par des stannates) sont portés à l'étuve à  $50^\circ\text{C}$  jusqu'à évaporation totale. Les échantillons sont ensuite lavés pendant 17 h dans  $\text{CaCl}_2$  0.1M avec un rapport échantillon : solution de 1:100 puis centrifugés à 10000 G pendant 20 minutes. Les échantillons sont ensuite repris pour l'analyse du  $\text{P}_{\text{FIX}}$ .

## Résultats

### Pouvoir fixateur des sols et de leurs fractions granulométriques

Les sols. Les valeurs détaillées de  $\text{P}_{\text{FIX}}$  sont présentées au tableau II. On constate que :

-les échantillons sableux ( $0-2\mu\text{m} < 10\%$ ) du Sénégal (TNR101 et TNR 141) et de Côte d'Ivoire (T8, T12) ont des  $\text{P}_{\text{FIX}}$  inférieurs à 2.5 et sont donc faiblement fixateurs;

-les échantillons sablo-argileux de Côte d'Ivoire (T3, V1, V3, V5) avec des teneurs en argile comprises entre 12 et 21%, ont des  $\text{P}_{\text{FIX}}$  compris entre 2.5 et 5.0 et sont donc moyennement fixateurs;

-les échantillons sablo-argileux de Côte d'Ivoire (P, T1) et argileux des Antilles et du Brésil (FTN1, FNT2, MPR51) avec des teneurs en argile supérieures à 21%, ont des  $\text{P}_{\text{FIX}}$  supérieurs à 5.0 et sont donc considérés comme fortement fixateurs. L'échantillon MSP41 argileux et riche en fer a un pouvoir fixateur curieusement faible. Ceci est peut être lié à sa teneur anormalement élevée (pour ce type de sol) en calcium total et échangeable (Cerri et al., 1991). Cet échantillon n'est pas conservé pour l'étude statistique présentée ci dessous.

Il existe des liaisons hautement significatives ( $>1\%$ ) entre  $\text{P}_{\text{FIX}}$  et  $0-2\mu\text{m}$  (figure 1) ou  $\text{P}_{\text{FIX}}$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , puisque  $0-2\mu\text{m}$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  sont fortement liés ( $r=0.98$ ). On obtient les équations (1) et (2) suivantes:

$$\text{P}_{\text{FIX}} = 0.210 (0-2\mu\text{m}) + 0.18; \quad [1]$$

$n=13$  ;  $r = 0.91$ ; hautement significatif

$$\text{P}_{\text{FIX}} = 0.586 (\text{Fe}_2\text{O}_3) + 1.55; \quad [2]$$

$n=10$  ;  $r=0.90$ ; hautement significatif

avec  $0-2\mu\text{m}$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  exprimés en  $\text{g.100g}^{-1}$

Les coefficients de corrélation ne sont pas améliorés si l'on considère la teneur en éléments fins  $0-20\mu\text{m}$  ( $r=0.91$ ). De même la prise en compte de la MO dans une corrélation multiple  $\text{P}_{\text{FIX}} = f(0-20\mu\text{m}, \text{C})$  ne modifie pas nettement le coefficient de corrélation ( $r=0.92$ ).

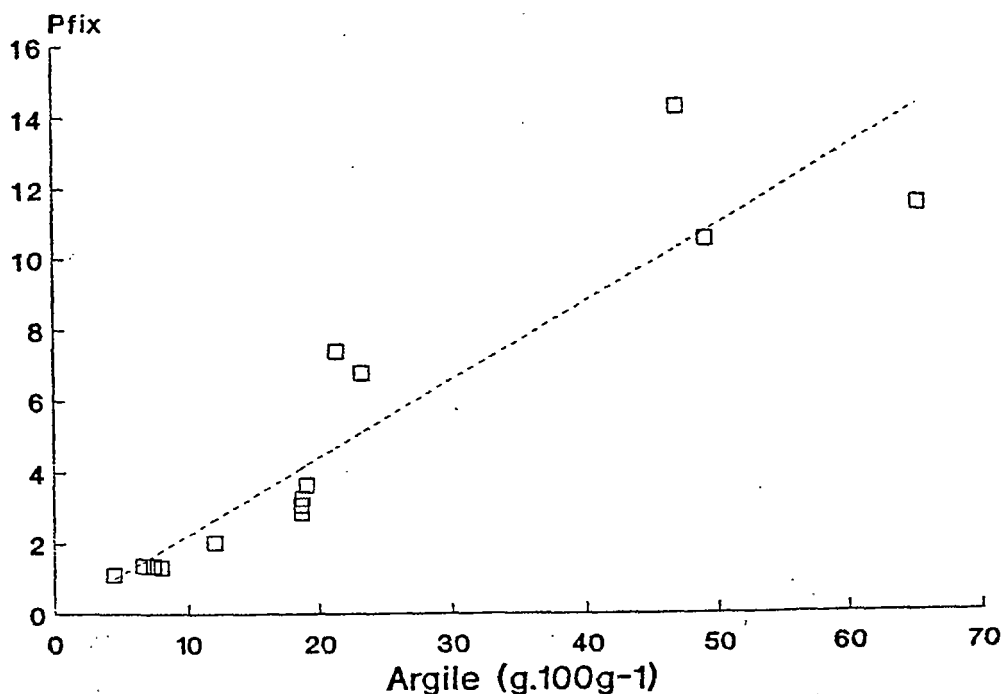


Figure 1. Relation entre le pouvoir fixateur ( $P_{FIX}$ ) et la teneur en argile des sols étudiés.

Figure 1. Relation between the phosphate fixing capacity ( $P_{FIX}$ ) and the clay content of the studied soils

Les fractions granulométriques non traitées à  $H_2O_2$ . Les mesures du pouvoir fixateur ont été effectuées sur les fractions de 2 échantillons: TNR 101 ( $0-2 \mu m = 7.6 \text{ g.}100\text{g}^{-1}$ ) et V1 ( $0-2 \mu m = 18.6 \text{ g.}100\text{g}^{-1}$ ). Les résultats sont détaillés dans le tableau III; ils sont illustrés par la figure 2. Pour le calcul de  $P_{FIX}$  correspondant à la somme des fractions on opère comme suit: (i) calcul des quantités de  $^{32}\text{PO}_4^{3-}$  fixées en 1 minute par kg de chacune des fractions granulométriques ( $\text{MBq.kg}^{-1}$  de fraction), (ii) calcul de la radioactivité de chaque fraction rapportée au kg de sol en tenant compte des teneurs pondérales des fractions ( $\text{MBq.kg}^{-1}$  de sol), (iii) calcul de  $P_{FIX}$  en tenant compte de la quantité totale de  $^{32}\text{PO}_4^{3-}$  introduite en  $\text{MBq.kg}^{-1}$  de sol. Le  $P_{FIX}$  de la somme des fractions des échantillons TNR101 et V1 est peu différent du  $P_{FIX}$  du sol non fractionné. Cette différence est imputable (i) aux faibles  $P_{FIX}$  initiaux, (ii) au fractionnement granulométrique et (iii) au coefficient de variation (7%) affecté aux mesures de  $P_{FIX}$  sur chaque fraction (Frossard et al. 1992).

Pour les deux échantillons, on constate que le pouvoir fixateur des fractions (figure 2) augmente quand on passe des fractions supérieures à  $20 \mu m$  aux fractions  $2-20 \mu m$  et  $0.2-2 \mu m$ , et diminue ensuite dans les argiles fines ( $0-0.2 \mu m$ ). Des valeurs proches ou supérieures à 10 sont observées dans les argiles grossières. A l'exception de Fd 20-2000 toutes les fractions de V1 ont des  $P_{FIX}$  supérieurs à ceux des fractions correspondantes de TNR 101.

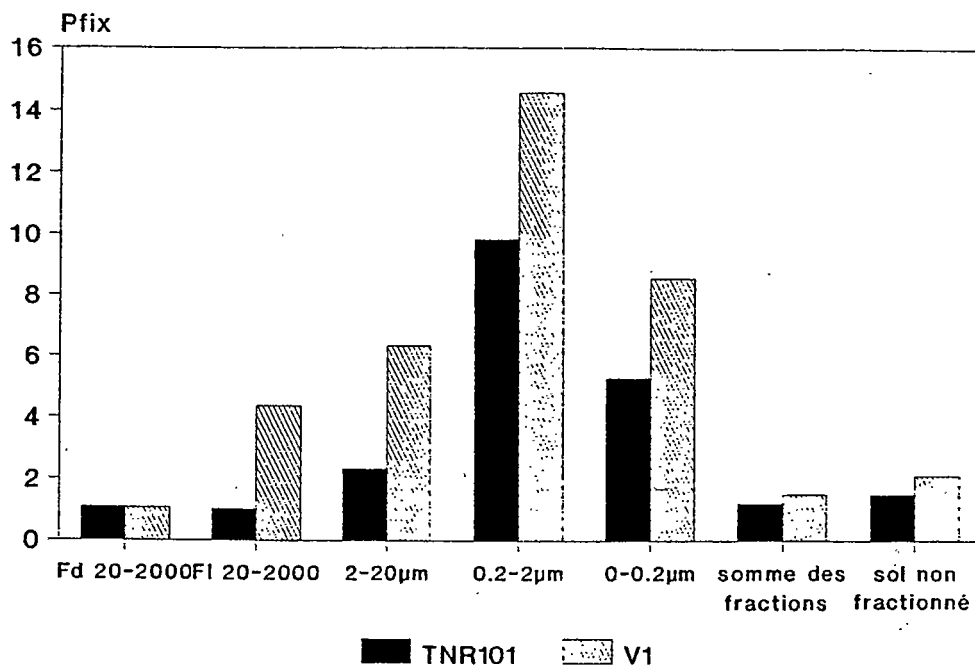


Figure 2. Pouvoir fixateur ( $P_{FIX}$ ) des fractions granulométriques et des échantillons non fractionnés des sols TNR 101 et V1.  
 Figure 2. Phosphate fixing capacity ( $P_{FIX}$ ) of the particle size fractions and of the non fractionated soils TNR101 and V1.

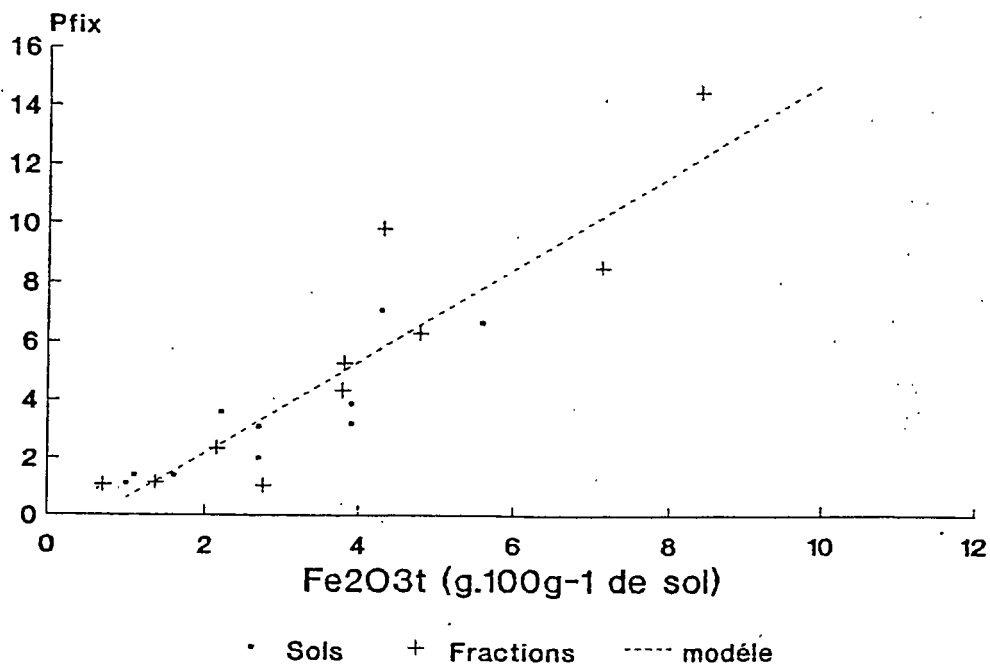


Figure 3. Relation entre le pouvoir fixateur ( $P_{FIX}$ ) et les teneurs en  $Fe_2O_3$  des fractions de TNR 101 et V1. Comparaison avec des sols non fractionnés (situations Afrique).  
 Figure 3. Relation between the phosphate fixing capacity ( $P_{FIX}$ ) and  $Fe_2O_3$  content of the fractions of TNR101 and V1. Comparison with non fractionated soils from West Africa.



Tableau 3. Pouvoir fixateur ( $P_{FIX}$ ) et teneur en carbone (C), phosphore (Pt) et oxydes de fer ( $Fe_2O_3$ ) totaux des fractions granulométriques. Echantillons TNR 101 et V1.

Table 3. Fixing capacity ( $P_{FIX}$ ) and total carbon (C), phosphorus and iron oxide ( $Fe_2O_3$ ) contents of the particle size fractions. Soils samples TNR 101 and V1.

Echantillon	Fraction $\mu m$	Masse	-----g.kg <sup>-1</sup> -----			$P_{FIX}$	
			C	Pt	$Fe_2O_3$	Témoin	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
TNR 101	20-2000 Fd	753	0.4	24	7.0	1.1	1.0
	20-2000 F1	69	32.0	106	13.7	1.2	1.2
	2-20	98	36.0	211	21.5	2.3	3.9
	0.2-2	50	43.5	687	43.3	9.9	14.3
	0-0.2	23	33.6	533	38.1	5.3	20.0
	humidité	4					
	somme	997	9.0	92	11.4	1.2	1.2
sol non fractionné		1000	8.9	104	11.1	1.5	1.7
V1	20-2000 Fd	650	0.9	70	27.7	1.1	
	20-2000 F1	54	59.9	242	37.8	4.4	
	2-20	106	54.9	420	48.0	6.3	
	0.2-2	119	34.5	792	84.2	14.6	
	0-0.2	57	20.4	614	71.2	8.6	
	humidité	12					
	somme	997	14.9	232	39.2	1.5	
sol non fractionné		1000	16.8	214	39.0	2.1	

La participation de chaque fraction au  $P_{FIX}$  de la somme des fractions est de 44 à 50% pour les fractions 0-2  $\mu m$ , de 21 à 27% pour les fractions 2-20  $\mu m$  et de 24 à 35% pour les fractions 20-2000  $\mu m$ . Les éléments fins (0-20  $\mu m$ ) qui représentent 20 à 30% de la masse totale de l'échantillon participent donc de 60 à 80% au  $P_{FIX}$  des sols.

La relation entre  $P_{FIX}$  et  $Fe_2O_3$  est portée sur la figure 3. On constate que le  $P_{FIX}$  des fractions est fortement déterminé par leur teneur en  $Fe_2O_3$ :

$$P_{FIX} (\text{fractions}) = 1.66 (Fe_2O_3) - 1.16; \quad [3]$$

$$n = 10; r = 0.91; \text{hautement significatif}$$

avec  $Fe_2O_3$  exprimé en g.100g<sup>-1</sup>

Cette équation [3] est proche de l'équation [4] concernant les sols non fractionnés des seules situations Afrique (obtenue en excluant de la relation [2] les sols des Antilles et du Brésil):

$$P_{FIX} (\text{sols Afrique}) = 1.28 (Fe_2O_3) - 0.29; \quad [4]$$

$$n = 10; r = 0.89; \text{hautement significatif}$$

avec  $Fe_2O_3$  exprimé en g.100g<sup>-1</sup>

Si l'on regroupe sols (Afrique) et fractions de TNR 101 et V1 on obtient alors:

$$P_{\text{FIX}} = 1.58 (\text{Fe}_2\text{O}_3) - 0.98 \quad [5]$$
$$n = 20 ; r = 0.91; \text{ hautement significatif}$$

avec  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  exprimé en  $\text{g} \cdot 100\text{g}^{-1}$

Si on fait intervenir la MO dans une régression multiple  $P_{\text{FIX}} = f(\text{Fe}_2\text{O}_3, \text{C})$  Le coefficient de régression reste inchangé ( $r = 0.91$ ).

Les fractions granulométriques traitées à  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Afin d'étudier l'effet de la MO sur le pouvoir fixateur, celui-ci a été déterminé, pour l'échantillon TNR 101, sur l'échantillon total (0-2 mm) et sur ses fractions granulométriques traitées à  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Les  $P_{\text{FIX}}$  ainsi mesurés, " $P_{\text{FIX}} \text{H}_2\text{O}_2$ ", sont comparés à ceux de l'échantillon total et des fractions non traités (Tableau 3). Le traitement  $\text{H}_2\text{O}_2$  ne modifie pas significativement  $P_{\text{FIX}}$  du sol initial (respectivement 1.7 et 1.5) même si " $P_{\text{FIX}} \text{H}_2\text{O}_2$ " est légèrement plus élevé que celui de " $P_{\text{FIX}}$  témoin". On n'observe pas non plus de différences significatives sur les fractions Fd 20-2000 et 2-20  $\mu\text{m}$ . Par contre  $P_{\text{FIX}}$  augmente fortement après traitement  $\text{H}_2\text{O}_2$  pour les fractions argileuses, pour les argiles fines en particulier.

#### **P total des sols et de leurs fractions granulométriques.**

Les sols La teneur moyenne en phosphore total (Pt) à partir de l'ensemble des échantillons d'Afrique de l'Ouest est plus faible ( $196 \text{ mg P} \cdot \text{kg}^{-1}$  sol) que celle calculée pour les sols ferrallitiques argileux des Antilles et du Brésil ( $460 \text{ mg P} \cdot \text{kg}^{-1}$ ). Si l'on considère seulement les situations Afrique, la meilleure corrélation est celle obtenue pour  $\text{Pt} = f(\text{C}, \text{Fe}_2\text{O}_3)$ . L'équation est la suivante:

Afrique:

$$\text{Pt} = 11.95 (\text{C}) + 8.57 (\text{Fe}_2\text{O}_3) + 36.6 \quad [5]$$
$$n = 12; r = 0.80; \text{ hautement significatif}$$

avec: Pt exprimé en  $\text{mg P} \cdot \text{kg}^{-1}$  sol, C en  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$  sol et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  en  $\text{g} \cdot 100\text{g}^{-1}$  sol

Les coefficients de corrélation partiels sont  $r(\text{Pt}-\text{C}) = 0.80$ ,  $r(\text{Pt}-\text{Fe}_2\text{O}_3) = 0.63$ , et  $r(\text{C}-\text{Fe}_2\text{O}_3) = 0.70$ . Les corrélations  $\text{Pt} = f(\text{C}, 0-2\mu\text{m})$  ou  $\text{Pt} = f(\text{C}, 0-20\mu\text{m})$  sont moins bonnes ( $r = 0.75$  et  $0.76$  respectivement) que la corrélation  $\text{Pt} = f(\text{C}, \text{Fe}_2\text{O}_3)$ .

Ce sont donc, pour la gamme des échantillons d'Afrique de l'Ouest étudiés, les teneurs en carbone qui déterminent prioritairement les teneurs en P total. La relation Pt-C est illustrée par la figure 4. Si l'on considère maintenant l'ensemble des situations (Afrique, Antilles et Brésil) on obtient l'équation suivante.

Tout:

$$\text{Pt} = 10.95 (\text{C}) + 3.07 (\text{Fe}_2\text{O}_3) + 61.0 \quad [6]$$
$$n = 14; r = 0.95; \text{ hautement significatif}$$

avec: Pt exprimé en  $\text{mg P} \cdot \text{kg}^{-1}$  sol, C en  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$  sol et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  en  $\text{g} \cdot 100\text{g}^{-1}$  sol

Les coefficients de corrélation partiels sont  $r(\text{Pt-C}) = 0.95$ ,  $r(\text{Pt-Fe}_2\text{O}_3) = 0.89$ , et  $r(\text{C-Fe}_2\text{O}_3) = 0.93$ . Les corrélations faisant intervenir  $0-2\mu\text{m}$  ou  $0-20\mu\text{m}$  à la place de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  sont moins bonnes ( $r = 0.89$  et  $0.90$  respectivement) que la corrélation  $\text{Pt} = f(\text{C}, \text{Fe}_2\text{O}_3)$ .

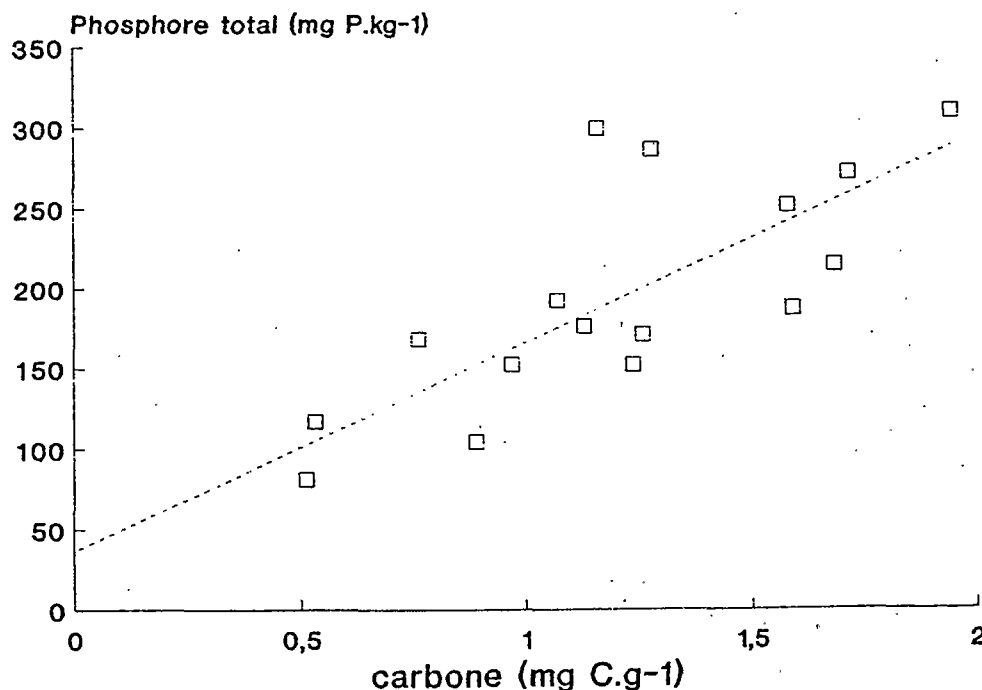


Figure 4. Relation entre les teneurs en phosphore total (Pt) et en carbone (C) pour les situations Afrique.

Figure 4. Relation between total phosphorus (Pt) and carbon (C) contents in the African soils.

Ainsi l'effet des teneurs en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  sur les teneurs en Pt est d'autant plus marqué que l'étendue des teneurs en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  est importante. En effet, pour les seuls échantillons Afrique,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  varie seulement de 1 à 6%, alors que tous échantillons confondus la variation est de 1 à 18%. Il est clair qu'un échantillonnage "équilibré" (autant d'échantillons "Antilles + Brésil" que d'échantillons "Afrique") aurait conduit à des coefficients de corrélation entre Pt et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  plus élevés qu'entre Pt et C.

Les fractions granulométriques. Le phosphore total des fractions ainsi que leur rapport C/Pt ont été mesurés sur 11 échantillons d'Afrique de l'Ouest (échantillons nos 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 14, 16 du tableau II). Les valeurs moyennes (m) et les écart-types (et) sont reportés dans le tableau 4.

Tableau 4. Teneur en phosphore (Pt) et rapport C/Pt des fractions granulométriques de 11 sols ferrugineux et ferrallitiques d'Afrique de l'Ouest. Moyennes (m) et écart-types (e.t.).

Table 4. Phosphorus content (Pt) and C/Pt ratio of the particle size fractions of 11 low activity clay soils from West Africa. Mean (m), standard deviation (e.t.) and coefficient of variation (c.v.)

Fraction	Pt fraction (ou sol)		C/Pt fraction (ou sol)	
	m	e.t.	m	e.t.
$\mu\text{m}$	-----mg.kg <sup>-1</sup> -----			
Fd 20-2000	55	25	15	6
F1 20-2000	328	156	216	88
2-20	480	181	118	42
0.2-2	910	370	44	13
0-0.2	980	385	30	14
(sols non fractionnés)	213	72	61	17

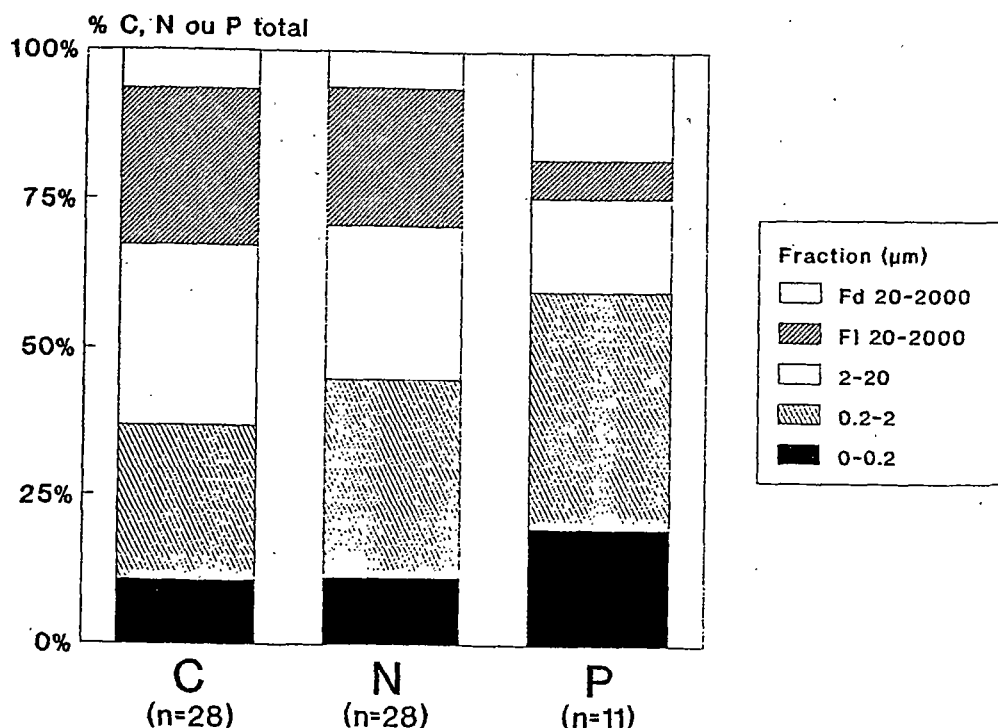


Figure 5. Répartition du carbone, de l'azote et du phosphore dans les fractions granulométriques de quelques sols d'Afrique de l'Ouest.

Figure 5. Distribution of carbon, nitrogen and phosphorus in the particle size fractions of some West African soils.

Si l'on excepte la fraction Fd 20-2000, on constate que:

- les teneurs en Pt ( $\text{mg P.kg}^{-1}$  fraction) augmentent quand la taille des fractions diminue ( $m = 328$  pour Fl 20-2000 et 980 pour 0-0.2  $\mu\text{m}$ );
- les rapports C/Pt diminuent fortement avec la taille des fractions (216 pour Fl 20-2000 et 30 pour 0-0.2 $\mu\text{m}$ ). Ce sens de variation rappelle celui des rapports C/N obtenus pour les mêmes échantillons (Feller et al., 1991a).

La fraction Fd 20-2000 correspond à une fraction très pauvre en MO. Le rapport C/Pt n'a donc guère de sens pour cette fraction mais ses teneurs en Pt, qui peuvent apparaître faibles ( $55 \text{ mg P.kg}^{-1}$  fraction), ne sont pas négligeables quand elles sont exprimées en valeurs relatives (% Pt sol) pour des échantillons à texture grossière.

La répartition relative moyenne (en % Pt. sol) du phosphore des fractions, calculée à partir des 11 échantillons cités ci-dessus, est présentée sur la figure 5: 60% de Pt sont retrouvés dans la fraction 0-2  $\mu\text{m}$ , 17% dans la fraction 2-20  $\mu\text{m}$ , 17% dans la fraction Fd 20-2000 et seulement 6% dans les débris végétaux Fl 20-2000. Cette répartition diffère sensiblement de celles observées pour le carbone et l'azote (figure 5).

## Discussion et conclusions

Les horizons de surface des sols d'Afrique de l'Ouest étudiés ici ont des teneurs en argile variant de 5 à 25% et des teneurs en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  variant de 1 à 6%. Ces variations sont tout à fait habituelles des sols développés sur grès et sur roches cristallines. C'est ainsi que Jones (1973) à partir d'une population de 605 échantillons provenant d'horizons de surface de sols de savane d'Afrique de l'Ouest indique une teneur moyenne en argile de 12% pour cette population. Les teneurs en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  étant fortement corrélées à celles en argile (ou en éléments fins 0-20  $\mu\text{m}$ ) toutes les caractéristiques des sols corrélées à l'une de ces variables seront corrélées à l'autre.

Nous discuterons successivement des résultats concernant le pouvoir fixateur puis de ceux concernant les teneurs en phosphore total.

**Pouvoir fixateur.** Le pouvoir fixateur des sols vis à vis des ions phosphate est faible pour les sols sableux (0-2  $\mu\text{m} < 12 \text{ g.100g}^{-1}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 3 \text{ g.100g}^{-1}$ ), moyen pour les sols sablo-argileux ( $12 \text{ g.100g}^{-1} < 0-2 \mu\text{m} < 20 \text{ g.100g}^{-1}$ ) et élevé pour les sols à teneurs en argile supérieures à  $20 \text{ g.100g}^{-1}$  et riches en fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 > 6 \text{ g.100g}^{-1}$ ). Ces observations sont en accord avec les résultats obtenus, soit sur modèles minéraux (Parfitt, 1989; Willett et al., 1988), soit sur des échantillons de sols (Juo et Fox, 1977; Roche et al., 1980, Parfitt et al., 1989; Salcedo et al., 1991). Ces variations qui s'observent à l'échelle régionale (comparaisons Sénégal, Côte d'Ivoire, Antilles par exemple) sont rencontrées aussi à l'échelle locale (exemple de la toposéquence de Côte d'Ivoire).

Il ressort des données statistiques que la MO n'exerce pas d'effet important sur le pouvoir fixateur des échantillons sableux à sablo-argileux. La mesure au laboratoire du pouvoir fixateur d'un échantillon sableux (TNR 101) traité à  $\text{H}_2\text{O}_2$  corrobore cette observation. En conséquence le mode de gestion de ces sols, qui peut conduire à des variations de 30 à 40% de leur

stock organique (Feller et al , 1991a), ne devrait pas modifier leur pouvoir fixateur *in situ*.

L'étude du pouvoir fixateur des fractions granulométriques d'un échantillon sableux (TNR 101) et d'un échantillon sablo-argileux (V1) montre le rôle prédominant des argiles (et en particulier des argiles grossières) dans le pouvoir fixateur des sols. Toutefois les limons fins, voire la fraction F1 20-2000 de l'échantillon V1 (tableau III), peuvent présenter des pouvoirs fixateurs non négligeables. En effet, quelle que soit la taille de l'échantillon considéré, échantillon (0-2 mm) ou diverses fractions granulométriques (cf équations [3] et [4]), le pouvoir fixateur est déterminé prioritairement par la teneur en fer total de l'échantillon (sol ou fraction). C'est ainsi que des fractions sableuses riches en fer (pseudo-sables, ou minéraux primaires en voie d'altération) pourront présenter des pouvoirs fixateurs élevés. C'est le cas, par exemple, de la fraction Fd 20-2000  $\mu\text{m}$  de l'échantillon MPR 51 dont le pouvoir fixateur ( $P_{\text{FIX}} = 8.3$ ) est beaucoup plus élevé que ceux des fractions correspondantes de TNR 101 et V1 ( $P_{\text{FIX}} = 1.1$ ) (Frossard et al. 1992). De même Tiessen et al. (1991) ont mis en évidence pour des horizons A de sols ferrallitiques du Ghana le rôle essentiel joué par les concrétions ferrugineuses de taille supérieure à 2 mm dans l'immobilisation du phosphore apporté par les engrais. Toutefois, au niveau des fractions argileuses un éventuel effet de la matière organique peut être discuté. En effet, le pouvoir fixateur des argiles fines et grossières de l'échantillon TNR 101 est fortement augmenté après destruction de la MO par  $\text{H}_2\text{O}_2$  ce qui n'est pas (ou peu) le cas pour la fraction limoneuse fine dont les teneurs sont aussi élevées (tableau III). Diverses explications peuvent être envisagées:

1°) L'action de  $\text{H}_2\text{O}_2$  sur les argiles peut conduire à la formation ou à la libération *in vitro*, de constituants amorphes à fort pouvoir fixateur. C'est ainsi que selon Schulze (1988) de la ferrihydrite pourrait précipiter après traitement  $\text{H}_2\text{O}_2$  dans des échantillons riches en complexes organo-ferriques. Les surfaces spécifiques des ferrihydrites étant d'autant plus faibles que les teneurs en MO associées sont élevées (Süsser et Schwertmann, 1983), on peut alors s'attendre à des augmentations de pouvoir fixateur pour des échantillons riches en ce minéral. De même, Sequi et Aringhieri (1977) signalent que l'augmentation des "surfaces électropositives" observées après traitement  $\text{H}_2\text{O}_2$  de divers échantillons de sols pourrait être due à la libération des métaux associés à la MO, et à leur dépôt sous forme d'hydroxydes. Une recherche méthodologique est donc à envisager pour préciser, dans nos conditions expérimentales, ces éventuels effets de  $\text{H}_2\text{O}_2$ .

2°) Il s'agit d'un réel effet de la MO qui pourrait être observable *in situ* indépendamment de l'action de  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Dans ces conditions l'augmentation du pouvoir fixateur observé après destruction de la MO s'explique essentiellement: (i) par l'apparition de surfaces minérales qui étaient masquées à la suite d'une microagrégation au sein des fractions organo-argileuses, et/ou (ii) par la libération de sites initialement occupés par la MO. A l'appui de la première hypothèse divers travaux ont mis en évidence l'effet de la MO sur les surfaces spécifiques des complexes organo-argileux (Dejou, 1989; Feller et al. 1992) ou organo-ferriques (Süsser et Schwertmann, 1983; Fontes et al., 1989). A l'appui de la deuxième hypothèse on sait que divers composés organiques comme les acides humiques, fulviques ou des acides de faibles poids moléculaires sont susceptibles d'entrer en compétition avec

les ions phosphate pour l'occupation des mêmes sites à la surface des oxydes (Frossard et al., 1986; Lopez Hernandez et al., 1986; Sibanda et Young, 1986; Amann et Amberger, 1988; Violante et al., 1991). Toutefois, pour les échantillons sableux et sablo-argileux, quelles que soient les hypothèses retenues, l'"effet  $H_2O_2$ " observé sur le pouvoir fixateur des fractions argileuses n'a que peu d'incidence sur le pouvoir fixateur de l'échantillon total. Il n'en serait probablement pas de même pour des échantillons argileux.

**Teneurs en phosphore total.** L'étude statistique menée sur les échantillons totaux (0-2 mm), montre que les teneurs en Pt des sols à texture grossière d'Afrique de l'Ouest, et à pouvoir fixateur faible à moyen, sont plus déterminés par leur teneur en MO que par celle en  $Fe_2O_3t$ . Par contre l'effet de la MO est moins net quand l'échantillonnage inclut les sols riches en  $Fe_2O_3t$  et fortement fixateurs des Antilles et du Brésil. Par ailleurs, la figure 5 met en évidence que 60% du Pt est associé aux fractions argileuses, au pouvoir fixateur élevé, alors que ces fractions ne stockent que 40% de la MO. A l'opposé les fractions F1 20-2000 et 2-20  $\mu m$  qui stockent plus de 50% de la MO du sol ne représentent que 20% du Pt. Les relations entre Pt, MO et pouvoir fixateur sont donc complexes. Divers travaux basés sur des études isotopiques, micromorphologiques ou biochimiques (sucres en particulier), conduisent à envisager une origine microbienne (débris ou métabolites) d'une partie non négligeable des MO associées aux argiles (Feller et al., 1991c). Le P organique de ces fractions qui représente généralement environ 50% du Pt (Tiessen et Stewart, 1983) est donc probablement aussi, pour une grande part, d'origine microbienne. D'ailleurs le rapport C/Pt des fractions argileuses, compris entre 30 et 40, est proche de celui des bactéries du sol (Paul et Clark, 1989) alors que le rapport C/Pt élevé des fractions F1 20-2000 est encore proche de celui des végétaux. Enfin, on sait (Anderson et al., 1978; Mc Kercher et Anderson, 1989; Shang et al., 1990) que le pouvoir fixateur des oxydes de fer et d'aluminium ne s'exerce pas seulement aux dépens des ions phosphate mais aussi de certaines molécules organophosphorées (comme l'inositol hexaphosphate) largement représentées dans les constituants végétaux et microbiens (Stewart et Tiessen, 1987). Les processus de décomposition microbiens et l'importance des surfaces réactives (oxydes) expliquent donc, ensemble, le stockage préférentiel de P dans les fractions argileuses.

Sur le plan agronomique, et en absence de fertilisation phosphatée, c'est à la fois la dynamique des matières organiques et le pouvoir fixateur du sol qui vont contrôler les variations de Pt. Or, dans ces horizons sableux à sablo-argileux d'Afrique de l'Ouest, les variations de teneurs en MO sous l'effet de différents modes de gestion des sols sont dues pour une grande part aux débris végétaux (fraction F1 20-2000) et à la fraction 2-20  $\mu m$ , mais relativement peu à la fraction argileuse. Le turn-over de la fraction F1 20-2000 étant rapide (Martin et al., 1990), celui du phosphore qui lui est associé le sera probablement aussi. C'est ainsi que Thibaud et al. (1988) ont montré, que le phosphore associé aux racines mortes d'une culture "précédente" était aussi facilement utilisé par la culture "suiivante" qu'un engrais P soluble dans l'eau. Malgré tout les quantités mises en jeu resteront faibles puisque, F1 20-2000 représente seulement de 6 à 8% de Pt du sol. A l'opposé, le même raisonnement conduirait à supposer une faible participation du phosphore de la fraction argileuse à la nutrition phosphatée de la plante, puisque le pouvoir fixateur des argiles est élevé et que la MO associée à cette fraction a un turn-over plus faible que celui des débris végétaux.

Toutefois les fractions 0-2  $\mu\text{m}$  contenant 10 fois plus (60%) de Pt que les fractions Fl 20-2000, un turn-over 10 fois plus faible du phosphore associé aux argiles permettra de mobiliser des quantités de P identiques dans les deux compartiments. Des travaux mettant en oeuvre des techniques de traçage au  $^{32}\text{P}$  sont encore nécessaires pour quantifier le coefficient réel d'utilisation par la plante, du P associé à chaque fraction granulométrique du sol.

### Remerciements

Ce travail a pu être présenté au séminaire SCOPE de Nairobi grâce à une subvention du Ministère français de l'Environnement, que nous remercions vivement.

Nous remercions aussi vivement MM C. Cerri (CENA/USP), E. Fritsch, R. Poss et C. Valentin (ORSTOM) pour le prêt de divers échantillons étudiés dans ce travail ainsi que Mr A.J. Herbillon (CPB-CNRS) pour ses conseils dans la rédaction de ce travail.

Note: Lors de la réunion, quelques résultats concernant les activités phosphatases des sols d'Afrique de l'Ouest ont été présentés. Ils ne sont pas repris dans ce compte-rendu.

### References

- Acquaye, D.K. 1963. Some significance of soil organic phosphorus mineralization in the phosphorus nutrition of cocoa in Ghana. *Plant and Soil*, 19: 65-80.
- Adepetu, J.A. et Corey, R.B. 1976. Organic phosphorus as a predictor of plant available phosphorus in soils of southern Nigeria. *Soil Science*: 159-164.
- Amann, C. et Amberger, A. 1988. Verringerung der Phosphatsorption durch Zusatz organischer Verbindungen zu Böden in Abhängigkeit vom pH-Wert. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.*, 151: 41-46.
- Anderson, G., Williams, E.G. et Moir, J.O.. 1978. A comparison of the sorption of inorganic orthophosphate and inositol hexaphosphate by six acid soils. *J. Soil Sci.*, 25: 51-62.
- Appiah, M.R. et Thomas, R.L. 1982. Inositol phosphate and organic phosphorus contents and phosphatase activity of some canadian and ghanaiian soils. *Can. J. Soil Sci.*, 62: 31-38.
- Boulet, R., Fauck, R., Kaloga, B., Leprun, J.C., Riquier, J. et Vieillefon, J. 1971. Pédologie (planche). In "Atlas International de l'Ouest Africain", O.U.A. (ed).
- Cerri, C.C., Feller, C., et Chauvel, A. 1991. Evolução das principais propriedades de um Latossolo Vermelho Escuro após desmatamento e cultivo por 12 e 50 anos com cana-de-açúcar. *Cah. ORSTOM, série Pédol*, sous presse.



- Chang, S.C. et Jackson, M.L. 1957. Fractionation of soil phosphorus. *Soil Sci.*, 84: 133-134.
- Chauvel, A. 1977. Recherches sur la transformation des sols ferrallitiques dans la zone tropicale à saisons contrastées. T.D. ORSTOM, n°62, 532p.
- Chevignard T., Fardeau J.C., Doubeau Piasco S., Feller C., Turenne, J.F. et Vallerie M. 1986. Effets du remodelage parcellaire sur la fixation des phosphates en divers types de sols des Antilles. *Agronomie*, 6: 149-156.
- Condron, L.M., Moir, J.O., Tiessen, H. et Stewart, J.W.B. 1990. Critical evaluation of methods for determining total organic phosphorus in tropical soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54: 1261-1266.
- Dabin, B. 1971. Evolution des engrais phosphatés dans un sol ferrallitique dans un essai de longue durée. *Phosphore et Agriculture*, 58: 1-9.
- Dejou, J. 1989. La surface spécifique des argiles, sa mesure, relation avec la CEC et son importance en agronomie. In: C.R. Coll. AFES "CEC et fertilisation des sols agricoles", Caen, nov 1978, 72-83.
- Fardeau, J.C. 1981. Cinétiques de dilution isotopique et phosphore assimilable des sols. Thèse Doct. Etat, Paris VI, 198 pages.
- Fauck, R. 1972. Les sols rouges sur sables et sur grès d'Afrique Occidentale. *Mém. ORSTOM*, n°61, ORSTOM, Paris, 257p.
- 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.*, 17: 339-346.
- Feller, C. et Milleville, P. 1977. Evolution des sols de défriche récente dans la région des Terres Neuves (Sénégal oriental). 1. Présentation de l'étude. *Cah. ORSTOM, sér. Biol.*, 12: 199-211.
- Feller, C., Fritsch, E., Poss, R. et Valentin, C. 1991a. Effet de la texture sur le stockage et la dynamique des matières organiques dans quelques sols ferrugineux et ferrallitiques (Afrique de l'Ouest en particulier). *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 26: sous presse.
- Feller, C., Burtin, G., Gérard, B. et Balesdent, J. 1991b. Utilisation des résines sodiques et des ultrasons dans le fractionnement granulométrique de la matière organique des sols. Intérêts et limites. *Science du Sol*, 29, 2: 77-94.
- Feller, C., François, C., Villemin, G., Portal, J.M., Toutain, F. et Morel, J.L. 1991c. Nature des matières organiques associées aux fractions argileuses d'un sol ferrallitique. *C.R. Acad. Sc. Paris, Série II*, 312: 1491-1497.
- Feller, C., Brossard, M. et Frossard, E. 1991d. Characterization and dynamics of organic matter in some low activity clay soils with an emphasis on

- West Africa. In "P cycles in terrestrial and aquatic ecosystems", Tiessen H. and Frossard E. (eds), SCOPE, Nairobi, Kenya, March 1991.
- Feller, C., Shouller, E., Thomas, F., Rouiller, J. et Herbillon, A.J. 1992. N<sub>2</sub>-BET specific surface areas of some low activity clay soils and their relationships with secondary constituents and organic matter contents. Soil Science, sous presse.
- Fontes, M.R., Weed, S.B., et Bowen, L.H. 1989. Association of goethite and humic acid in some brazilian oxisols. In "Agronomy abstracts. Proc. of the 1989 Annual meetings of ASA, CSSA and SSSA", Las Vegas, p199., Am Soc. Agron. (ed) 388p.
- Friend, M.T. et Birch, H.F. 1960. Phosphate responses in relation to soil tests and organic phosphorus. J. Agric. Sci., 54: 341-347.
- Frossard, E., Brossard, M., Feller, C. et Rouiller, J. 1992. Pouvoir fixateur vis-à-vis des ions phosphate de sols tropicaux à argile 1:1. Can. J. Soil Sci. (sous presse)
- Frossard, E., Truong, B. et Jacquin, F. 1986. Influence de l'apport de composés organiques sur l'adsorption et la désorption des ions phosphates en sol ferrallitique. Agronomie, 6: 503-508.
- Gigou, J. 1987. L'importance de la carence en phosphore pour les cultures annuelles en Côte d'Ivoire. Agron. Trop., 42: 20-28.
- Holford, I.C.R., Wedderburn, R.W.M. et Mattingly, G.E.G. 1974. A Langmuir two surface equation as a model for phosphate adsorption by soils. J. of Soil Sci., 25: 242-255.
- HYPERBAV, 1990. Structure et fonctionnement hydro-pédologique d'un petit bassin versant de savane humide. Coll. Etudes et Thèses, ORSTOM, 307p.
- Jeanroy, E. 1974. Analyse totale par spectrométrie d'absorption atomique des roches, sols, minerais, ciments après fusion au métaborate de strontium. Analisis, 2: 703-712.
- Jones, M.J. 1973. The organic matter content of the savanna soils of West Africa. J. of Soil Sci., 24: 42-53.
- Juo, A.S.R. et Fox, R.L. 1977. Phosphate sorption characteristics of some bench-mark soils of West Africa. Soil Sci., 124: 370-376.
- Lopez Hernandez, D. 1989. Phosphorus dynamics in a flooded savanna. In: H. Tiessen, D. Lopez Hernandez et I. Salcedo (Eds) Phosphorus cycles in terrestrial and aquatic ecosystems, regional workshop 3: South and Central America. SCOPE UNEP, Saskatchewan Institute of Pedology, University of Saskatchewan, Canada. pp 95-105.
- Lopez Hernandez, D., Siegert, G. et Rodriguez, J.V. 1986. Competitive adsorption of phosphate with malate and oxalate by tropical soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 50: 1460-1462.

- Martin, A., Mariotti, A., Balesdent, J., Lavelle, P. et Vuattoux, R. 1990. Estimate of organic matter turnover rate in a savanna soil by  $^{13}\text{C}$  natural abundance measurements. *Soil Biol. Biochem.*, 22: 517-523.
- Mc Kercher, R. B. et Anderson, G. 1989. Organic phosphate sorption by neutral and basic soils. *Commun. in Soil Sci. Plant Anal.*, 20 : 723-732.
- Murphy, J. et Riley, J.P. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chem. Acta*, 27: 31-36.
- Omotoso, T.I. 1971. Organic phosphorus contents of some cocoa growing soils of southern Nigeria. *Soil Science*, 112: 195-199.
- Parfitt, R.L. 1989. Phosphate reactions with natural allophane, ferrihydrite and goethite. *J. Soil Sci.*, 40: 359-369.
- Parfitt, R.L., Hume L.J., et Sparling, G.P. 1989. Loss of availability of phosphate in New Zealand soils. *J. Soil Sci.*, 40: 371-382.
- Paul, E.A. et Clark, F.E. 1989. *Soil microbiology and biochemistry*. Academic press, 273p.
- Pichot, J., Truong, B. et Burdin, S. 1973. Evolution du phosphore dans un sol ferrallitique soumis à différents traitements agronomiques. *Agron. Trop.*, 31: 375-378.
- Poss, R., Forget, A. et Saragoni, H. 1984. Quelques propriétés physiques et hydrodynamiques des Terres de Barre: étude des sols de la station agronomique de Davié. IDT, ORSTOM, Lomé.
- Roche, P., Grière, L., Babre, D., Calba, H. et Fallavier, P. 1980. Le phosphore dans les sols intertropicaux: appréciation des niveaux de carences et des besoins en phosphore. IMPHOS, publication scientifique n°2, 48 pages.
- Salcedo, I.H., Bertino, F. et Sampaio, E.V.S.B. 1991. Reactivity of phosphorus in northeastern brazilian soils assessed by isotopic dilution. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55: 140-145.
- Sanchez, P., Palm, C.A. et Smyth, T.J. 1989. Phosphorus dynamics in shifting cultivation systems in the Amazon. In: H. Tiessen, D.Lopez-Hernandez et I.H. Salcedo (Eds) *Phosphorus cycles in terrestrial and aquatic ecosystems, regional workshop 3: South and Central America*. SCOPE UNEP, Saskatchewan Institute of Pedology, University of Saskatchewan, Canada. pp 142-160.
- Schulze, D.G. 1988. Separation and concentration of iron containing phases. In "Iron in soils and clay minerals", J.W. Stucki, B.A. Goodman et U. Schwertmann (Eds), Chap 4, p 110, NATO publ., Sér C, vol2/7, 893p.
- Sequi, P. et Aringhieri, P. 1977. Destruction of organic matter by hydrogen peroxide in the presence of pyrophosphate and its effect on soil specific surface area. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41: 340-342.

- Shang, C., Huang, P.M. et Stewart, J.W.B. 1990. Kinetics of adsorption of organic and inorganic phosphates by short-range ordered precipitate of aluminium. *Can. J. Soil Sci.*, 70: 461-470.
- Sibanda, H.M. et Young, S.D. 1986. Competitive adsorption of humus acids and phosphate on goethite, gibbsite and two tropical soils. *J. Soil Sci.*, 37: 197-204.
- Stewart, J.W.B. et Tiessen, H. 1987. Dynamics of soil organic phosphorus. *Biogeochemistry*, 4: 41-60.
- Süsser, P. et Schwertmann, U. 1983. Iron oxide mineralogy of ochreous deposits in drain pipes and ditches. *Z. Kulturtechnik Flurbereinigung*. 24: 386-395.
- Thibaud, M.C., Morel, C et Fardeau, J.C. 1988. Contribution of phosphorus issued from crop residues to plant nutrition . *Soil Sci. Plant Nutr.*, 34: 481-491.
- Tiessen, H. et 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., Frossard, E, Mermut, A.R. et Nyamekye, A.L. 1991. Phosphorus sorption and properties of ferruginous nodules from semiarid soils from Ghana and Brazil. *Geoderma*, 48: 373-389.
- Violante, A., Colombo, C. et Buondonno, A. 1991. Competitive adsorption of phosphate and oxalate by aluminium oxides. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55: 65-70.
- White, R.E. et Beckett, P.H.T. 1964. Studies on the phosphate potentials of soils. Part 1: The measurement of phosphate potential. *Plant and Soil*, 20: 1-16.
- Willett, I.R., Chartres, C.J. et Nguyen, T.T. 1988. Migration of phosphate into aggregated particles of ferrihydrite. *J. Soil Sci.*, 89: 275-282.



**SCOPE**

**UNEP**



MB

# **PHOSPHORUS CYCLES IN TERRESTRIAL AND AQUATIC ECOSYSTEMS**

**REGIONAL WORKSHOP 4:  
AFRICA**

**Proceedings of a workshop arranged by the  
Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE)  
and the United Nations Environmental Programme (UNEP)  
at UNEP, Nairobi, Kenya  
March 18-22, 1991**

**Edited by  
Holm Tiessen and Emmanuel Frossard**

