

# Effets des modes de gestion de la fertilité sur la solubilisation des phosphates naturels dans un lixisol en zone nord soudanienne du Burkina Faso

---

François LOMPO<sup>1</sup>, Moussa BONZI<sup>1</sup>, Boubié Vincent BADO<sup>2</sup>,  
Zacharia GNANKAMBARY<sup>1</sup>, Noufou OUANDAOGO<sup>1</sup>,  
Michel Papaoba SEDOGO<sup>1</sup>, Albert YAO-KOUAME<sup>3</sup>

## Résumé

La carence quasi générale des sols tropicaux en phosphore (P) a conduit à de nombreuses propositions de solutions dont l'une des plus courantes est l'application de phosphates naturels (PN) très répandus sur le continent africain. Cette étude s'est intéressée à la dynamique du phosphore assimilable des PN et du phosphate supertriple (TSP) au cours d'une incubation de sols soumis à différents modes de gestion pendant 40 ans. Les évolutions du  $\text{pH}_{\text{eau}}$  et  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  ont été suivies. Les fractions du phosphore avant et après incubation ont été déterminées. La solubilisation des PN qui a augmenté avec le temps d'incubation, est plus importante dans les sols ayant reçu les fertilisations minérales. Sur ces mêmes parcelles, les phosphates naturels ont provoqué des accroissements de pH d'autant plus élevés que les doses apportées sont plus importantes. PN et TSP ont accru respectivement les fractions P-Ca et P-Al. Les résultats de l'étude montrent que le comportement des sols vis-à-vis des sources de phosphore dépend de nombreux facteurs tels que leurs caractéristiques minéralogiques, leur surface spécifique et leur pH au point de charge nulle ( $\text{pH}_0$ ) qui sont mal connus au Burkina Faso et qui devront faire l'objet de recherches pour mieux préciser les conditions de recapitalisation des sols avec les phosphates naturels.

**Mots clés** : Incubation, phosphates naturels, solubilisation, fractions P, pH.

## Influence of soil fertility management options on rock phosphate solubilisation in a lixisol from north sudanian zone of Burkina Faso

### Abstract

The general phosphorus (P) deficiency in tropical soils led to the proposition of numerous solutions including rock phosphates (RP) application. This study focused on dynamics of available phosphorus of RP and TSP during the incubation of soils that were submitted to different soil fertility management techniques for 40 years. The  $\text{pH}_{\text{water}}$  and  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  were measured. The phosphorus fractions were analysed before and after incubation. The RP dissolution which increased with incubation time is more significant on soils that received mineral fertilizers. On the same soils, increased application of RP caused increase of pH. RP and TSP increased P-Ca and P-Al fractions respectively. The results of the study indicated that

---

<sup>1</sup>. Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles (INERA) 04 BP 8645, Ouagadougou 04 Burkina Faso.

<sup>2</sup>. Association pour le Développement de la Riziculture en Afrique de l'Ouest (ADRAO), BP 96 Saint Louis, Sénégal.

<sup>3</sup>. Unité de Formation et de Recherches en Sciences de la Terre et des Ressources Minières Université de Cocody, 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire.

the behaviour of the soils with respect to the phosphorus sources depends on many factors such as soils mineralogical characteristics, their specific area and their pH at the point of zero charge (pH<sub>o</sub>), all of which are not well documented in Burkina Faso. Future research will focus on these factors with the objective to better define the recapitalization conditions of soils with rock phosphates.

**Keywords:** Incubation, rock phosphate, dissolution, P fractions, pH.

## Introduction

Les sols tropicaux sont caractérisés par leur carence en phosphore (TRUONG et PICHOT 1977, BATIONO et MOKWUNYE, 1991). Cette carence trouve ses origines d'une part dans la nature du substratum géologique et son évolution pour la formation du sol et d'autre part dans la faible teneur en matière organique et l'épuisement du sol. Dans les conditions climatiques tropicales caractérisées par des températures élevées et une alternance humectation/dessiccation, la minéralisation rapide de la matière organique du sol dont les teneurs sont déjà faibles conduit à terme à la rétrogradation du phosphore apporté par les engrais. Le phosphore (P) organique qui représente 20 à 60 % du P total du sol est lié à la teneur et au degré d'évolution de la matière organique du sol (BATIONO, 1998).

Pour corriger cette carence, de nombreux travaux de recherche ont été conduits et ont abouti à des propositions de formules de fumure en fonction des cultures et des types de sols. Ainsi au Burkina Faso DUPONT et DUMONT (1967) ont trouvé qu'un apport de 25 à 50 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> permettait d'obtenir des rendements économiquement rentables pour les exploitations à faibles revenus.

Cependant les crises énergiques et alimentaires successives ont amené les chercheurs à s'orienter vers l'utilisation des phosphates naturels dont d'importants gisements sont disponibles en Afrique de l'Ouest (JOHNSON, 1994). C'est ainsi que BIKIENGA et SEDOGO (1981), BATIONO et MOKKWUNYE (1991), LOMPO, (1993), LOMPO *et al.* (1994), HIEN *et al.* (1997), KPOMBLEKOU and TABATAKI (2003) ; BADO *et al.* (2004), BONZI *et al.* (2006) ont conduit des travaux de recherche, des évaluations économiques et des études d'adoption sur ces phosphates locaux. Ces travaux ont beaucoup contribué au lancement en 1996 de l'Initiative de la Fertilité des sols lors du Sommet Mondial de l'Alimentation organisé sous l'égide de la Banque Mondiale et de la FAO. Cette initiative a permis à certains pays d'élaborer des stratégies et programmes nationaux de gestion intégrée de la fertilité des sols dont la recapitalisation des terres par l'utilisation à grande échelle des phosphates naturels a été une composante principale. Cette réhabilitation des terres agricoles, fondée sur une seule application à forte dose de phosphates naturels, part du constat que ces phosphates naturels deviennent plus solubles et donc plus efficaces avec le temps de leur contact avec les sols ; ce qui permet aux producteurs de réduire progressivement les investissements qu'ils font ou feront pour s'approvisionner en sources de P solubles (MOKWUNYE, 1996).

Cependant, dans les pays où cette initiative a été mise en œuvre, le niveau de fertilité initial des sols n'a pas été pris en compte lors de l'application de fortes doses de phosphates naturels (PN). C'est la raison pour laquelle, partant d'un référentiel de suivi à long terme de la fertilité des sols en place depuis plus d'une quarantaine d'années sur la Station de recherches agronomiques de Saria, située dans la zone nord soudanienne du Burkina Faso, la présente étude a été conduite. L'objectif principal était d'évaluer la solubilisation des phosphates naturels du Burkina en fonction des modes de gestion de la fertilité des sols. Les résultats obtenus visent à mieux orienter les décideurs dans la mise en œuvre des programmes de recapitalisation des terres.

## Matériel et méthodes

### Matériel

Les sols, objet de l'étude, ont été prélevés en 2000 sur l'Essai Entretien de la Fertilité installé sur un Lixisol (IUSS *et al.*, 2006) de la Station de recherches Agricoles de Saria, située dans la zone nord-soudanienne du Burkina Faso (FONTES et GUINKO, 1995), à 300 m d'altitude, 12° 16'N, 2°9' O. Saria est caractérisé par une pluviométrie irrégulière aussi bien dans l'espace que dans le temps (entre mai et octobre). La moyenne annuelle pluviométrique des 30 dernières années avoisine 800 mm. Le dispositif de cet essai, mis en place en 1960, est un Split plot comprenant les six traitements suivants :

- T<sub>1</sub> (Témoin absolu) : sans apport de fumure
- T<sub>2</sub> ; fmr (fumure minérale faible + résidus de sorgho) : Apport de 100 kg NPK ha<sup>-1</sup> + 50 kg urée ha<sup>-1</sup> + restitution des pailles de sorgho.
- T<sub>3</sub> ; fmo (fumure organo-minérale faible) : Apport de 100 kg NPK ha<sup>-1</sup> + 50 kg urée ha<sup>-1</sup> + 5 tonnes de fumier ha<sup>-1</sup> an<sup>-2</sup>
- T<sub>4</sub> ; fm (fumure minérale faible) : Apport de 100 kg NPK ha<sup>-1</sup> + 50 kg urée ha<sup>-1</sup>
- T<sub>5</sub> ; FMO (fumure organo-minérale forte) : Apport de 150 kg NPK ha<sup>-1</sup> + 100 kg urée ha<sup>-1</sup> + 50 kg KCl ha<sup>-1</sup> + 40 tonnes de fumier ha<sup>-1</sup> an<sup>-2</sup>
- T<sub>6</sub> ; FM (fumure minérale forte) : Apport de 150 kg NPK ha<sup>-1</sup> + 100 kg urée ha<sup>-1</sup> + 50 kg KCl ha<sup>-1</sup>

Les traitements sont répétés six fois.

Dans la présente étude, les sols utilisés proviennent d'échantillons composites qui ont été obtenus à partir de 5 points de prélèvement dans l'horizon 0-25 cm. Ces prélèvements ont été effectués en saison sèche au mois de mars 2000 sur les parcelles en culture continue de sorgho ayant reçu pendant 40 ans les traitements suivants : T<sub>1</sub>, fmo, fm et FM. Les échantillons ont été séchés à l'air libre et tamisés à 2 mm avant les analyses.

Les principales caractéristiques physico-chimiques de ces sols susceptibles d'influencer leur comportement vis-à-vis des phosphates sont données dans le tableau I. Les teneurs en argile sont plus élevées sur les parcelles ayant reçu les fertilisations minérales (fm et FM). Elles sont les plus faibles sur les parcelles avec fertilisation organo-minérale faible (fmo) et sur le témoin absolu (T<sub>1</sub>). Les teneurs en matières organiques sont plus importantes sur la parcelle fmo et plus faibles sur FM et T<sub>1</sub>. Les teneurs en calcium (Ca<sup>2+</sup>) et magnésium en (Mg<sup>2+</sup>) sont plus élevées sur T<sub>1</sub> et fmo que sur les parcelles ayant reçu les fertilisations exclusivement minérales. Il en est de même pour la somme des bases échangeables et la capacité d'échange cationique (CEC). Le pH eau très acide sur les parcelles FM. Il est par contre acide à faiblement acide sur fm et fmo et T<sub>1</sub> respectivement. Les teneurs en aluminium échangeable (Al<sup>3+</sup>) et en protons (H<sup>+</sup>) sont par contre les plus faibles sur les parcelles T<sub>1</sub> et fmo. Les teneurs en P total et en P assimilables sont plus importantes sur les parcelles fertilisées, en particulier sur fmo.

Les phosphates naturels de Kodjari (Burkina Faso) dont la composition moyenne figure sur le tableau II et le phosphate super triple (TSP ; 46 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) sont les deux sources de phosphore utilisées.

**Tableau I.** Effet de la fumure sur les principales caractéristiques physico-chimiques du lixisol après 40 années de culture continue de sorgho.

Traitements	Argile g kg <sup>-1</sup>	MO g kg <sup>-1</sup>	Complexe absorbant (par le Cobalxyhexamine) en cmol kg <sup>-1</sup>						Phosphore (mg kg <sup>-1</sup> )					
			pH	H <sub>2</sub> O	KCl	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Al <sup>3+</sup>	Mn <sup>2+</sup>	H <sup>+</sup>	S	CEC	P total
T1 : Témoin absolu	127b	4,15 <sup>a</sup>	6,60 <sup>c</sup>	4,90 <sup>c</sup>	2,10 <sup>d</sup>	0,31 <sup>b</sup>	0,10 <sup>a</sup>	0,00 <sup>a</sup>	0,04 <sup>a</sup>	0,00 <sup>a</sup>	2,53 <sup>b</sup>	2,47 <sup>d</sup>	100,30 <sup>a</sup>	3,31 <sup>a</sup>
fm : Fumure minérale faible (T4)	165 <sup>c</sup>	4,33 <sup>a</sup>	5,30 <sup>b</sup>	4,10 <sup>b</sup>	1,43 <sup>b</sup>	0,20 <sup>a</sup>	0,09 <sup>a</sup>	0,04 <sup>b</sup>	0,04 <sup>a</sup>	0,03 <sup>c</sup>	1,73 <sup>a</sup>	1,86 <sup>b</sup>	159,90 <sup>c</sup>	16,81 <sup>b</sup>
fmo : Fumure organo-minérale faible (T3)	106 <sup>a</sup>	5,19 <sup>b</sup>	5,30 <sup>b</sup>	4,40 <sup>b</sup>	1,61 <sup>c</sup>	0,31 <sup>b</sup>	0,11 <sup>a</sup>	0,00 <sup>a</sup>	0,04 <sup>a</sup>	0,01 <sup>b</sup>	2,03 <sup>a</sup>	2,11 <sup>c</sup>	168,90 <sup>c</sup>	19,66 <sup>c</sup>
FM : Fumure minérale forte (T6)	139 <sup>b</sup>	4,15 <sup>a</sup>	4,70 <sup>a</sup>	3,50 <sup>a</sup>	1,14 <sup>a</sup>	0,17 <sup>a</sup>	0,13 <sup>a</sup>	0,04 <sup>b</sup>	0,04 <sup>a</sup>	0,03 <sup>c</sup>	1,46 <sup>a</sup>	1,57 <sup>a</sup>	135,20 <sup>b</sup>	14,39 <sup>b</sup>

MO : Matière organique

S : Somme des bases échangeables

Les valeurs affectées d'une même lettre dans une même colonne ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %.

**Tableau II.** Caractéristiques chimiques moyennes des phosphates naturels de Kodjari.

Eléments															
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	F	CO <sub>2</sub>	Apatite	Quartz	Cd	As	Cu	Zn	Co
g kg <sup>-1</sup>															
Teneurs	237,7	42,3	29,8	1,8	343,9	275,9	0,6	26,4	19,4	620,0	200,0	2,8	8,4	10,0	12,0
mg kg <sup>-1</sup>															
Teneurs	237,7	42,3	29,8	1,8	343,9	275,9	0,6	26,4	19,4	620,0	200,0	2,8	8,4	10,0	12,0

Source : D'après BIZIMUNGU *et al.* (2001).

Les phosphates naturels de Kodjari sont caractérisés par (i) leur nature apatitique (ii) leurs fortes teneurs en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et (iii) leur faible solubilité dans l'eau (0,03 % du P total est soluble dans l'eau).

## Méthodes

### L'incubation

Les phosphates naturels et le phosphate supertriple, broyés à 2 mm, ont été intimement mélangés à 150 g de sol tamisé (également à 2 mm). Ces deux sources de phosphore ont été apportées aux doses de 0, 50, et 100 mg P  $\text{kg}^{-1}$  de sol. Le mélange est humidifié aux 2/3 de la Capacité Maximale de Rétenion en eau avec 21,75 ml d'eau déminéralisée et mis dans des pots, puis recouverts de parafilm. La durée de l'incubation a été de 300 jours.

### Les analyses de sols

Des prélèvements de sol ont été effectués 1 ; 30 ; 60 ; 150 et 300 jours après le début de l'incubation pour le dosage du phosphore assimilable et la mesure du pH. Il a été procédé au fractionnement du phosphore sur les échantillons de sols avant l'incubation et sur les prélèvements effectués à la fin de l'incubation.

La granulométrie 5 fractions a été déterminée par la méthode internationale « A » (Norme AFNOR X 31-107, 1999a) sur les échantillons de sol avant leur incubation.

Le  $\text{pH}_{\text{eau}}$  et  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  ont été mesurés sur une suspension aqueuse et de KCl 1M respectivement, par la méthode électrométrique, au pH mètre à électrode de verre. Le rapport sol / solution a été de 1/2,5 (Normes AFNOR ISO 103 90, 1999b).

La matière organique a été obtenue en multipliant le C organique par 1,73. Le carbone organique est déterminé par combustion à l'aide d'un analyseur automatique LECO CHN-600 selon les normes AFNOR NF ISO 106 96 (1996).

Les bases échangeables et la CEC sont analysées par la méthode au chlorure de cobalt-hexamine selon la méthode de ORSINI et REMY (1976) modifiée par FALLAVIER *et al.* (1985).

Le phosphore total extrait par attaque avec de l'acide perchlorique à chaud de 1 g de sol broyé a été dosé par colorimétrie en présence de vanado-molybdate. La lecture de l'extinction est faite à 430 nm.

Le phosphore assimilable a été déterminé par la méthode BRAY I (BRAY and KURTZ, 1945) qui utilise le fluorure d'ammonium 0,03 N et l'acide chlorhydrique 0,025 M comme solution d'extraction qui permet d'extraire le phosphore acido-soluble et une bonne partie du phosphore lié au calcium et du phosphore lié à l'aluminium et au fer. Le dosage se fait par colorimétrie en utilisant l'acide ascorbique qui réduit le complexe phosphomolybdique.

La méthode CHANG et JACKSON (1957) a été utilisée pour fractionner le phosphore des sols après 300 jours d'incubation. Elle est fondée sur l'extraction sélective des formes solubles et des formes d'inclusion double. Les quatre fractions suivantes ont été successivement extraites :

- (i) les formes de phosphore soluble, par le chlorure d'ammonium 1 N ;
- (ii) le phosphore lié à l'aluminium, par le fluorure d'ammonium 0,5 N à pH 8,5 ;

- (iii) le phosphore lié au fer par la soude 0,1 N ;
- (iv) le phosphore lié au calcium par l'acide sulfurique 0,5 N ;

### Le calcul du coefficient de solubilisation apparent (Kap)

Le coefficient de solubilisation apparent des phosphates naturels au cours de l'incubation a été calculé à partir de la formule suivante :

$$Kap = \frac{Pass_{PN} - Pass_T}{Paj} \times 100$$

Pass PN = Phosphore assimilable du sol incubé avec les phosphates naturels (en mg P kg<sup>-1</sup>)

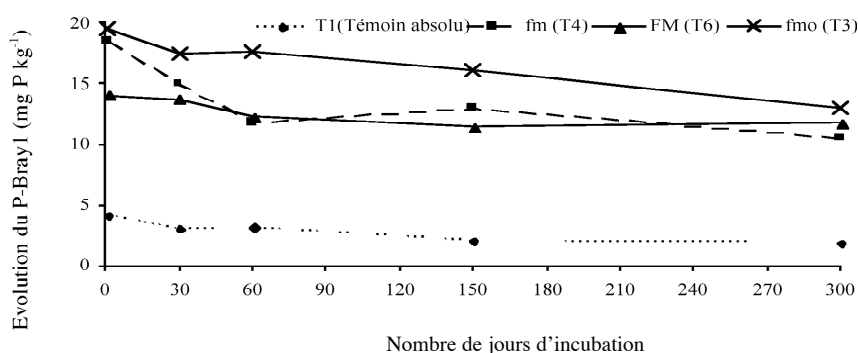
Pass T = Phosphore assimilable du sol incubé sans phosphates naturels (en mg P kg<sup>-1</sup>)

Paj = phosphore ajouté à partir des phosphates naturels en mg P kg<sup>-1</sup>.

## Résultats

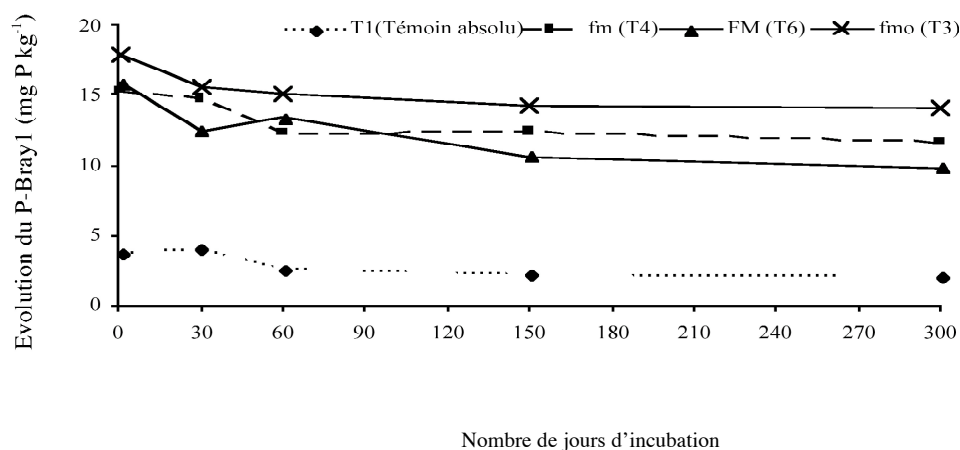
### Dynamique du phosphore assimilable au cours de l'incubation

En absence de tout apport extérieur de phosphore on observe une différence de comportement du Lixisol selon le mode de gestion (figure 1). Deux groupes très nets se distinguent. Le premier groupe constitué par le témoin absolu (T1) est caractérisé par des quantités de P assimilables plus faibles (en moyenne 2,85 mg P kg<sup>-1</sup>) au cours de l'incubation. Le second groupe est composé par les parcelles ayant reçu pendant 40 ans une fertilisation minérale faible (T4) ou forte (T6) et la fertilisation organo-minérale faible (fmo). Les quantités de P assimilable dosé pendant l'incubation sont en moyenne plus élevées (12,6 mg P kg<sup>-1</sup> pour FM, 13,71 mg P kg<sup>-1</sup> pour fm et 16,74 mg P kg<sup>-1</sup> pour fmo) que celles obtenues avec le témoin absolu. Pour tous les types de gestion de la fertilité testés on observe une baisse progressive des teneurs en P assimilable au cours de l'incubation. Cette baisse est atténuée par l'apport du fumier.



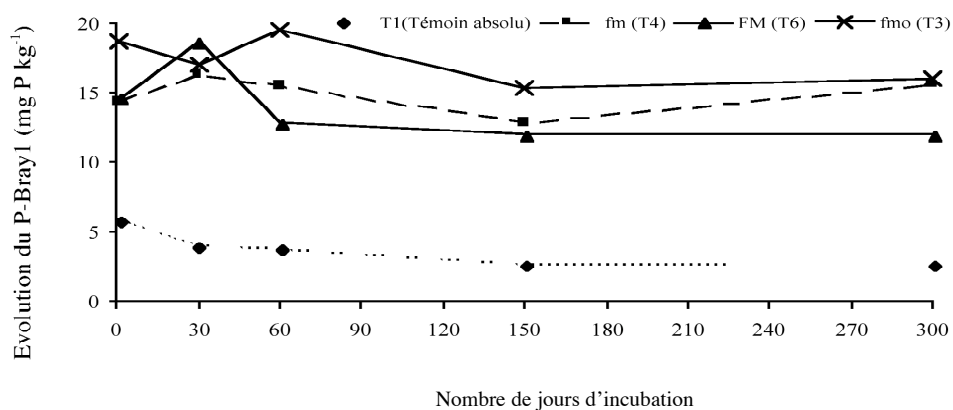
**Figure 1.** Effets de 40 ans de fertilisations minérales sur l'évolution du phosphore assimilable d'un lixisol en culture continue de sorgho soumis à une incubation de 300 jours sans apport de phosphore.

Les apports de phosphore ont des influences plus ou moins marquées selon les sources et les doses de P apportées. Avec l'apport de phosphates naturels de Kodjari, les quantités de P assimilable obtenues au cours de l'incubation sont légèrement plus faibles avec la dose de 50 mg kg<sup>-1</sup> (figure 2) qu'avec celle de 100 mg kg<sup>-1</sup> (figure 3), quel que soit le mode de gestion. Les baisses de P assimilable au cours de l'incubation sont atténuées surtout avec la forte dose de PN. Les plus fortes teneurs sont obtenues sur les parcelles fmo avec la plus forte dose de PN. L'apport de phosphore soluble à partir du TSP a une plus forte influence sur les quantités de P assimilable qui sont nettement plus élevées que celles obtenues avec les phosphates naturels. Les courbes d'évolution du P assimilable sont également caractérisées par une baisse du P assimilable au cours de l'incubation (figures 4 et 5). La baisse la plus importante est observée sur le témoin absolu à la dose de 50 mg P kg<sup>-1</sup>, toujours selon les figures 4 et 5. Les quantités de P assimilable mesurées au cours de l'incubation croissent avec les doses de TSP, quel que soit le type de fertilisation. La fertilisation organo-minérale faible est le mode de gestion qui permet d'obtenir les plus fortes teneurs de P assimilables.

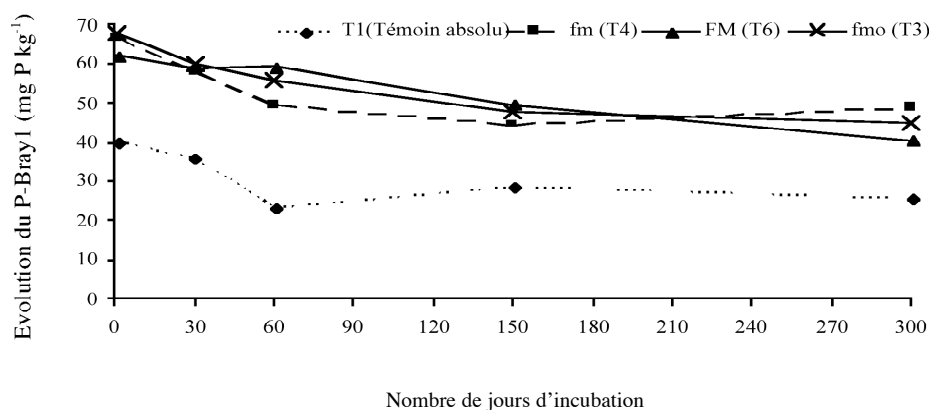


**Figure 2.** Evolution du phosphore assimilable d'un lixisol en culture continue de sorgho, soumis à des fertilisations pendant 40 ans et incubé durant 300 jours en présence de phosphates naturels apportés à la dose de 50 mg P kg<sup>-1</sup>.

Ces différentes tendances d'évolution du P assimilable sont confirmées par l'évolution du coefficient apparent de solubilisation ou de dissolution ( $K_{ap}$ ) des phosphates naturels (tableau III). Les valeurs moyennes de  $K_{ap}$  sont de + 0,1 % ; - 0,98 % et - 0,44 % respectivement pour T<sub>1</sub>, T<sub>4</sub> (fm) et T<sub>6</sub> (FM). Ces valeurs sont en fait la résultante de processus de solubilisation et de fixation voire de rétrogradation du phosphore solubilisé. En présence de fmo, les coefficients apparents de solubilisation des phosphates naturels sont, en valeur absolue, plus élevée que ceux obtenus avec fm. Cette solubilisation plus importante conduit également à une adsorption plus importante des produits solubilisés (les ions H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup> en particulier).



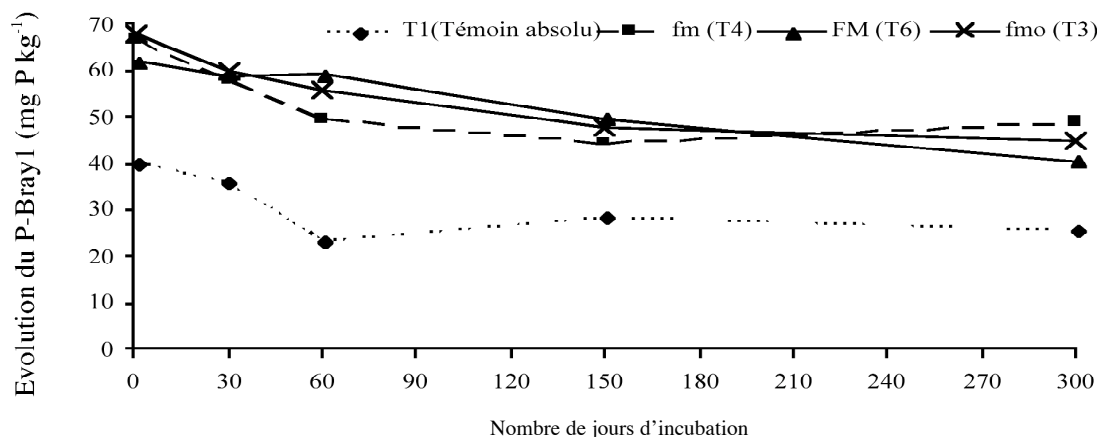
**Figure 3.** Evolution du phosphore assimilable d'un lixisol en culture continue de sorgho, soumis à des fertilisations pendant 40 ans et incubé durant 300 jours en présence de phosphates naturels apportés à la dose de  $100 \text{ mg P kg}^{-1}$ .



**Figure 4.** Evolution du phosphore assimilable d'un lixisol en culture continue de sorgho soumis à des fertilisations pendant 40 ans et incubé durant 300 jours en présence de TSP apporté à la dose de  $50 \text{ mg P kg}^{-1}$ .

#### Evolution de l'acidité du sol au cours de l'incubation

D'une façon générale et quelles que soient la source et la dose de phosphore, les  $\text{pH}_{\text{eau}}$  et  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  obtenus sur les parcelles avec fertilisation organo-minérale ( $T_3$ ) sont les plus élevés après ceux mesurés sur les parcelles témoin absolu ( $T_1$ ). Les apports de phosphore n'ont pas d'effets sur le



**Figure 5.** Evolution du phosphore assimilable d'un lixisol en culture continue de sorgho soumis à des fertilisations pendant 40 ans et incubé durant 300 jours en présence de TSP apporté à la dose de  $100 \text{ mg P kg}^{-1}$ .

$\text{pH}_{\text{eau}}$  du témoin absolu et sur les parcelles fmo (tableau IV). Par contre, ces apports augmentent ce pH pour les deux parcelles ayant reçu les fertilisations exclusivement minérales (fm et FM). Cette élévation du  $\text{pH}_{\text{eau}}$  est d'autant plus importante que la quantité d'engrais phosphaté (TSP ou PN) apportée est plus élevée. Elle est en moyenne plus importante avec les phosphates naturels. Ces observations s'appliquent aussi au  $\text{pH}_{\text{KCl}}$ .

## Les fractions du phosphore du sol

### Avant l'incubation

Le phosphore en solution est quantitativement la fraction la moins importante (figure 6). En moyenne, les teneurs de P dans la solution du sol sont très faibles ( $0,68 \text{ mg P kg}^{-1}$ ). Les teneurs les plus élevées ( $1,70 \text{ mg P kg}^{-1}$ ) sont observées sur le témoin absolu. Comparativement à la fertilisation minérale seule, le fumier à la dose de  $5 \text{ t ha}^{-1}$ , associé à la fumure minérale faible permet d'accroître de 100 % la teneur du phosphore en solution.

Le phosphore lié au calcium (P-Ca) est la fraction de P la plus faible après le phosphore en solution. Les teneurs sont en moyenne de  $3,27 \text{ mg P kg}^{-1}$ . Les teneurs les plus élevées ( $5,25 \text{ mg P kg}^{-1}$ ) sont obtenues avec fmo. Cette dernière permet d'accroître les teneurs en P-Ca de fm de 36 %.

Les teneurs moyennes en P-Al sont de  $22,50 \text{ mg P kg}^{-1}$ . Comme pour la fraction précédente les teneurs les plus élevées ( $37,60 \text{ mg P kg}^{-1}$ ) sont observées sur les parcelles fmo. Ce dernier mode de gestion de la fertilité améliore de 28 % les teneurs en P-Al de la fertilisation minérale faible.

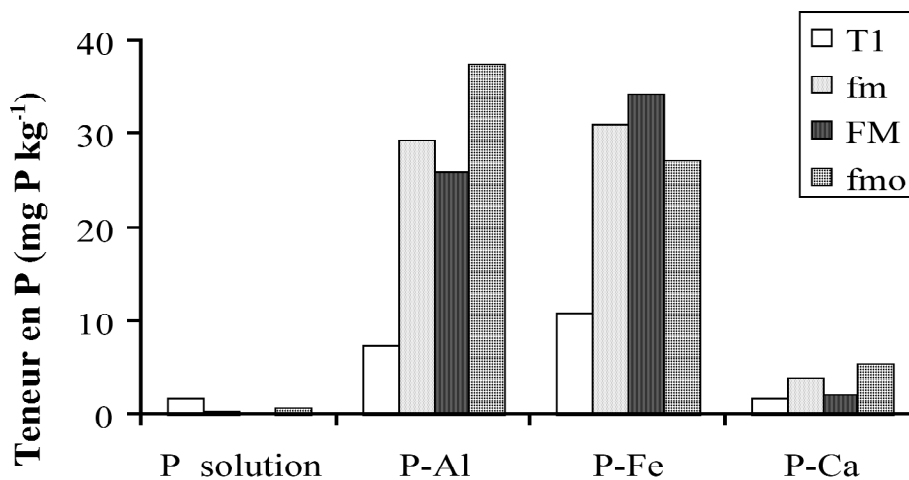
La fraction P-Fe est la fraction la plus importante avec des teneurs de  $25,83 \text{ mg P kg}^{-1}$  en moyenne. Les teneurs les plus élevées sont obtenues avec FM ( $34,33 \text{ mg P kg}^{-1}$ ). La fertilisation organo-minérale réduit les teneurs en P-Fe des fertilisations minérales faible et forte.

**Tableau III.** Evolution du coefficient de solubilisation apparent des phosphates naturels (Kap) au cours d'une incubation de 300 jours d'un lixisol sous culture continue de sorgho depuis 40 ans.

	Type de fumure																				
	Témoins absolus sans fumure (T1)				Fumure organo-minérale faible (T3)				Fumure minérale faible (T4)				Fumure minérale forte (T6)								
Durée incubation	J1	J30	J60	J150	J300	J1	J30	J60	J150	J300	J1	J30	J60	J150	J300	J1	J30	J60	J150	J300	
Phosphates	50	-0,8	2,0	-1,0	0,2	0,1	-3,2	-3,7	-5,2	-3,7	2,0	-6,4	-0,5	0,9	-1,1	2,2	3,6	-2,6	2,2	-1,5	-3,9
Naturels (mg P kg <sup>-1</sup> )	100	1,7	1,0	0,6	0,6	0,7	-0,8	-0,4	2,0	-0,7	3,0	-4,1	1,4	3,7	-0,1	5,1	0,5	4,9	0,6	0,6	0,3

**Tableau IV.** Dynamique du pH<sub>eau</sub> au cours d'une incubation de 300 jours d'un lixisol sous culture continue de sorgho depuis 40 ans.

	Type de fumure																				
	Témoins absolus sans fumure (T1)				Fumure organo-minérale faible (T3)				Fumure minérale faible (T4)				Fumure minérale forte (T6)								
Durée incubation	J1	J30	J60	J150	J300	J1	J30	J60	J150	J300	J1	J30	J60	J150	J300	J1	J30	J60	J150	J300	
phosphates	0	5,9	6,1	6,0	6,4	6,0	6,0	5,7	5,5	5,6	5,5	4,9	5,2	5,4	5,7	5,1	4,7	5,2	5,3	5,3	5,2
naturels	50	5,5	6,0	5,9	6,4	6,3	5,5	5,5	5,4	5,6	5,6	5,1	5,2	5,3	5,3	5,5	4,3	5,2	5,2	5,5	5,5
(mg P kg <sup>-1</sup> )	100	6,0	5,8	5,9	6,4	6,3	5,7	5,8	5,5	5,8	5,5	5,5	5,5	5,3	5,6	5,4	5,0	5,3	5,2	5,7	5,3
TSP	50	5,6	6,0	5,9	6,1	6,4	5,8	5,5	5,5	5,6	5,6	5,3	5,3	5,4	5,5	5,2	4,9	5,1	5,3	5,4	5,3
(mg P kg <sup>-1</sup> )	100	5,5	6,0	5,7	6,2	6,3	5,6	5,6	5,8	5,8	5,5	5,5	5,2	5,5	5,4	5,2	4,5	5,8	5,4	5,5	5,1



**Figure 6.** Effets de 40 ans de fumure sur les fractions du phosphore du sol.

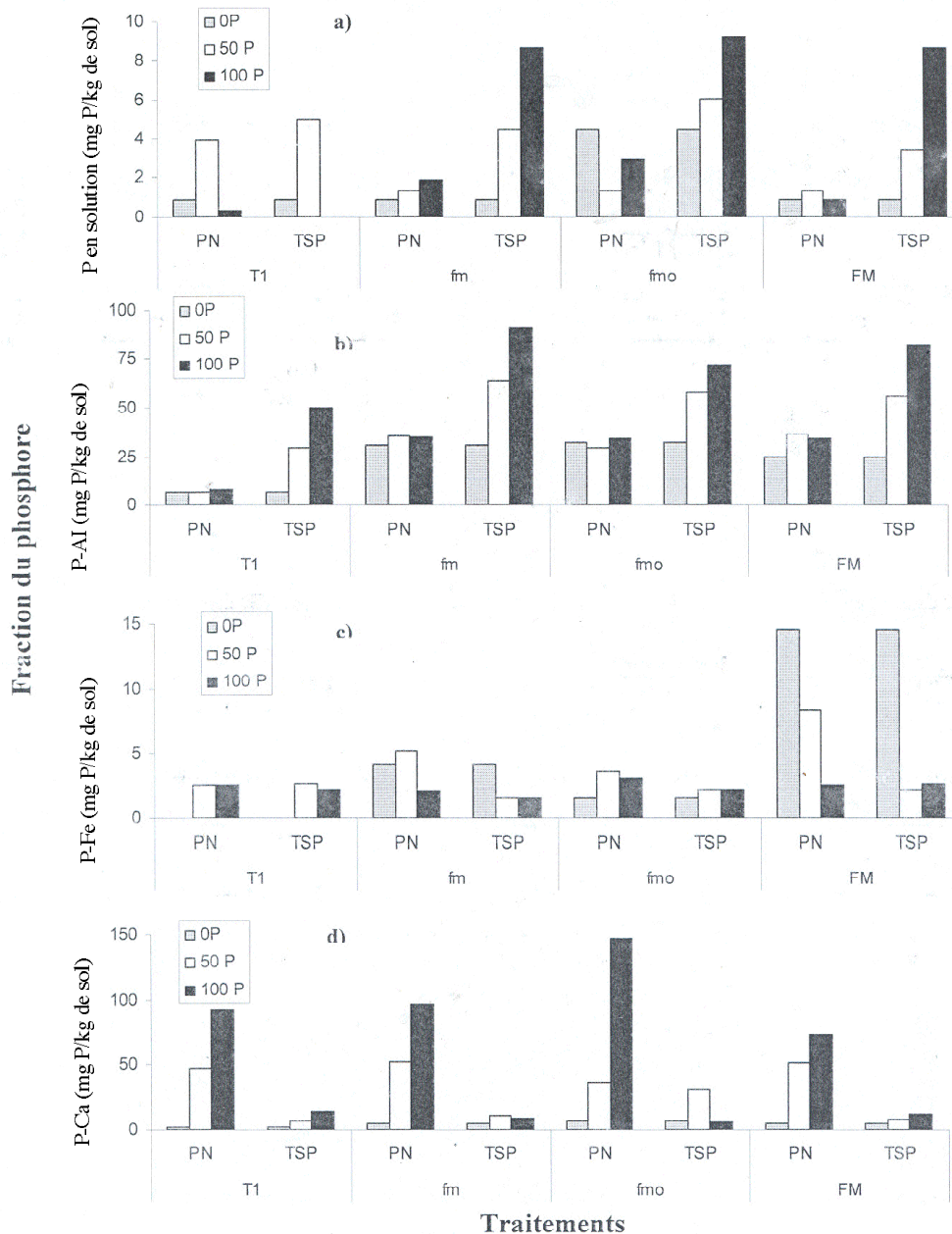
#### Après l'incubation

Le phosphore en solution est surtout amélioré par la source de P soluble (figures 7 a-d). Les effets du TSP sont d'autant plus importants que les doses sont plus élevées. Ces effets sont également plus importants sur les parcelles ayant reçu la fertilisation organo-minérale faible. Les effets des phosphates naturels sur le P en solution sont plus importants sur le sol témoin. En présence de ces phosphates, fmo améliore le phosphore en solution obtenu avec fm.

La fraction du phosphore liée à l'aluminium (P-Al) est, en moyenne la plus importante. Elle est fortement influencée par les modes de gestion de la fertilité et par les apports d'engrais phosphatés. Les effets dus au TSP sont supérieurs à ceux dus aux phosphates naturels. Il faut signaler que même en l'absence d'apports d'engrais phosphatés, P-Al est la fraction la plus représentée, quel que soit le mode de fertilisation du Lixisol. Enfin, les effets sur P-Al des engrais phosphatés sont plus élevés lorsque le sol a bénéficié d'une fertilisation minérale faible. La fertilisation organo-minérale faible baisse les teneurs en P-Al obtenues sur les sols fertilisés avec la fumure minérale faible seule.

La fraction du phosphore liée au fer, sans apport d'engrais phosphatés est surtout importante sur le sol ayant reçu une fertilisation minérale forte. Cette fraction est plus élevée avec les phosphates naturels qu'avec le TSP en particulier sur les sols ayant reçu une fertilisation minérale forte. La fertilisation organo-minérale n'améliore pas les teneurs en P-Al obtenues avec l'application de la fertilisation minérale faible seule.

La fraction de P liée au calcium (P-Ca) est après le P en solution et avec P-Fe, la forme la moins présente dans les sols incubés sans engrais phosphatés. Cette fraction est surtout alimentée par les phosphates naturels beaucoup plus que le TSP. Les teneurs en P-Ca les plus élevées sont obtenues respectivement sur fm, T1 puis sur FM. La fertilisation organo-minérale réduit fortement les teneurs en P-Ca de la fertilisation minérale faible quelle que soit la dose de PN.



**Figure 7 a-d.** Effets sur les fractions du phosphore d'un lixisol soumis pendant 40 ans à différentes fumures et incubé pendant 300 jours en présence de PN et de TSP apportés aux doses de 0 mg kg<sup>-1</sup> sol (0P), 50 mg kg<sup>-1</sup> sol (50 P) et 100 mg kg<sup>-1</sup> sol (100 P).

## Discussion

Les résultats obtenus sur la dynamique du P assimilable et sur les évolutions des  $\text{pH}_{\text{eau}}$  et  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  permettent de mettre en évidence les principaux facteurs du processus adsorption / désorption du phosphore du sol. L'efficacité des engrais phosphatés, en particulier des phosphates naturels dépend d'une part de leurs caractéristiques physico-chimiques et d'autre part des propriétés du sol, des conditions climatiques (pluviométrie et température en particulier) et du type de plante (architecture des racines, capacité de fixation ou non d'azote, forme de nutrition azotée, etc.). Les différentes interactions entre ces facteurs ont été élucidées par BOLAN *et al.* (1990).

La culture continue pendant 40 ans sans apports extérieurs d'engrais conduit à des teneurs en P assimilable très faibles. Le pH élevé observé favorise la précipitation du P par le fer, l'aluminium, le calcium et les argiles. Ce pH ainsi que les faibles teneurs en matières organiques ne sont pas favorables à la solubilisation des phosphates naturels.

Les apports d'engrais minéraux à faible et forte doses conduisent à des pH plus acides et donc à des conditions plus favorables pour la solubilisation des phosphates naturels mais aussi pour la précipitation du phosphore. Les apports organo-minéraux provoquent à terme une baisse des teneurs en éléments fins du lixisol, contribuant ainsi à réduire les possibilités de fixation du phosphore sur les argiles (SCIVITTARO *et al.*, 2002). Les teneurs élevées en matières organiques et en magnésium ainsi que le pH acide à moyennement acide sont favorables à la solubilisation des phosphates naturels.

En absence de tout apport extérieur de P, l'incubation des sols issus des différents modes de gestion de leur fertilité montre clairement les effets des fertilisations minérales sur l'amélioration du P assimilable du sol. Les quantités de P assimilables obtenues avec ces fertilisations minérales sont en moyenne 5 fois plus élevées que celles obtenues avec le témoin absolu. L'évolution du P assimilable au cours de l'incubation laisse apparaître une baisse progressive des teneurs, traduisant une adsorption du P sur de nombreux sites qui sont en fait liés aux caractéristiques des sols (PARFITT, 1978). Parmi ces caractéristiques il y a le pH. Ainsi à  $\text{pH} < 5$ , le phosphore se fixe sur les surfaces de l'aluminium échangeable et du fer (FITTER and SUTTON, 1975). D'autre part et comme le montrent les données sur le pH, la durée de l'incubation a des effets sur ce paramètre qui à son tour influe sur les charges de surface du sol. Ainsi selon MORA and BARROW (1996), l'incubation d'un sol à pH élevé conduit à une perte de protons ( $\text{H}^+$ ) de la phase solide au profit de la solution du sol. Il s'en suit une baisse du pH de cette solution et une augmentation des charges négatives du sol. Dans ces conditions les ions  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  ne peuvent pas être fixés sur ces charges négatives. Par contre, ils peuvent l'être à travers des liaisons avec des cations tels que  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$ . A l'inverse, l'incubation d'un sol à pH bas, comme c'est le cas pour les sols des traitements T4 et T6, conduit à un gain de  $\text{H}^+$  par la phase solide du sol et donc à une augmentation du pH de la solution du sol et à un accroissement des charges positives du sol. Les conséquences sont alors une fixation des ions  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ . Il faut enfin noter que la kaolinite qui est l'argile dominante dans les lixisols est capable d'adsorber le phosphore à des  $\text{pH} > 5$  (UEHARA, 1991).

**Tableau V.** Dynamique du pHKCl au cours d'une incubation de 300 jours d'un lixisol sous culture continue de sorgho depuis 40 ans.

	Type de fumure														
	Témoin absolu sans fumure (T1)			Fumure organo-minérale faible (T3)			Fumure minérale faible (T4)			Fumure minérale forte (T6)					
Durée incubation	J1	J30	J60	J150	J300	J1	J30	J60	J150	J300	J1	J30	J60	J150	J300
phosphates	0	5,5	5,2	5,2	5,4	5,1	4,8	4,7	4,6	4,6	4,3	4,3	4,2	4,2	4,2
naturels	50	5,2	5,2	5,2	5,4	5,4	4,9	4,6	4,6	4,7	4,7	4,3	4,2	4,2	4,2
(mg P kg <sup>-1</sup> )	100	5,8	5,1	5,2	5,3	5,4	4,3	4,8	4,7	4,5	4,6	4,3	4,3	4,2	4,2
TSP	50	5,5	5,2	5,2	5,3	5,4	4,9	4,6	4,6	4,6	4,7	4,3	4,3	4,2	4,2
(mg P kg <sup>-1</sup> )	100	5,4	5,2	5,3	5,3	5,3	5,0	4,7	4,8	4,6	4,8	4,3	4,3	4,2	4,2

L'incubation du sol fmo conduit non seulement à des quantités de P assimilable plus importantes, mais aussi à une atténuation des baisses des teneurs. Des corrélations significatives entre P adsorbé et la matière organique existent et s'expliquent par l'adsorption de P sur les ions Fe et Al qui sont chélatés par les molécules organiques. Mais ce phosphore peut facilement passer en solution, parce qu'il est faiblement retenu sur le fer et l'aluminium (FOX and KAMPRATH, 1970). La matière organique peut également bloquer les sites de forte énergie d'adsorption de P et réduire de ce fait son adsorption ou favoriser son adsorption sur des sites de plus faible énergie et donc accroître sa présence dans la solution du sol ou faciliter la désorption des ions phosphates. Enfin, l'augmentation du pH suite à l'apport de fmo a entraîné une baisse des teneurs en  $Al^{3+}$ , qui, d'une part sont des sites de fixation du phosphore, et d'autre part peuvent complexer les acides organiques provenant de la minéralisation de la matière organique (HUE, 1991 ; YUAN, 1980).

L'apport de phosphore à partir des phosphates naturels et du TSP a eu différents effets sur l'évolution du P assimilable au cours de l'incubation. De façon générale, on constate que quelle que soit la quantité de P apporté, il y a une baisse du P assimilable au cours de l'incubation. Nos données confirment une règle générale qui est que tout apport de phosphore supérieur à la quantité qui peut être dissoute dans la solution du sol est suivi d'une adsorption d'une fraction plus ou moins importante sur les particules du sol (FROSSARD *et al.*, 1995). Ce sont les propriétés de sorption de la phase solide du sol qui contrôlent ces mouvements de transfert des ions phosphates de la solution du sol vers ces particules. La capacité de sorption dépend des teneurs du sol en oxydes métalliques en carbonates et en phyllosilicates (INDIATI, 2000). De faibles teneurs du sol en ces composantes (dont les surfaces présentent des affinités pour les ions phosphates) conduisent à de faibles fixations du phosphore dans le sol (SAMPLE *et al.*, 1980).

Dans le cas de l'apport de phosphates naturels, l'équation de dissolution des fluoroapatiques (BOLAN *et al.*, 1990) permet d'expliquer les résultats obtenus sur l'incubation des Lixisols, en présence de ces phosphates. Les caractéristiques tels que le pH (la concentration des ions  $H^+$ ), l'humidité du sol, la concentration des ions phosphates et celle des ions calcium dans la solution du sol, sont les principaux facteurs qui contrôlent la solubilisation des phosphates naturels.

La baisse du P assimilable au cours d'une incubation suite à l'apport d'engrais phosphatés solubles ou insolubles est un phénomène général (BARROW and SHAW, 1975) qui s'explique par l'adsorption du P sur les particules du sol. Les ions ainsi adsorbés peuvent être lentement inclus dans les minéraux du sol (BARROW, 1980 ; SYERS and LU RU, 1990) si des mécanismes de désorption gouvernés par des processus de déséquilibre ionique (prélèvements par une plante par exemple) n'interviennent pas (GACHON, 1977). La fraction de P adsorbée bien que variant selon le type de sol croît également avec la durée de contact entre le phosphate et le sol et l'augmentation de la température (BARROW, 1991). Dans le cas des phosphates naturels, l'adsorption est d'abord rapide, puis devient plus lente (PARFITT, 1978). La phase d'adsorption rapide est due aux réactions d'échange de ligands entre les groupements Al-OH et Fe-OH et les ions phosphatés. La phase d'adsorption plus lente s'explique entre autres par la précipitation des phosphates (CHEN *et al.*, 2003).

Les variations des taux de solubilisation des phosphates naturels dans les lixisols obtenus, en fonction des traitements s'expliquent selon KHASAWNEB and DOLL (1978) par :

- les gradients de pH (concentration des ions  $H^+$ ) : le taux de solubilisation est d'autant plus élevé que le pH est bas ;
- les gradients de concentration de  $Ca^{2+}$  : plus cette concentration est élevée, moins les phosphates naturels sont solubilisés ;
- les gradients des ions  $H_2PO_4^-$  dans la solution du sol. Une concentration élevée de  $H_2PO_4^-$  réduit la solubilisation des phosphates naturels ;
- les teneurs élevées en azote qui tendent à accroître la dissolution des phosphates naturels ;
- les apports de matière organique qui ont un effet positif sur la dissolution des phosphates naturels ;
- le pouvoir tampon vis-à-vis du phosphore. Les sols qui n'ont reçu aucune fertilisation et ceux ayant reçu pendant 40 ans la fumure minérale faible ont un pouvoir tampon élevé. Pour ces sols les apports de PN importants alimentent plutôt le pool de P lentement échangeable. Par contre, les sols qui reçoivent une fumure organo-minérale faible ou une fumure exclusivement minérale forte ont un pouvoir tampon de bas à modéré. Pour ces sols, les applications de PN augmentent le phosphore immédiatement disponible pour les plantes (FROSSARD and SINAJ, 1997).

Le fractionnement du P en fin d'incubation révèle globalement la prédominance de P-Ca et de P-Al pour les apports respectifs de phosphates naturels et de TSP, comparativement aux sols sans apport de P. La prédominance de P-Ca dans les sols recevant des phosphates naturels traduit la présence, en proportion dominante, des phosphates naturels sous leur forme brute (KHA-SAWNEB and DOLL, 1978).

## Conclusion

L'étude des effets des modes de gestion de la fertilité du lixisol soumis à différentes sources et doses de phosphores montre qu'en absence d'apport extérieur de phosphore, les quantités de P assimilable obtenues sont plus importantes avec les apports d'engrais minéraux. L'apport de phosphore a des effets plus ou moins marqués selon les sources et les doses de phosphore. Ces effets sont la résultante d'un processus de solubilisation suivie d'adsorption ou de désorption du P sur les particules minérales du sol. Ce processus est gouverné par des facteurs tels que les concentrations de  $H^+$ , de  $H_2PO_4^-$  et de  $Ca^{2+}$  dans la solution du sol, le taux d'humidité et la source de phosphore. Le fractionnement du P après l'incubation indique une prédominance de P-Ca et P-Al. Les phosphates naturels enrichissent plus le pool de P-Ca. Le TSP enrichit surtout la fraction P-Al.

L'incubation du sol ayant reçu la fertilisation organo-minérale conduit à des quantités de P assimilable plus importantes et à une atténuation des baisses des teneurs en P observées avec les autres modes de fumure.

Le comportement des sols vis-à-vis des sources de phosphore dépend de nombreux facteurs dont certains sont encore mal connus au Burkina Faso. Il s'agit essentiellement des caractéristiques minéralogiques des sols, de leur surface spécifique et de leur pHo. Des recherches stratégiques sur les conditions de recapitalisation des sols avec les phosphates naturels sont à entreprendre. Il s'agira principalement de caractériser plus finement ces sols afin de mieux comprendre le rôle des différents facteurs dans la solubilisation des phosphates naturels.

## Références citées

- AFNOR, 1996.** Dosage du carbone organique et du carbone total après combustion sèche. *In* : AFNOR Qualité des sols, Association Française de Normalisation NF ISO 106 96, Paris, France, p.189-200.
- AFNOR, 1999a.** Analyse granulométrique par sédimentation. Méthode de la pipette. *In* : AFNOR Qualité des sols, Association Française de Normalisation NF X 31-107, Paris, France, p. 57-72.
- AFNOR, 1999b.** Détermination du pH. Association *In* : AFNOR Qualité des sols, Association Française de Normalisation NF ISO 103 90, Paris, France, p. 339-348.
- BADO B. V., SEDOGO M. P. et LOMPO F., 2004.** Long term effects of mineral fertilizers, phosphate rock, dolomite and manure on characteristics of ultisols and maize yield in Burkina Faso. *Academy Science Publishers* : 77-87.
- BARROW N. J. and SHAW T. C., 1975.** The slow reactions between soil and anions. The Effects of time and temperature on the decrease in isotopically exchange phosphate. *Soil Science*, 119 : 190-196.
- BARROW N. J., 1980.** Evaluation and utilization of residual phosphorus in soils. In: The role of phosphorus in Agriculture. *American Society of Agronomy* : 333-361.
- BARROW N. J., 1991.** Testing a mechanistic model. XI. The effects of time and level of application on isotopical exchangeable phosphate. *Journal Soil Science*, 42 : 277-288.
- BATIONO A., MOKWUNYE A. U., 1991.** Alleviating soil fertility constraints to increase crop production in West Africa: The experience in Sahel. *Fertilizer Research, Special issue*, 20 (1): 95 -115.
- BATIONO A., 1998.** Fertilité des sols pour la production céréalière en zone sahélo-soudanienne et valorisation des phosphates naturels. *Agriculture*, 7 (5) : 365-371.
- BIKIENGA I. M. et SEDOGO M. P., 1981.** Utilisation des phosphates naturels de Haute-Volta : Synthèse des travaux d'expérimentation sur les Voltaphosphates et les phosphates améliorés. IRAT, Ouagadougou, Haute Volta, 62 p.
- BIZIMUNGU G., ROY R. N. and BURGOS W., 2001.** Evaluation de l'efficacité agronomique des phosphates naturels pour l'application directe en Afrique de l'Ouest: Synthèse des résultats agronomiques expérimentaux, FAO, Rome, Italie, 49 p.
- BOLAN N. S., WHITE R. E. and HEDLEY M. J., 1990.** A review of the use of phosphate rocks as fertilizers for direct application in Australia and New Zealand. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 30: 297-313.
- BONZI M., LOMPO F. et SEDOGO M. P., 2006.** Promoting use of indigeneous phosphate rock for soil fertility recapitalization in the Sahel: Etat des lieux des connaissances sur la valorisation des phosphates naturels du Burkina Faso. Synthèse réalisée dans le cadre du Projet CORAF/BAD/phosphates, INERA, Ouagadougou, Burkina Faso, 34 p.
- BRAY R. H. and KURTZ L. T., 1945.** Determination of total organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Science*, 59 : 39-45.
- CHANG S. C. and JACKSON M. L., 1957.** Fractionation of soil phosphorus. *Soil Science*, 84:133-144.
- CHEN C. R., SINAJ S., CONDRON L. M., FROSSARD E., SHERLOCK R. R. and DAVIS M. R., 2003.** Characterization of phosphorus availability in selected New Zealand grassland soils. *Nutrient cycling in Agroecosystems* 65 : 89-100.
- DUPONT DE DINECHIN B. et DUMONT C., 1967.** La fumure phosphatée des cultures vivrières en Haute-Volta, IRAT, Ouagadougou, Haute Volta, 23 p.
- FALLAVIER P., BABRE D. et BRESSE M., 1985.** Détermination de la capacité d'échange cationique des sols tropicaux. *Agronomie Tropicale*, 40 (4) : 298-308.
- FITTER A.H. and SUTTON C.O., 1975.** The use of the Freundlich isotherm for soil phosphate sorption data. *Journal of Soil Science*, 26 : 241-246.
- FONTES J. et GUINKO S., 1995.** Carte de la végétation et de l'occupation du sol du Burkina Faso. Notice explicative. Projet Campus, ICIV, Toulouse, IDR-FAST, Ouagadougou, Burkina Faso, 57 p.

- FOX R. L. and KAMPRATH E. J., 1970.** Phosphorus sorption isotherms for evaluating the phosphorus requirement of soil. *Soil Science American. Proceedings*, (34) : 902- 907
- FROSSARD E., BROSSARD M., HEDLEY M. J. and METHERELL A., 1995.** Reactions controlling the cycling of P in soils. *In: Phosphorus in global environment*, Tiessen H. (Eds). JOHN WILLEY & SONS Ltd. New York, USA, p. 107-137.
- FROSSARD E. and SINAJ S., 1997.** The isotope exchange kinetic technique: a method to describe the availability of inorganic nutrients. Applications to K, P, S and Zn. *Isotopes Environment and Health Studies*, 33 : 61-77.
- GACHON L., 1977.** Utilité d'un bon niveau de réserves phosphates du sol. *Phosphore et Agriculture*, 70: 27-33.
- HIEN V., KABORE D., YOUL S. and LOWENBERG DEBOER J., 1997.** Stochastic dominance analysis of on-farm trials data: The riskiness of alternative phosphates sources in Burkina Faso. *Agricultural-Economics*, 15 (3) : 213-221
- HUE N.V., 1991.** Effects of organic acids/anions on P sorption and phytoavailability in soils with different mineralogies. *Soil Science*, 152 : 463-471.
- INDIATI R., 2000.** Addition of phosphorus to soils with low to medium phosphorus retention capacities. I. Effect on soil phosphorus sorption properties. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 31 (9 et 10) : 1179-1194.
- IUSS, ISRIC, FAO, 2006.** World reference base for soil resources 2006. A framework for international classification, corrélation and communication. FAO, Rome, Italie. World Soil Resources Reports 103, 145 p.
- JOHNSON A. K. C., 1994.** Les ressources agro-minérales en Afrique de l'Ouest : Inventaire et valorisation. Communication au séminaire « Emploi des ressources minérales locales pour une agriculture durable en Afrique de l'Ouest » ; IFDC-Afrique/Lomé/Togo, 21-23 novembre 1994, 35 p.
- KHASAWNEB F. E. and DOLL E. C., 1978.** The use of phosphate rock for direct application to soils. *Advances in agronomy*, 30 : 159-206.
- KPOMBLEKOU A. and TABATAKI M. A., 2003.** Effect of low-molecular weight organic acids on phosphorus release and phytoavailability of phosphorus in phosphate rocks added to soils. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 100 : 275-284.
- LOMPO F., 1993.** Contribution à la valorisation des phosphates naturels du Burkina Faso : Etude des effets de l'interaction phosphates naturels-matières organiques. Thèse de Docteur-Ingénieur, FAST, Université Nationale de Côte d'Ivoire, 249 p.
- LOMPO F., SEDOGO M. P., ASSA A., 1994.** Effets à long terme des phosphates naturels de Kodjari (Burkina Faso) sur la production du sorgho et les bilans minéraux. *Revue du Réseau pour l'Amélioration de la Productivité Agricole en Milieu Aride*, 6 :163-178.
- MOKWUNYE A. U., 1996.** Recapitalizing west Africa's soil fertility: role of local phosphate rock. *Agro-minerals. News in Brief*, 19 (4) : 10-12.
- MORA M. L. and BARROW N. J., 1996.** The effects of time of incubation on the relation between charge and pH of soil. *European Journal of Soil Science*. 47 : 131-136.
- ORSINI L. et REMY J. C., 1976.** Utilisation du chlorure de cobalt hexamine pour la détermination simultanée de la capacité d'échange cationique et des bases échangeables des sols. *Bulletin de l'Association Française pour l'étude des Sols*, 4 : 269-275.
- PARFITT R. L., 1978.** Anion adsorption by soils and soil materials. *Advances in Agronomy*, 30 : 1-50.
- SAMPLE E. C., SOPER R. J. and RACZ G. J., 1980.** Reactions of phosphate fertilizers in soils. *In: The role of phosphorus in agriculture*, F.E. KHASAWNETH and al. (Eds.). American Society of Agronomy, Madison, WI, USA, p. 263-310.
- SCIVITTARO W. B., MURAOKA T., BOARETTO A. E. and BRASIL E. C., 2002.** Availability of native and fertilizer P in brazilian soils. *In: Assessment of soil phosphorus status and management of phosphatic fertilizers to optimize crop production* ; AIEA, p. 131-135.

**SYERS J. K. and LU RU K., 1990.** Inorganic reaction influencing phosphorus cycling in soils. *In*: Phosphorus requirements for sustainable Agriculture in Asia and Oceania, IRRI, Manilla, Philippines, p. 191-197.

**TRUONG B., 1989.** Evaluation de l'efficacité agronomique des phosphates naturels provenant d'Afrique de l'Ouest. Thèse Doctorat INPL. Spécialité : Sciences agronomiques ; Option fertilisation des sols ; 160 p.

**UEHARA G., 1991.** Clay minerals of alfisols and vertisols in the semi-arid tropics in relation to phosphorus behavior in the soil. *In* : Phosphorus nutrition of grain legumes in the semi-arid tropics, JOHANSEN C., LEE K.K. and SAHRAWAT K.L. (Eds); ICRISAT, Patancheru, India, p. 17-22.

**YUAN T.L., 1980.** Adsorption of phosphate and water extractable soil organic material by synthetic aluminium silicates and acid soils. *Soil Science Society of American Journal*, 44: 951-955.