

# Effets d'engrais phosphatés de différentes origines sur la production rizicole pluviale sur des sols acides en zone de forêt semi-montagneuse sous climats tropicaux

## Cas des *hyperdystric ferralsols* sous jachères en Côte d'Ivoire

B. Koné<sub>(1, 2)</sub>, J.B. Ettien<sub>(2)</sub>, G. L. Amadji<sub>(3)</sub>, S. Diatta<sub>(1)</sub> et M. Camara<sub>(4)</sub>

- 1) Centre du riz pour l'Afrique, BP 2031, Cotonou, Bénin, kbrahima@hotmail.com
- 2) Université de Cocody, UFR des sciences de la terre et des ressources minières, laboratoire de pédologie appliquée, 22 BP 582 Abidjan 22, Abidjan, Côte d'Ivoire
- 3) Université d'Abomey-Calavi. Faculté des Sciences agronomiques. BP : 499 Calavi. République du Bénin
- 4) Centre national de recherche agronomique, BP 602 Gagnoa, Côte d'Ivoire

### RÉSUMÉ

En vue d'accroître les rendements en grains du riz pluvial sur des sols acides intertropicaux, les effets de cinq sources de phosphates naturels (PN) dont ceux du Mali, du Burkina Faso, du Togo et du Sénégal, avec deux origines qui sont Thiès et Taïba, ainsi que l'effet du triple super phosphate (TSP) ont été évalués en utilisant la variété de riz WAB 56-104. Ont été déterminées l'efficacité agronomique de P et son efficacité agronomique relative. Le TSP a été appliqué annuellement à 50, 100 et 150 kg  $P_2O_5$  ha<sup>-1</sup> alors que les PN ont été appliqués une seule fois en 1999, au début de l'expérimentation, aux doses de 150, 300 et 450 kg  $P_2O_5$  ha<sup>-1</sup> afin d'apprécier leurs effets résiduels en 2000 et 2001. L'étalement dans le temps des effets maximums du TSP, des PN du Togo et de Taïba laisse à penser qu'il serait possible d'obtenir des rendements en grains annuels supérieurs à 2 t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> pendant 5 ans. La dose de 300 kg  $P_2O_5$  ha<sup>-1</sup> appliquée en une seule fois de PN du Togo a été recommandée pour tendre vers une riziculture pluviale dont le rendement grains d'environ 2 t ha<sup>-1</sup> durant trois ans, serait stable.

### Mots-clés

Sol acide, engrais phosphaté, phosphate naturel, riziculture pluviale, forêt humide

**SUMMARY****EFFECTS OF PHOSPHATE FERTILIZERS OF DIFFERENT ORIGINS ON RICE PRODUCTION ON ACID SOILS IN FOREST ZONE SEMI MOUNTAINOUS UNDER TROPICAL CLIMATES.**

To improve rainfed rice grain yield on tropical acid soils, the effects of five sources of rock phosphate (RP) including those of Mali, Burkina Faso, Togo and Senegal composed of two origins, as Thiès and Taïba as well as the effect of super triple phosphate (TSP) was evaluated using the rice variety WAB 56-104. The P-agronomic efficiency and its relative agronomic efficiency were determined. The TSP was applied annually at 50, 100 and 150 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> while the RPs were applied once in 1999, at the beginning of the experimentation at the rates of 150, 300 and 450 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> and their residual effects assessed in 2000 and 2001. The spread of the maximum effects of TSP and RPs of Togo and Taïba along the time led to believe that it may be possible to obtain annual grain yield over 2 t ha<sup>-1</sup> per year. The rate of 300 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> applied once as Togo RP was recommended to obtain a rainfed rice cultivation with grain yield of about 2 t ha<sup>-1</sup> that would be stable during three years.

**Key-words**

Acid soil, phosphate fertilizers, rock phosphate, rainfed rice cultivation, humid forest.

**RESUMEN****EFFECTOS DE LOS FERTILIZANTES FOSFATADOS DE DIFERENTES ORÍGENES SOBRE LA PRODUCCIÓN ARROCERA DE ESTACIÓN LLUVIOSA EN LOS SUELOS ÁCIDOS, EN REGIONES DE BOSQUE SEMIMONTAÑOSO BAJO CLIMAS TROPICALES. CASO DE LOS FERRALSOLES HIPERDÍSTRICOS EN BARBECHOS EN COSTA DE MARFIL.**

Con el objetivo de aumentar los rendimientos en granos de arroz de la estación lluviosa sobre suelos ácidos intertropicales, los efectos de cinco fuentes de fosfatos naturales (PN) dentro de las cuales se encuentran las de Mali, de Burkina Faso, del Togo y de Senegal, con dos orígenes que son Thiès y Taïba, así como el efecto del triple súper fosfato (TSP) han sido evaluados utilizando la variedad de arroz WAB 56-104. Han sido determinadas la eficiencia y la influencia agronómicas del P. El TSP ha sido aplicado anualmente a 50, 100 y 150 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> por hectárea mientras que los PN han sido aplicados una sola vez en 1999, al principio del experimento con dosis de 150, 300 y 450 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> por hectárea para apreciar los efectos residuales en 2000 y 2001. El extendimiento en el tiempo de los efectos máximos del TSP, de los PN del Togo y de Taïba deja pensar que sería posible obtener rendimientos en granos anuales superiores a dos toneladas por hectárea por año durante cinco años. La dosis de 300kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> por hectárea aplicada en una sola vez de PN del Togo ha sido recomendada para aproximar un cultivo de la época lluviosa de arroz cuyo rendimiento en granos de alrededor de dos toneladas por hectárea durante tres años, sería estable.

**Palabras clave**

Suelo ácido, aborno fosfatado, fosfato natural, cultivo de arroz de la época lluviosa, bosque húmedo.

## INTRODUCTION

L'agriculture est une des principales causes de la déforestation en Afrique (Mercier, 1991). Cette déforestation est accentuée par des pratiques agricoles conduites de façon itinérante par les agriculteurs à la recherche de terres *a priori* plus fertiles que les terres utilisées l'année précédente (Jurion et Henry, 1969). En effet, après deux à trois ans de cultures qui suivent le défrichage de la forêt ou de la savane, on assiste à une diminution significative des rendements des cultures. Les causes avancées pour expliquer cette décroissance des rendements sont nombreuses; et selon les cas on cite des dégradations physiques, chimiques (acidité, N, P et K) et biologiques des sols soumis à des cultures répétées sur une même parcelle sans restitutions des éléments prélevés et/ou lessivés (Siband, 1974; Diatta et Siband, 1997). La décroissance des rendements, bien plus rapide sous climat tropical que sous climat tempéré, pousse les agriculteurs à abandonner les parcelles qu'ils viennent d'exploiter et à favoriser la pratique de l'agriculture itinérante. Cette agriculture extensive se fait au détriment de la forêt et porte préjudice à l'équilibre écologique et, par voie de conséquence, à toute possibilité de développement durable.

Les systèmes de cultures traditionnels à base de riz pluvial en Afrique de l'Ouest, particulièrement en Côte d'Ivoire (Moreau et Godefroy, 1985) où les sols de cette zone appartiennent à la classe des ferralsols très lessivés (*Hyperdystric Ferralsols*) et sont acides, en sont une criante illustration. De plus, en raison des pressions démographiques croissantes, les périodes de jachère sont réduites à moins de 10 ans et deviennent trop brèves pour restaurer, au moins partiellement, la fertilité organique des terres (Pieri, 1989) en vue de leur réutilisation agricole efficiente. Cette situation de jachères trop brèves implique des modifications des pratiques culturales afin de réussir simultanément à limiter la contrainte acidité des sols et à maintenir un bon niveau de fertilité nutritionnelle des terres permettant d'assurer des rendements constamment élevés des cultures.

Le phosphore apparaît fréquemment comme le premier des facteurs limitants pour l'agriculture vivrière (Sanchez et Salinas, 1981; Warren, 1992) et l'application d'engrais phosphatés y est vivement recommandée (Mokwunye *et al.*, 1996), particulièrement pour la riziculture (Sahrawat, 2003), culture vivrière majeure en Afrique de l'Ouest. L'application raisonnée d'engrais phosphatés adaptés aux conditions agropédoclimatiques doit permettre à la fois d'assurer des rendements accrus des cultures et d'accroître la fertilité analytique des sols. En sols acides, ce qui s'applique à toute l'Afrique de l'Ouest, l'utilisation des phosphates naturels (PN), bien que peu solubles dans les réactifs conventionnels les plus doux, a été proposée comme une alternative moins coûteuse que les formes d'engrais phosphatés solubles dans l'eau et/ou le citrate d'ammonium neutre (Sanchez *et al.* 1997) tel le superphosphate triple (TSP). L'acidité des sols serait plus favorable à l'usage des PN qui simultanément peuvent apporter aux

terres des éléments autres que P avec un potentiel de chaulage significatif (Hellums *et al.*, 1989; Prakash et Badrinath, 1995). En raison de sa possibilité de dissolution partielle plus importante en milieu acide que bien d'autres phosphates naturels, le phosphate naturel du Mali a été recommandé en application directe (Debrah, 2000). Cette recommandation a conduit à son utilisation en riziculture pluviale dans la zone forestière de la Côte d'Ivoire. Pourtant, les rendements du riz pluvial obtenus suite à l'application de phosphates solubles dans l'eau ou du phosphate naturel du Mali, y compris en combinaison avec des légumineuses associées dans l'itinéraire technique, ont rarement excédé 1,5 t ha<sup>-1</sup> même pour des variétés améliorées considérées à haut potentiel de 4–5 t ha<sup>-1</sup> (Sharma et Prasad, 2003; Somado *et al.*, 2003; Akinrinde et Gaizer, 2006). Ces résultats expérimentaux autorisaient à émettre l'hypothèse selon laquelle d'autres facteurs à part la phytodisponibilité des phosphates, tant du sol que des engrais, pourraient limiter l'utilisation de ces sources de phosphore par le riz. Ils obligeaient alors à réexaminer l'utilisation de différentes matières fertilisantes phosphatées en riziculture pluviale, notamment sur les sols acides issus de jachère en zone de forêt semi-montagneuse, naturellement fragiles.

L'efficacité agronomique des PN dépend de leur réactivité, des propriétés des sols, du climat, des cultures et des pratiques culturales (Chien et Menon, 1995; Morel, 1996; Hodge, 2000; Sahrawat *et al.*, 2003), globalement des conditions agropédoclimatiques. C'est pourquoi il était possible de faire l'hypothèse suivante: des PN autres que celui du Mali pouvaient être plus adaptés à la riziculture pluviale sur ferralsol. Mais il existait peu de travaux portant sur l'évaluation des PN, tant en Afrique de l'Ouest qu'en Afrique de l'Est (Seyoum et McIntire, 1987).

C'est la raison pour laquelle des expérimentations avec des engrais phosphatés de diverses origines géographiques appliqués à la riziculture pluviale de l'Afrique de l'Ouest ont été mises en place. C'est ainsi que l'effet pluriannuel sur le rendement du riz pluvial de six engrais phosphatés, dont cinq PN et le TSP, a été évalué. C'est la variété de riz WAB 56-104 (*Oryza sativa* L.), connue pour sa tolérance à l'acidité du sol (ADRAO, 1999), qui a été choisie pour cette expérimentation agronomique de trois années en zone forestière humide et montagneuse de la Côte d'Ivoire. À terme, cette étude devrait permettre d'identifier, puis de proposer une stratégie d'utilisation des PN pour une riziculture pluviale durable en Afrique de l'Ouest.

## MATÉRIEL ET MÉTHODES

### Site de l'expérimentation

L'expérimentation a été conduite à la station expérimentale du Centre national de recherche agronomique-CNRA de Man (7°2 N, 7°4 O; 500 m), à l'Ouest de la Côte d'Ivoire. C'est une zone de forêt humide tropicale avec un régime pluviométrique

unimodal dont les cumuls ont été, pendant les trois années d'expérimentation, de 2260 mm en 1999, 1771 mm en 2000 et de 1939 mm en 2001. L'expérimentation a été mise en place à la suite d'une jachère de 5 ans dont la végétation était dominée par *Chromolaena Odorata*.

## Sol

Le sol contenant environ 30 % de graviers, considéré comme peu gravillonnaire, est de couleur rouge (5YR à 2,5YR). Il a été classé parmi les sols ferrallitiques fortement désaturés en bases selon CPCS (1967) et correspondrait à un *hyperdystric ferralsol* selon l'International Society of Soil Sciences – ISSS, International Soil Reference and Information Centre – ISRIC et l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture – FAO (1998). Un échantillon composite a été constitué en mélangeant les échantillons de terre prélevés par tarière dans la couche 0–20 cm de chaque micro-parcelle. Les fractions granulométriques du sol ont été déterminées selon la méthode de la pipette et les valeurs du pH l'ont été par l'électrode en verre à la fois dans l'eau (1 : 2,5 du sol) et dans une solution de KCl, 1N. L'aluminium a été extrait par le KCl et sa teneur a été déterminée par titrimétrie. Les teneurs de C et N total ainsi que P extrait par la méthode Bray I ont été déterminées respectivement par les méthodes de Walkley et Black (1934), Kjeldahl (Bremner, 1965) et Bray-I. Suite à l'extraction à l'acétate d'ammonium normal à pH 7, les teneurs de K ont été déterminées par spectrométrie d'émission dans la flamme et celles de Ca et Mg par absorption atomique. L'acétate d'ammonium a été également utilisé pour la détermination de la capacité d'échange en cations (CEC) de cette terre. Ces caractéristiques standard sont regroupées dans le *tableau 1*. C'est un sol acide sablo-limono-argileux à CEC faible, dont les teneurs de N, P et cations échangeables K et Ca sont à des niveaux tels qu'ils peuvent tous être facteurs limitants des rendements des cultures.

## Mise en place des essais en plein champ

L'expérimentation a eu lieu durant les années culturales de 1999 (An1), 2000 (An2) et 2001 (An3) au sommet d'un plateau dont la pente a été estimée entre 0 et 2 %. Elle a occupé environ 1500 m<sup>2</sup> nettoyés à la machette puis débarrassés des débris végétaux. Le labour et l'émiettement des mottes de terre ont été faits à la houe chaque année. Des micro-parcelles de 5 m × 3 m ont été délimitées pour chacun des traitements correspondant aux phosphates des 6 origines. Il s'agissait d'une part de PN originaires du Mali (Ma), du Burkina Faso (Bu), du Togo (Tg) et du Sénégal – l'un étant le phosphate aluminocalcique calciné de Thiès (Pa) et l'autre calcique de Taïba (Ta) – et d'autre part du Triple super phosphate (TSP) considéré comme la référence planétaire. Ces engrais phosphatés ont été appliqués aux doses de 50, 100 et 150 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>. Le TSP a été appliqué annuellement pendant trois ans et des doses uniques de PN (150,

300 et 450 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>) proportionnelles pour trois ans ont été appliquées en 1999. Pour l'analyse des données, les doses ont été réparties en trois groupes: la Dose 1 = 50 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> de TSP et 150 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> de PN; la Dose 2 = 100 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> de TSP et 300 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> de PN et la Dose 3 = 150 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> de TSP et 450 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> de PN, donnant a priori, et implicitement, une efficacité agronomique des PN trois fois moins importante que celle du TSP. La dose de 0 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> a représenté le témoin absolu (P0).

Cet essai a comporté 57 micro-parcelles séparées par des allées de 0,5 m de largeur. Il s'agissait d'un dispositif de bloc complet randomisé avec trois répétitions espacées les unes des autres de 1,5 m. Les différentes doses et formes de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ont été appliquées en fumure de base avec un apport annuel de 50 kg K ha<sup>-1</sup> sous forme de KCl. De plus, 100 kg N ha<sup>-1</sup> sous forme d'urée ont été appliqués annuellement à raison de 1/3 au semis, 1/3 au tallage et 1/3 à la montaison du riz. La variété de riz WAB 56-125 (*Oryza sativa*) a été semée par poquets de 3 grains équidistants de 20 cm.

## Collecte des données et présentation des résultats

À la maturité des grains (environ 120 jours après germination), le riz a été fauché sur 8 m<sup>2</sup> de chaque micro-parcelle à partir de la surface de la terre. Après séchage et battage, les grains et la paille ont été pesés séparément et le taux d'humidité des

**Tableau 1 :** Caractéristiques physiques et chimiques du sol dans la couche 0–20 cm.

**Table 1:** Soil physical and chemical characteristics in the layer 0–20 cm.

Caractéristiques du sol	Valeurs
Argile (g kg <sup>-1</sup> )	250
Sable (g kg <sup>-1</sup> )	450
Limon (g kg <sup>-1</sup> )	300
pH (eau)	4,8
pH (KCl)	4,2
C organique (g kg <sup>-1</sup> )	14,0
Azote total N (g kg <sup>-1</sup> )	0,950
CEC (cmol <sup>+</sup> kg <sup>-1</sup> )	5,8
P-Bray I (mg kg <sup>-1</sup> )	6
K <sup>+</sup> (cmol <sup>+</sup> kg <sup>-1</sup> )	0,22
Ca <sup>++</sup> (cmol <sup>+</sup> kg <sup>-1</sup> )	0,12
Mg <sup>++</sup> (cmol <sup>+</sup> kg <sup>-1</sup> )	0,48
Al <sup>+++</sup> (cmol <sup>+</sup> kg <sup>-1</sup> )	0,87
Ca <sup>++</sup> : Mg <sup>++</sup>	1 : 4
K <sup>+</sup> : Mg <sup>++</sup>	1 : 2
Al <sup>+++</sup> : CEC (%)	15

grains a été noté. Les rendements grain (RDG) et paille (RDP) ont été calculés en ramenant les poids de grains à 14 % d'humidité. L'efficacité agronomique (EA) de chaque phosphate a été calculée comme suit :

$$EA = (RDG_x - RDG_0) / Dose_x \quad [1]$$

De même, les efficacités agronomiques relatives (EAR) ont été calculées en modifiant la formule de Morel et Fardeau (1991) en utilisant les rendements en lieu et place des exportations de l'élément nutritif P :

$$EAR = [(RDG_x - RDG_0) / RDG_x] \times 100 \quad [2]$$

RDG<sub>x</sub> représente RDG d'un traitement à la « Dose x » avec x = 50, 100 et 150 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> considéré chaque année pour chacun des fertilisants. RDG<sub>0</sub> est le RDG du traitement témoin (P0).

## Analyses statistiques

À l'aide du logiciel SAS, des analyses de variance ont été faites selon les modèles mixtes pour déterminer les valeurs moyennes de RDG par doses et sources de P en chaque année. Les valeurs moyennes des écarts de rendement des traitements par rapport au témoin ont été obtenues par comparaison multiple ajustée par le test de Tukey. Selon des modèles linéaires, ont été déterminées les valeurs moyennes de EA et de EAR qui ont été séparées par la méthode de la plus petite différence significative (ppds) au seuil de  $\alpha = 5\%$ .

## RÉSULTATS ET DISCUSSION

### Analyse des différentes pratiques de fertilisation phosphatée du riz pluvial sur les ferralsols d'Afrique de l'Ouest

Les valeurs moyennes des rendements en grain de riz par source et doses de P appliquées durant les trois années d'expérimentation ont varié de 1,37 t ha<sup>-1</sup> pour P0 à 1,93 t ha<sup>-1</sup> pour le traitement 300 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> avec Tg (*figure 1a*). Il existe des différences significatives (> ppds) entre le RDG obtenu dans le traitement témoin P0 et ceux des traitements Bu (150 et 300 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>), Ma (450 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>), TSP (50, 100 et 150 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>), Pa (450 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>), Ta (150 et 450 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>) ainsi qu'avec les rendements obtenus en présence de 300 et 450 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> de Tg. On constate également que l'accroissement des rendements en grain de riz a lieu à des doses plus élevées, telles 300 et 450 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> après des applications de Ma, Pa et Tg qu'avec Bu et Ta à la dose de 150 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>, ainsi qu'à l'application annuelle de 50 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> de TSP. De ce fait, l'application de ces dernières sources de P (Bu, Ta et TSP) pourrait constituer un avantage économique pour le riziculteur, surtout qu'aucune

différence significative (< ppds) n'a été observée entre les RDG suite à l'application de doses croissantes de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Des résultats similaires sont notés avec le rendement en paille (*figure 1b*) avec néanmoins des effets plus faibles des traitements que sur RDG et une réponse aux doses croissantes de P selon TSP. Les valeurs moyennes de RDP ont varié de 1,67 t ha<sup>-1</sup> (450 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> de Tg) à 2,52 t ha<sup>-1</sup> pour l'application annuelle de 150 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> de TSP. Cela traduit essentiellement un meilleur indice de récolte de Tg qui a induit un RDG des plus élevés.

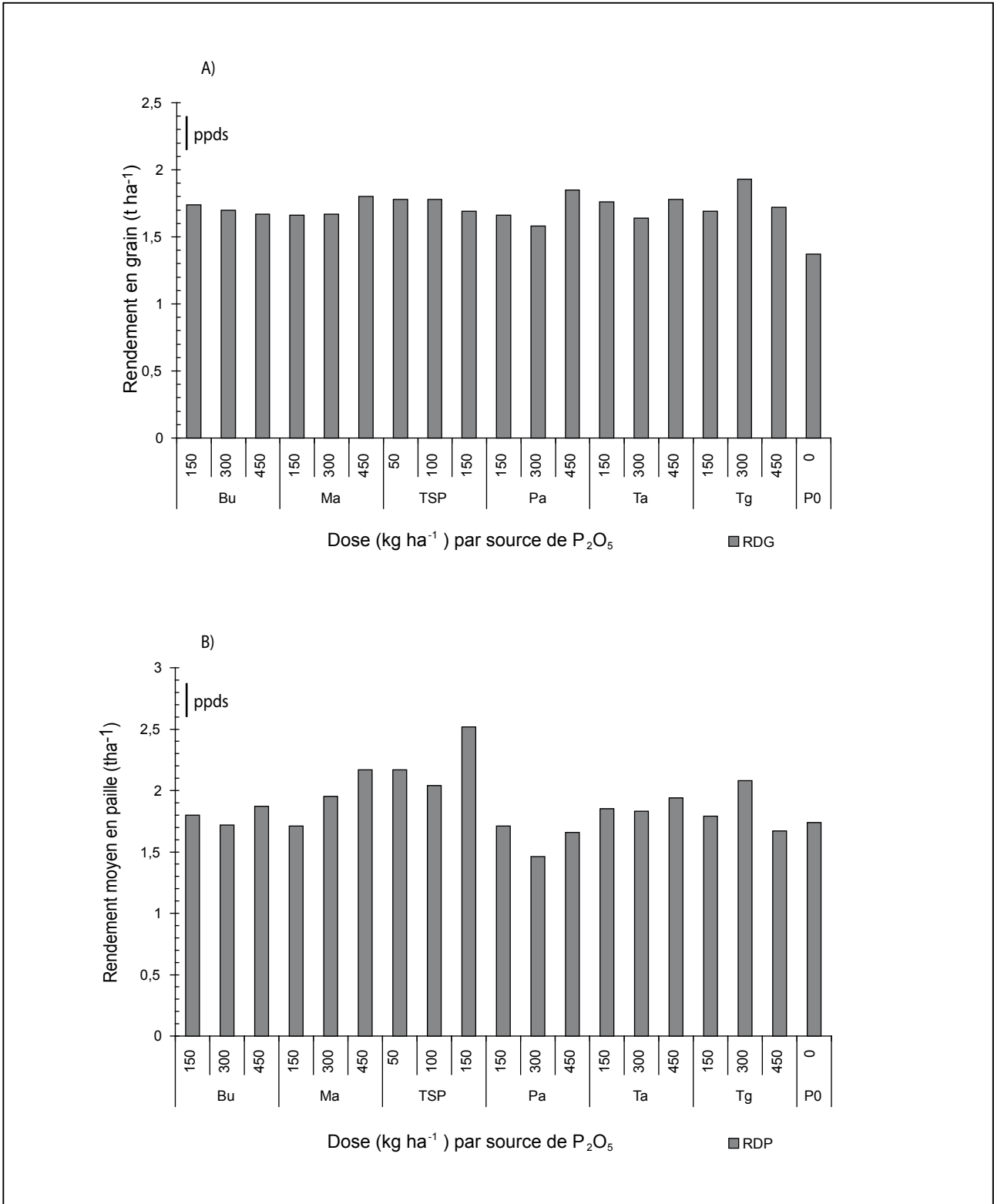
Les résultats présentés dans le *tableau 2* permettent de confirmer la réponse du riz à l'application des fertilisants phosphatés en indiquant de façon significative, TSP (0,41 t ha<sup>-1</sup>), Ta (0,39 t ha<sup>-1</sup>) et Bu (0,38 t ha<sup>-1</sup>) avec les plus grands écarts moyens de RDG par rapport à RDG du traitement témoin (P0) à la Dose 1. Cependant, les écarts les plus élevés durant l'expérimentation ont lieu dans les traitements Tg (0,57 t ha<sup>-1</sup>) et Ma (0,50 t ha<sup>-1</sup>) dans le cas de l'application de la dose unique de 300 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>. Ces valeurs sont significativement supérieures à celle observée avec le TSP (0,40 t ha<sup>-1</sup>) appliqué à 100 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>. Aussi, ce sont Pa (0,48 t ha<sup>-1</sup>), Ma (0,43 t ha<sup>-1</sup>) et Ta (0,41 t ha<sup>-1</sup>) qui ont induit les valeurs les plus élevées à l'application unique de 450 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>. C'est donc la dose 2 de Tg qui a permis le gain de rendement le plus élevé. En outre, ce résultat révèle, à l'observation des valeurs moyennes générales, que l'accroissement des doses des PN se traduit par une augmentation des gains de rendement qui peut être supérieure à celui du TSP aux doses 3.

Pourtant, il y a peu de différence entre l'utilisation du P des fertilisants phosphatés de diverses origines par le riz (*tableau 3*). À faible (Dose 1) et à forte dose (Dose 3), aucune différence significative n'est observée entre les valeurs moyennes de EA et de EAR en fonction des origines. Par contre, à la dose 2, les valeurs de EA et EAR obtenues pour Tg et Pa diffèrent significativement, les plus faibles valeurs étant pour Pa. De plus, EAR moyen de Ma a été significativement plus grande que celle obtenue par Pa à cette dose. Bien que les valeurs moyennes soient statistiquement similaires pour la dose 3, Tg pourrait induire des EA et EAR accrues respectivement de 13–57 % et 7–112 % par rapport aux autres sources de P.

Ces résultats illustrent la réponse du riz à l'application des fertilisants phosphatés dans les conditions agropédoclimatiques de l'étude, confirmant ainsi le caractère limitant de P lorsque la quantité de P extraite par la méthode Bray I est inférieure à 6 mg (kg terre)<sup>-1</sup>. Par ailleurs, la production limitée de paille par le riz confirme la contrainte potassium (*tableau 1*). En effet, un bon développement végétatif exigerait une plus grande disponibilité du potassium dans le sol (Roy *et al.*, 2006). Cette déficience et la dose de 50 kg K ha<sup>-1</sup> appliquée par an peuvent être mises en cause dans le manque de différence significative observé entre les RDG sous l'effet des doses croissantes de P. Les expérimentations de Sahrawat *et al.* (2001), conduites sur une autre parcelle du même site, qui ont fait apparaître des différences significatives entre les RDG en fonction des doses

**Figure 1** - Rendement moyen en grain (a) et en paille (b) par dose des différentes sources de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> appliquées.

**Figure 1** - Average yields of grain (a) and straw for different P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-sources per applying rates.



**Tableau 2** - Écart moyen de rendement en grain obtenus en trois ans selon les différentes sources et doses de P par rapport au traitement témoin (P0) ainsi que leur moyenne générale (MG) et l'erreur standard (ES).

**Table 2** - Average grain yield gaps for three years according to different sources and rates of P compared with check treatment (P0) as well as their grand mean (MG) and standard error (ES).

	Écart de rendements moyens en grain (t ha <sup>-1</sup> )					
	Dose 1		Dose 2		Dose 3	
	Dif	P>t	DIF	P>t	DIF	P>t
<b>Togo</b>	0,33	0,034	0,57	0,0003	0,35	0,024
<b>Mali</b>	0,29	0,056	0,50	0,0015	0,43	0,005
<b>Burkina</b>	0,38	0,015	0,33	0,032	0,30	0,052
<b>Taïba</b>	0,39	0,011	0,28	0,07	0,41	0,008
<b>Pa-Thiès</b>	0,29	0,056	0,21	0,17	0,48	0,002
<b>TSP</b>	0,41	0,008	0,40	0,008	0,31	0,040
<b>MG</b>	0,33		0,37		0,39	
<b>ES (dl)</b>	0,153 (148)					

Dose 1 = 50 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>/an de TSP et 150 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> en 3 ans de PN; Dose 2 = 100 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>/an de TSP et 300 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> en 3 ans de PN; Dose 3 = 150 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>/an de TSP et 450 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> en 3 ans de PN; dl= degré de liberté.

**Tableau 3**- Valeurs moyennes de l'efficacité agronomique (EA) et de l'efficacité agronomique relative (EAR) des différentes sources de P par dose.

**Table 3**- Mean values of the agronomy efficiency (EA) and the relative agronomy efficiency (EAR) for different sources of P per dose.

	EA (kg kg <sup>-1</sup> )			EAR (%)		
	Dose 1	Dose 2	Dose 3	Dose 1	Dose 2	Dose 3
<b>Togo</b>	6,55a	5,67a	2,33a	17,40a	28,85a	19,09a
<b>Mali</b>	5,91a	5,00ab	2,87a	17,96a	26,95a	23,15a
<b>Burkina</b>	7,57a	3,33ab	2,00a	20,94a	18,28ab	17,12a
<b>Taïba</b>	7,84a	2,80ab	2,73a	21,39a	13,62ab	22,56a
<b>PaThiès</b>	5,91a	2,13b	3,20a	13,06a	7,01b	17,83a
<b>MG</b>	7,00	3,83	2,54	18,85	19,29	18,93
<b>ppds<sub>05</sub></b>	4,73	3,21	2,79	13,48	17,42	17,20
<b>TSP</b>	8,18	4,09	2,12	22,37	21,06	13,18

Dose 1 = 50 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>/an de TSP et 150 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> en 3 ans de PN; Dose 2 = 100 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>/an de TSP et 300 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> en 3 ans de PN; Dose 3 = 150 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>/an de TSP et 450 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> en 3 ans de PN. Les lettres a et b indiquent les valeurs moyennes qui sont différentes de façon significative selon le test de Fisher; MG = moyenne générale.

croissantes de P en appliquant 100 kg K ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>, confirment l'intérêt conjoint de K. En effet, l'interaction du potassium avec le phosphore peut améliorer l'absorption des deux nutriments ainsi que celle de N par les cultures (Akram *et al.*, 2007). Une augmentation de la dose d'application de K à 100 kg ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> est donc souhaitable pour accroître l'efficacité de la fertilisation phosphatée dans les *hyperdystric ferralsols* en vue d'accroître le rendement du riz pluvial. La réponse croissante du riz en terme de RDP selon les doses d'application du TSP pourrait être l'effet de l'apport (1,4 %) de soufre (S) qu'il contient, car ce nutriment peut également être un facteur limitant des rendements dans les

sols acides de la zone forestière de l'Afrique de l'Ouest (Kang et Osiname, 1985). Cette analyse dénote l'importance des interactions de plusieurs nutriments pour la valorisation d'un fertilisant.

Les RDG obtenus, échelonnés entre 1,37 et 1,97 t ha<sup>-1</sup>, sont supérieurs à la moyenne, comprise entre 1 et 1,37 t ha<sup>-1</sup> observée en zone de forêt humide de la Côte d'Ivoire (Direction et contrôle des grands travaux-DCGTx, 1990). L'origine de ces rendements plus élevés peut être due à de nombreux facteurs (Sanders *et al.*, 1996 ; Gala *et al.*, 2007). On est en droit d'y ajouter l'influence des PN utilisés dans cette expérimentation. En effet, l'usage des PN n'est pas encore bien connu des riziculteurs de

cette zone et le comportement des variétés de riz demande à y être minutieusement analysé. Les rendements moyens de grain de riz, bien qu'influencés par l'application de  $P_2O_5$ , sont restés inférieurs à  $2 \text{ t ha}^{-1}$  alors que le potentiel de la variété WAB 56-125 est de  $4 \text{ t ha}^{-1}$ . Le rapport Ca/Mg échangeables dans le sol (*tableau 1*) est inférieur à 3 ce qui, pour certains (Yates, 1963), pourrait freiner l'absorption de P par les plantes et par conséquent, limiter la réponse du riz à l'application des différentes sources de  $P_2O_5$  durant l'expérimentation.

Par ailleurs, il existe une variabilité de la dose de réponse du riz à P selon les sources qui pourrait dépendre aussi de  $Ca^{++}$ . En effet, une forte teneur en cet élément peut induire un micro-milieu moins acide dans le sol, limitant la dissolution des PN (Chien et Menon, 1995); cependant, cette analyse théorique ne semble pas pouvoir être retenue dans le cas de nos ferralsols, les teneurs de  $Ca^{++}$  échangeable du sol étant limitées. Néanmoins, cela pourrait justifier la nécessité d'une dose plus faible de Bu que de Ma et de Tg pour bénéficier d'une réponse quasi certaine du riz, les teneurs respectives de CaO étant de 44,8 %, 43,1 % et de 36,4 %. L'insolubilisation provoquée par les doses croissantes de PN par l'ajout de  $Ca^{++}$  et la fixation de P par les oxydes de fer et d'aluminium telle que reconnue dans les sols acides (Akinrinde, 2006), les faibles teneurs du sol en K, Ca et probablement S ainsi que la faible dose d'application de K tout comme l'équilibre Ca: Mg seraient les facteurs qui réduisent les différences de rendement. Le TSP étant soluble, il n'a pas été concerné par les effets des apports de  $Ca^{++}$ . L'effet de la fertilisation phosphatée du riz dans ce type de *ferralsol* serait ainsi dépendant des cations échangeables  $K^+$ ,  $Ca^{++}$  et  $Mg^{++}$ .

Ces résultats laissent à penser que la solution pratique la plus adaptée, pour la fertilisation phosphatée du riz pluvial cultivé sur des hyperdystrics ferralsols en Afrique de l'Ouest, consisterait à appliquer la plus faible dose de  $P_2O_5$  pouvant induire un accroissement des rendements. Cette dose dépendrait des origines géographiques des PN. Ainsi, selon leur disponibilité, on peut proposer  $150 \text{ kg } P_2O_5 \text{ ha}^{-1}$  pour Ta et Bu,  $300 \text{ kg } P_2O_5 \text{ ha}^{-1}$  pour Tg et Ma ainsi que  $450 \text{ kg } P_2O_5 \text{ ha}^{-1}$  pour Pa en une application unique pour la période de trois ans. L'application annuelle du TSP recommandée est de  $50 \text{ kg } P_2O_5 \text{ ha}^{-1}$ .

Selon les travaux de Sahrawat *et al.* (1995), la relation entre rendement et doses de fertilisants phosphatés serait dépendante des variétés de riz cultivées. En fait, pour chaque culture, l'expérimentateur, puis l'agriculteur, sont confrontés à l'existence de variétés dites exigeantes et de variétés moins exigeantes. C'est pourquoi, tout autant que la prise en compte des facteurs cités dans la réponse du riz à la fertilisation phosphatée, la sélection variétale devient une étape majeure pour décider des doses d'application. Cette situation illustre la complexité de la fertilisation phosphatée en riziculture pluviale sur les sols acides de l'Afrique de l'Ouest; elle impose la recherche du couple variété-type d'engrais phosphaté le plus adapté à chaque condition agropédoclimatique associant ainsi le sol, les pratiques cultu-

rales qu'il reçoit et le climat. Le criblage d'un grand nombre de variétés est donc souhaité dans les conditions similaires à cette expérimentation pour un meilleur couplage entre les ressources génétiques et les différentes sources de P disponibles localement.

## Examen des alternatives de fertilisation phosphatée du riz pluvial sur les ferralsols d'Afrique de l'Ouest

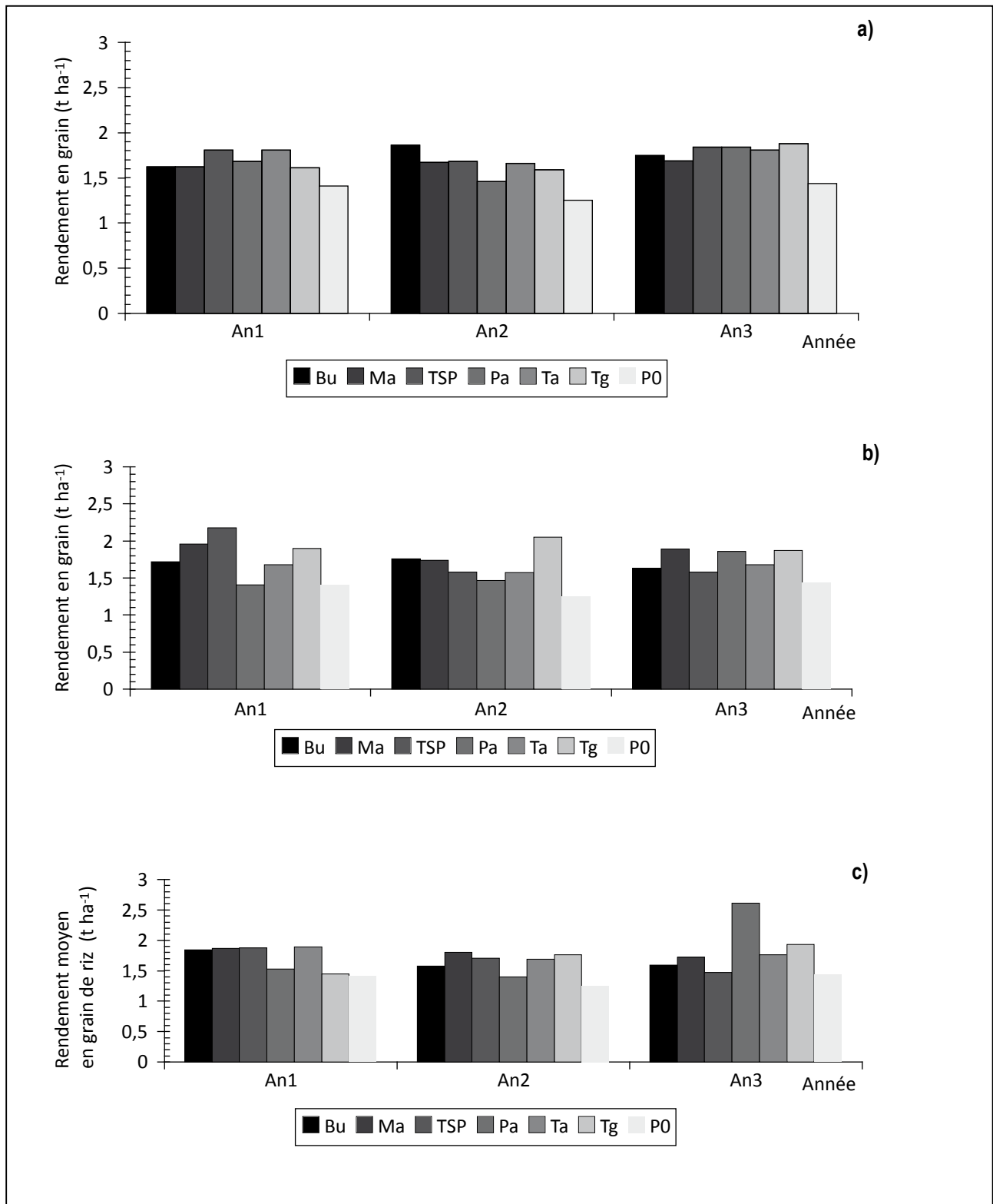
Pour une dose donnée de  $P_2O_5$ , à quelques exceptions près, les RDG obtenus n'ont pas été significativement différents d'une année à l'autre (*figure 2*). La *figure 2a* montre qu'en An1 sous l'effet de la dose 1, seules les sources TSP et Ta ont induit une différence significative par rapport à RDG de P0. Pour l'ensemble des années d'essais, et à l'exception de Tg et Pa en An2 ainsi que de Ma en An3, des effets similaires ont été observés pour toutes les autres sources de  $P_2O_5$ . De ce fait, pour les doses 1, le maintien de rendements élevés durant les trois ans a été essentiellement assuré par TSP et Ta. Par une démarche similaire, on peut identifier Ma et Tg pour les doses 2 (*figure 2b*). Enfin, aux doses 3, excepté Pa et Tg, toutes les sources de  $P_2O_5$  ont induit chacune un effet significatif par rapport à P0 en An1 (*figure 2c*). Les différences de rendement ont été réduites (Bu et TSP) ou se sont maintenues constantes (Ma et Ta) les années suivantes (An2 et An3).

Ces résultats expérimentaux autorisent à faire l'hypothèse selon laquelle le maintien de RDG élevés, avec un objectif de  $2 \text{ t ha}^{-1}$  au moins, peut être assuré par l'application de  $100 \text{ kg } P_2O_5 \text{ ha}^{-1}$  de TSP pour le RDG ( $2,18 \text{ t ha}^{-1}$ ) de An1 et celle de  $300 \text{ kg } P_2O_5 \text{ ha}^{-1}$  de Tg pour le RDG ( $2,05 \text{ t ha}^{-1}$ ) de An2 ainsi que l'application de  $450 \text{ kg } P_2O_5 \text{ ha}^{-1}$  de Pa pour assurer celui ( $2,50 \text{ t ha}^{-1}$ ) de An3. Pour les raisons économiques déjà soulignées, nous adopterons  $50 \text{ kg } P_2O_5 \text{ ha}^{-1}$  de TSP par an au lieu de  $100 \text{ kg } P_2O_5 \text{ ha}^{-1}$ , aucune différence significative des RDG n'apparaissant avec ces deux doses. La dose  $900 \text{ kg } P_2O_5 \text{ ha}^{-1}$  de PN serait indiquée pour trois années de riziculture. Cependant, en tenant compte des effets possibles déjà mentionnés de  $Ca^{++}$  sur la solubilité des PN, il serait préférable de faire ces apports annuellement: TSP en An1, Tg en An2 et Pa en An3. Les effets résiduels de l'apport excédentaire de l'An1 cumulés à l'effet de la nouvelle application devraient assurer les besoins du riz non plus pour 3 ans mais pour 5 années. Cependant, pour être recommandée, cette pratique devra être confirmée par une nouvelle expérimentation. Le cas échant, les possibilités d'une plus grande stabilité interannuelle des RDG en présence de Tg à raison de  $300 \text{ kg } P_2O_5 \text{ ha}^{-1}$  (*figure 2b*) et d'une efficacité relative accrue de l'engrais (*tableau 3*), ferait du phosphate du Togo un fertilisant phosphaté recommandable pour l'obtention de rendements élevés en grain de riz à une dose pour 3 années plus faible, inférieure à  $800 \text{ kg } P_2O_5 \text{ ha}^{-1}$  sur *hyperdystric ferralsol*.



**Figure 2 - Rendements moyens annuels aux doses 1 (a), 2 (b) et 3 (c).**

**Figure 2 - Annual Average yields at rate 1 (a), rate 2 (b) and rate3 (c).**



De telles recommandations se situent dans la fourchette des doses comprises entre 100 et 350 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> proposées par Roche *et al.* (1980) lorsqu'il évoquait la nécessité de « fumures phosphatées de correction » dans des sols sous climats tropicaux dont les teneurs de P extrait par la méthode Bray I sont inférieures à 10 mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (kg terre)<sup>-1</sup>.

## CONCLUSION

Cette recherche complète les observations collectées préalablement par l'ADRAO (Sahrawat *et al.* 1995; 1997; 1998) sur la fertilisation phosphatée des sources hydrosolubles en riziculture pluviale. Nos données expérimentales permettent de proposer des doses d'application de phosphates naturels disponibles en Afrique de l'Ouest qui offrent des possibilités d'accroître significativement les rendements du riz pluvial sur *hyperdystric ferralsol*. Ces résultats constituent ainsi un guide d'utilisation des PN de l'Afrique de l'Ouest selon leur disponibilité et contribuent à valoriser le concept d'apports des grandes quantités de PN dans la majorité des situations agropédologiques des sols acides (Sanchez et Uehara, 1980), notamment en riziculture pluviale sur les *hyperdystrics ferralsols*.

Néanmoins, il faut noter que dans ces conditions agropédologiques les efficacités agronomiques relatives moyennes restent inférieures à 30 % ce qui illustre une très faible utilisation des apports de P. Pour accroître les EAR, l'incorporation de la paille de riz récoltée (*figure 2b*) pourrait non seulement augmenter la teneur de la matière organique dans le sol, ce qui accroît la disponibilité du P natif (Adepetu et Corey, 1976; Tandon, 1987), mais permettrait de restituer partiellement les quantités de nutriments exportés dont celle de potassium (Tian, 1992). Cela devrait permettre d'atteindre des RDG au-dessus de 2 t ha<sup>-1</sup> avec un plus grand nombre de sources de P et notamment avec une application de 300 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> de Tg pour une riziculture continue sur trois ans.

En raison des interactions entre les éléments nutritifs au cours de l'élaboration de la récolte, une expérimentation complémentaire de fertilisation phosphatée est proposée, l'objectif étant d'atteindre des rendements en grains d'au moins 2 t ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> pour une riziculture pluviale continue durant cinq ans sur *hyperdystric ferralsol*. Elle consiste en l'application de PN du Togo à raison de 300 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> en association avec des apports de 100 kg K ha<sup>-1</sup> et/ou en incorporant la paille de riz. De telles pratiques devraient permettre une exploitation durable des parcelles rizicoles et ainsi réduire la pratique de l'agriculture itinérante en sauvegardant la forêt; condition pour une agriculture et surtout pour un développement durable. Si la faisabilité économique de l'usage des PN mérite d'être évaluée pour les pays comme la Côte d'Ivoire qui ne disposent pas de gisement de PN, il n'en reste pas moins indispensable pour un État de se placer dans une situation où il sera en mesure de satisfaire les besoins

alimentaires de ses populations (Hervieu, 1996). Et en ce sens, le destin de P ne se différenciera guère de celui de K ou de N tout aussi indispensable pour produire plus et continûment.

## BIBLIOGRAPHIE

- Akram, A. Fatima, M. Ali, S. Jilani, G. et Asghar, R. 2007. Growth, yield and nutrients uptake in response to integrated phosphorus and potassium management. *Pakistan Journal of Botany*, 39 (4): 1083–1087.
- Adepetu, J. A. et Corey, R. B. 1976. Organic phosphorus as a predictor of plant available phosphorus in soils of southern Nigeria. *Soil Science*. 122: 159–64.
- ADRAO 1999. Points saillants des activités. Page 23–29. ADRAO (eds). Sur la voie de vaincre l'acidité des sols en riziculture. Rapport annuel 1999, Bouaké.
- Akinrinde, E. A. et Gaiser T. 2006. Difference in the performance and phosphorus-use efficiency of some tropical rice (*Oryza sativa* L.) varieties. *Pakistan Journal of Nutrition*, 5 (3): 206–211.
- Akinrinde, E. A. 2006. Strategies for improving crops' use-efficiencies of fertilizer nutrients in sustainable agricultural systems. *Pakistan Journal of Nutrition*, 5 (2): 185–193.
- Bremner, J. M. 1965. Total nitrogen. Pages 1149–1178. C. A. Black (ed). *Methods of Soil Analysis. Part 2: Chemical and Microbiological Properties*. Agron. Series 9. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin.
- Chien S. H et Menon R. 1995. Agronomic evaluation of modified phosphate rock products: IFDC's experience. *Fertilizer Research* 41: 197–209.
- CPCS-Commission de pédologie et de cartographie des sols. 1967. Classification des sols. Tableaux des classes, sous-classes, groupes et sous-groupes des sols. Service de classification des sols. INRA, France. 96 p.
- Debrah, S. K. 2000. La place du phosphate naturel de Tilemsi dans l'initiative pour la fertilité des sols au Mali. Rapport provisoire. IFAD-International Fund for Agricultural Development Afrique, Togo 20 p.
- Diatta S et Sibani P. 1997. Évolution des sols sous culture continue: le cas des sols rouges ferrallitiques du sud Sénégal. Pages 221–229. G. Renard, A. Neef, K. Beker and M. Von Oppen (eds.). *Soil Fertility Management in West African Land Use Systems*. Proc. Niamey, Niger, 4–8 March 1997. Margraf Verlag, Allemagne.
- DCGTx. 1990. Filière riz. International Inc et DCGTx, Abidjan. 269 p.
- Doll, E.C. and Lucas, R.E. 1973. Testing soils for potassium, calcium and magnesium. et 133–151, Walsh *et al.* (eds). *Soil testing and plant analysis*. Soil Science Society of America Journal, Madison.
- Gala, B. T. J. Camara, M. Assa, A. et Kéli, Z. J. 2007. Problématique de l'utilisation des engrais minéraux dans les zones de production du riz: cas du Centre Ouest de la Côte d'Ivoire. *Agronomie Africaine*, XIX (2): 173–184.
- Hervieu, B. 1996. *Du droit des peuples à se nourrir eux-mêmes*. Flammarion. Paris.
- Hodge, A. 2000. Microbial ecology of the arbuscular mycorrhiza. *FEMS Microbiology Ecology*, 32: 91–96.
- ISSS, ISRIC et FAO. 1998. World reference base for soil resources. World soil resources reports, 84, FAO, Rome. 88 p.
- Jurion, F. et Henry, J. 1969. Can primitive farming be modernized? INEAC. Ser. Hors. Institut national pour l'étude agronomique du Congo, Bruxelles. 445 p.
- Kamprath, E. J. 1973. Phosphorus. Pages 138–161. A review of soil research in tropical latin America. North Carolina Agriculture Experimental station Technical Bulletin 219.
- Kang, B. T. et Osiname, O. A. 1985. Micronutrient problems in tropical Africa. Pages 131–150 in L. G. Paul (ed). *Micronutrients in Tropical Food Crop production*. Development in Plant and Soil Sciences, Series 14. Dordrecht, Les Pays-Bas.

- Lal, R. et Cummings, D.J. 1979. Clearing a tropical forest 1. Effects on soil microclimate. *Field Crops Research*. 2: 91–107.
- Lopes, A. S. et Guilherme, L. R. G. 1994. Solos sob cerrado: Manejo da fertilidade para produção agropecuária. *Boletim Técnico*, 5, 2a edição. ANDA, São Paulo, Brésil.
- Marschner, H. et Cakmak, I. 1986. Mechanism of phosphorus-induced zinc deficiency in cotton. II. Evidence for impaired shoot control of phosphorus uptake and translocation under zinc deficiency. *Physiologia Plantarum*, 68 (3): 491–496.
- Mercier, J. R. 1991. La déforestation en Afrique. Situation et perspectives. Aix-en-Provence, France. Edisud. 178 p.
- Mokwunye, A. Jager, U. A. et Smaling, E. M. A. 1996. Restoring and maintaining the productivity of West African soils. Key to sustainable development. Misc. Fertilizer studies, n 14. Int. Fertilizer Develop. Center- Africa, Lomé, Togo.
- Morel, R. 1996. Les sols cultivés, 2<sup>e</sup> édition. Paris: Lavoisier. 389 p.
- Morel, C. et Fardeau, J.C. 1991. Phosphorus bioavailability of fertilizer: A predictive laboratory method for its evaluation. *Fertilizer Research* 28: 1–9.
- Prakash, T. R. et Badrinath, M. S. 1995. Utilization of rock phosphate as a source of phosphorus and calcium in acid soil. *Journal of the Indian Society of Soil Science* 43: 474–475.
- Robinson, J. S. et Syers, J. K. 1991. Effects of solution calcium concentration and calcium-sink size on the dissolution of Gafsa phosphate rock in soils. *Journal of Soil Science*, 42: 389–397.
- Roche, P. Grière, L. Babre, D. Calba, H. et Fallavier, P. 1980. Le phosphore dans les sols intertropicaux: appréciation des niveaux de carence et des besoins en phosphore. Publication N°2, IMPHOS–GERDAT, Institut mondial du phosphore, Paris. 48 p.
- Roy, R.N. Finck, A. Blair, G. J. et Tandon, H. L. S. 2006. Plant nutrition for food security. A guide for integrated nutrient management. FAO fertilizer and plant nutrition bulletins, FAO107288, Rome. 368 p.
- Sanchez, P. A. et Uehara, G. 1980. Management considerations for acid soils with high phosphorus fixation capacity. Pages 471 – 514. F. E. Khasawneh *et al.* (eds). The role of phosphorus in agriculture. ASA, CSSA and SSSA, Madison.
- Sanchez, P. A. et Salinas, J. G. 1981. Low input technology for managing oxisol and ultisol in tropical America. *Advances in Agronomy*. 34: 289–406.
- Sanchez, P. A. Shepherd, K. D. Soule, M. J., Place F. M. Bruesh, R. J., Izac, A.-M.N. Mokwunye, A. U. Kwesiga, F. R. Ndiritu, C. G. Woomer P. L. 1997. Soil fertility replenishment an investment in natural resource capital. Pages 1 – 46. Replenishment soil fertility in Africa. SSSA special publication, 51, SSSA. Madison, WI.
- Sanders, J. H. Shapiro, B. I. et Ramaswamy, S. 1996. The economics of agricultural technology in semi-arid sub-Saharan Africa. Johns Hopkins Univ. Press, Baltimore, MD. 303 pp.
- Sahrawat, K. L. Jones, M. P. et Diatta, S. 1995. Response of upland rice to phosphorus in an Ultisol in the humid forest zone of West Africa. *Fertilizer Research*, 41: 11–17.
- Sahrawat, K. L., Jones, M. P. et Diatta, S. 1997. Direct and residual phosphorus effects on yield and phosphorus efficiency of upland rice in an Ultisol. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 48: 209–215.
- Sahrawat, K. L., Jones, M. P. et Diatta, S. 1998. Plant phosphorus and rice yield in an ultisol of the humid forest zone in West Africa. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 29: 997–1005.
- Sahrawat, K. L. Jones, M. P. Diatta, S. et Adam, A. 2001. Response of upland rice to fertilizer phosphorus and its residual value in an ultisol. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 32(15 & 16): 2457–2468.
- Sahrawat, K. L. Jones, M. P. Diatta, S. et Sika, M. 2003. Long-term phosphorus fertilizer uptake, efficiency and recovering by upland rice on ultisol. *Communications in soil science and plant analysis*. 34 (7-8): 999–1011.
- Seyoum, E. et McIntire, J. 1987. Literature review and economic analysis of crop response to phosphate rock in Eastern Africa. ILCA Bull. N.29.
- Sharma, S. N. et Prasad, R. 2003. Yield and P uptake by rice and wheat grown in a sequence as influenced by phosphate fertilization with diammonium phosphate and Mussoorie rock phosphate with or without crop residues and phosphate solubilizing bacteria. *Journal of Agricultural Science*, 141: 359–369.
- Somado, E. A. Becker, M. Kuehme, R. F. Sahrawat, K. Vlek, P. 2003. Combined effect of legumes with rock phosphorus on rice in West Africa. *Agronomy Journal*. 95:1172–1178.
- Tandon, H. L. S. 1987. Phosphorus research and agricultural production in India. Fertilizer Development and Consultation Organization, New Delhi, India.
- Tian, G. 1992. Biological effects of plant residues with contrasting chemical compositions on plant and soil under humid tropical conditions. PHD thesis. Wageningen Agricultural University, Pays-Bas. 109 p.
- Walkley, A. et Black, I. A. 1934. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*. 37: 29–38.
- Warren, G. P. 1992. Fertilizer phosphorus, sorption and residual value in Tropical African soils. NRI Bull. Vol. 37, National resources institute, Chathan, RU, 91 p.
- Yates, R. A. 1964. Yield depression due to phosphate fertilizer in sugarcane. *Australian Journal of Agricultural Research* 15 (4): 537–547.
- Zapata, F. et Roy, R. N. 2004. Use of Phosphate Rocks for Sustainable Agriculture. Fertilizer and plant nutrition, bulletin13. FAO/IAEA, Rome. Online: <http://www.fao.org./docrep/007/y5053e00> [July 8, 2008].

