

Réponses du sorgho à l'apport de différentes formes de phosphate naturel de Tilemsi combiné avec les fertilisants solubles dans un système de production à faible intrant au Mali.

Aliou Badara Kouyate^{1*}, Alou Coulibaly¹, Ali Ibrahim², Sidiki Gabriel Dembele¹.

1. Institut polytechnique Rural de Formation et de Recherche Appliquée (IPR/IFRA).

2. International Crop Research Institute for Semi Arid Tropics (ICRISAT).

*Adresse de l'auteur correspondant : Aliou Badara Kouyate

Email: aloubadarakouyate@yahoo.fr

RESUME: La déficience en phosphore assimilable est l'une des contraintes majeures à la production céréalière au Mali. L'objectif de cette étude est d'évaluer les effets combinés du phosphore naturel de Tilemsi (PNT) avec des fertilisants solubles sur la solubilité du PNT, les performances agronomiques du sorgho et les propriétés chimiques du sol. L'étude a consisté à la comparaison de quatre (4) types de fertilisation à trois (3) niveaux de variation 0 kg ha⁻¹; 11 kg ha⁻¹, et 16 kg ha⁻¹ de phosphore disposé dans un dispositif factoriel organisé en bloc randomisé complet avec trois répétitions. L'association du PNT avec le sulfate d'ammonium (NH₄)₂SO₄ a entraîné une augmentation significative des rendements grains et biomasse pendant les deux années d'étude. L'augmentation de la dose d'apport du phosphore a augmenté le rendement grain de 29 % en moyenne. L'application combinée du sulfate d'ammonium (NH₄)₂SO₄ avec le PNT a augmenté significativement le taux de phosphore assimilable et les indices de l'assimilabilité du phosphore provenant du PNT. Ces résultats démontrent la possibilité d'améliorer la production du sorgho au Mali avec l'utilisation combinée de phosphore naturel de Tilemsi et les engrais soluble notamment le sulfate d'ammonium.

Mots Clés : Phosphore naturel, sorgho, solubilité, productivité, Mali

I. INTRODUCTION

La déficience en phosphore est largement considérée comme la contrainte biophysique majeure à la production céréalière dans une grande partie des régions semi-aride et subhumide de l'Afrique (Bationo *et al.*, 1996). L'apport de phosphore est une nécessité absolue sans lequel l'application d'autres éléments que le phosphore n'entraînera pas un accroissement de rendement des cultures dans ces régions (Sedogo *et al.*, 1991).

L'intensification de la production agricole dans les pays Sahéliens nécessite l'apport de phosphore non seulement pour augmenter la productivité mais aussi pour améliorer le niveau du phosphate dans les sols afin d'éviter d'avantage la baisse de la fertilité des sols. Ainsi, il est nécessaire d'explorer des méthodes alternatives d'apport de phosphore (P). Nombreuses études ont été conduites pour évaluer l'impact de la combinaison du phosphate naturel de Tilemsi (PNT) avec les fertilisants solubles ou la matière organique afin d'améliorer la fourniture du phosphore soluble nécessaire à la croissance des cultures. Les résultats issus de ces études ont montré

des effets positifs de cette combinaison sur l'efficacité agronomique des phosphates naturels à faible réactivité.

Ainsi, Chien *et al.* (1987) ont apporté que de petites quantités de phosphate soluble agit comme starter dose pour la plante jusqu'à ce que le P du PNT devient disponible pour la plante. Cette dose initiale de phosphate hydrosoluble stimule le développement racinaire qui favorise l'utilisation du P provenant du phosphate naturel. Selon Fageria *et al.* (2010), la combinaison du PNT et du sulfate d'ammonium améliore la dissolution du PNT et la libération du P. Le sulfate d'ammonium au de-là de l'approvisionnement d'une quantité importante d'azote (N) et de soufre (S), acidifie le sol créant ainsi un environnement favorable pour la dissolution du PNT. Les mêmes auteurs ont également rapporté que le pH du sol décroît linéairement avec l'application du N par le sulfate d'ammonium et l'urée. Cependant l'amplitude de la baisse du pH est plus importante avec le sulfate d'ammonium que l'urée (Fageria *et al.*, 2010).

Il semble évident que l'apport d'une quantité importante de nutriment (N et P) améliore le développement de la plante, créant un gradient de concentration à travers l'accroissement de la demande en P. Il est donc important de déterminer l'impact de l'association du PNT avec les engrais acidifiants comme le $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ et le KCl ainsi que la dose de PNT qui permet d'améliorer sa solubilité de façon significative et son efficacité agronomique dans un écosystème caractérisé par une pluviométrie faible et aléatoire comme la zone Sahélienne du Mali.

L'objectif de cette étude est d'évaluer les effets combinés du PNT avec des fertilisants azoté et potassique à différentes doses d'apport sur la solubilité du phosphore naturel, les propriétés chimiques du sol et les performances agronomiques du sorgho.

II. MATERIELS ET METHODES

2.1 Site de l'étude

L'étude a été menée à Konobougou localisé entre le 12° 55' Nord et 6° 46' Ouest dans la zone Sahélienne du Mali. La moyenne annuelle des pluies varie entre 500 et 700 mm (Kablan *et al.*, 2008). La longueur de la saison des cultures est de 90 -100 jours. Les sols sont à dominance sablo-limoneuse.

2.2 Dispositif expérimental et collecte des données

L'essai a été conduit sur un dispositif factoriel organisé en bloc randomisé complet. Les facteurs étudiés sont : type de fertilisation à 4 niveaux qui sont : (i) PNT granule (P), (ii) PNT granule avec KCl (P+K), (iii) PNT granule avec $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (P + SAM) et (iv) PNT granule avec KCl et $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (P + K + SAM). Le deuxième facteur est la dose d'apport du PNT (P) à 3 niveaux de variation : (i) 0 kg ha⁻¹ (témoin) ; (ii) 11 kg ha⁻¹ (dose recommandée), et (iii) 16 kg ha⁻¹ (dose standard pour le site de l'étude). Il est à noter que les fertilisants ont été épandus et incorporés avant le semis.

Les dimensions de chaque parcelle expérimentale est de 5 m x 5 m. Les semences de la variété améliorée du sorgho CSM 65 (90-100 jours à maturité) ont été semées après les premières pluies utiles d'environ 20 mm en 2013 et 2014. L'écartement entre le semis est 70 cm x 50 cm. Deux semaines après le semis, les plants ont été démarriés à 2 plants par poquet. Les désherbages à la daba ont été effectués au démarriage et 5 semaines après le démarriage.

A la maturité, les panicules et les tiges du sorgho ont été récoltés sur un carré de rendement de 4m x 4 m. Les paramètres suivants ont été évalués :

Les rendements grains et biomasse

Le rendement (Rdt) grain par unité expérimentale a été extrapolé en kg ha⁻¹ en utilisant la formule suivante :

$$\text{Rdt grain (kg ha}^{-1}\text{)} = \text{kg Rdt grain m}^{-2} \times 10\,000 \text{ m}^2. \quad (1)$$

La biomasse aérienne par unité expérimentale a été aussi extrapolée en kg ha⁻¹ par la formule

$$\text{Rdt biomasse (kg ha}^{-1}\text{)} = \text{Rdt en Kg de la biomasse m}^{-2} \times 10\,000 \text{ m}^2. \quad (2)$$

Efficacité Agronomique (EA) :

L'efficacité agronomique se définit comme la quantité de kg de grain obtenue par kg d'engrais (P) apportée.

$$\bullet \quad \text{EA} = \frac{\text{Rdt}_P - \text{Rdt}_T}{P_P} \quad (3)$$

Taux de Recouvrement (TR) :

Le taux de recouvrement d'un élément permet de connaître en pourcentage la quantité de cet élément que la culture a utilisé.

Le taux de recouvrement est calculé par la relation mathématique suivante:

$$\bullet \quad \text{TR (\%)} = \frac{(P)P_f - (P)P_{nf}}{(P)Q_t} \quad (4)$$

(P) P_f : P prélevé par les plantes de la parcelle fertilisée (P) p_{nf} : P prélevé par les plantes de la parcelle non fertilisée Q_t : quantité totale de P apportée par les fertilisants.

Taux de croissance de la plante (TCP)

Cinq échantillons de la plante sur chaque unité expérimentale ont été sélectionnés au hasard pour le taux de croissance des plantes à 3, 6 et 9 semaines après semis (SAP). Les échantillons ont été mis au four séchés à 80 °C pendant 72 H jusqu'à obtenir un poids sec constant.

$$\bullet \quad \text{TCP (g m}^{-2} \text{ d}^{-1}\text{)} = \frac{P_F - P_S}{T_2 - T_1} \text{ ou} \quad (5)$$

P_F : représente le poids frais et P_S : Le poids sec

Bilan partiel du phosphore

ΔP = Quantité de (phosphore) apportée par fertilisant – Prélèvement de (phosphore) par la plante (graine et biomasse) (6)

2.3 Prélèvement du sol et analyse de laboratoire

L'échantillonnage a été fait avec la tarière. Des échantillons composites ont été prélevés à 0 - 20 cm de profondeur avant l'application des engrais et à la récolte sur chaque unité expérimentale. Les échantillons ont été soigneusement séchés à l'air et tamisés avec un tamis de 2 mm de diamètre. Les échantillons tamisés ont été conservés dans des sacs en polythène pour les analyses chimiques. Ces analyses ont porté sur la détermination du pH eau (1/1), le phosphore assimilable a été déterminé par la méthode Bray 1, les bases échangeables par la méthode de l'acétate d'ammonium, l'azote totale par la méthode Nelson et Sommers. L'analyse des échantillons a été faite au laboratoire sol eau plante (unité d'analyse) de l'IER/ Sotuba.

2.4 Analyse statistique

Les données collectées ont été soumises à l'Analyse de la Variance (ANOVA) avec le logiciel « *Genstat statistical package 9th édition, 2006* ». En cas de différence significative, la séparation des moyennes a été faite en utilisant la plus petite différence significative (ppds). L'analyse de la corrélation a été faite entre les propriétés du sol et les paramètres du sorgho à la récolte.

III. Résultat

Tableau 1 : Effet des différentes formes de fumures et dose du phosphore sur les propriétés chimiques du sol

Années	2013			2014		
	pH	P (mg/kg)	Exch Ca(Cmol ₊ kg ⁻¹)	pH	P mg/kg	Exch Ca(Cmol ₊ kg ⁻¹)
Formes de Phosphate (FP)						
Témoin (Sans-P)	4,61	2,85	0,35	3,80	2,34	0,67
PNT granule	4,73	3,65	0,62	4,86	3,41	0,98
P+K	4,68	3,92	0,60	4,76	3,52	1,26
P+SAM	4,67	5,46	0,69	4,88	3,97	1,17
P+K+SAM	4,74	4,46	0,64	4,66	4,51	1,05
Ppds (0.05)	0,19	0,83	0,10	0,46	0,79	0,20
Fpr	0,65	<0,001	0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Doses de phosphore (TP) kg/ha						
0	4,60	2,93	0,35	3,87	2,52	0,72
11	4,65	4,42	0,67	4,93	3,82	1,15
16	4,72	4,86	0,72	4,97	4,32	1,19
Ppds (0.05)	0,15	0,64	0,08	0,36	0,61	0,15
Fpr	0,68	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Interaction (FP x TP)						
Fpr	0,87	0,06	0,005	0,25	0,10	0,07
CV (%)	4,30	21,20	19,10	10,60	23,30	20,30

3.1 Effet des traitements sur les propriétés chimiques du sol

Le type de fertilisation a significativement influencé le pH-H₂O du sol en deuxième année d'expérience comparé au témoin. Le pH-H₂O du sol a varié de 3,80 à 4,88, le traitement PNT avec sulfate d'ammonium (P + SAM) a enregistré la plus grande valeur de pH-H₂O. Le taux d'accroissement par unité comparé au témoin a été de 0,99 (Tableau 1).

L'augmentation du taux d'application du phosphore entraîne un accroissement de la valeur du P assimilable du sol. L'ajout du sulfate d'ammonium (SAM) au PNT a permis d'améliorer de façon significative le taux de P assimilable du sol au cours des deux années d'étude. Ainsi, les traitements P+SAM et PNT associé au chlorure de potassium et le sulfate d'ammonium (P +K+ SAM) ont donné la plus grande valeur de P assimilable du sol respectivement en 2013 et 2014 (Tableau 1).

Le calcium échangeable a été significativement influencé par les différents types de fertilisants durant les deux années d'étude. Le témoin a constamment donné les plus faibles valeurs de 0,35 et de 0,67 Cmol₊kg⁻¹ respectivement en 2013 et 2014, par contre aucune différence significative n'a été observée entre les autres traitements (Tableau 1).

3.2 Effets des traitements sur les rendements du sorgho

Le type de fertilisation a significativement influencé ($P < 0,001$) le rendement grain du sorgho dans l'ordre décroissant $P + SAM > P + K + SAM > P + K > PNT > \text{Témoïn}$, pendant les deux années. Une différence significative a été observée entre les traitements $P + SAM$ et $P + K + SAM$ comparé aux autres traitements le taux d'accroissement moyen du rendement grain avec les traitements ayant reçu le sulfate d'ammonium a été de 70 % (Tableau 2).

Le rendement biomasse a été significativement influencé par le type de fertilisation au cours de

l'étude (Tableau 2) dans l'ordre décroissant suivant $P + SAM > P + K + SAM > PNT > \text{Témoïn} > P + K$. Des interactions significatives ($p = 0.001$) entre le type de fertilisation et la dose d'apport sur le rendement biomasse durant les deux années ont été enregistrées (Tableau 2). L'augmentation du taux d'apport du P a permis une augmentation significative de la biomasse du sorgho durant les deux années de l'étude. Une augmentation générale de la biomasse a été observée du faible niveau d'apport (0 kg ha^{-1}) au plus élevée (16 kg ha^{-1}) pour le $P + SAM$, $P + K + SAM$ et $P + K$, tandis que pour le reste une légère baisse a été observée (Figure 1).

Tableau 2 : Effet des différentes formes de fumures et dose du phosphore sur le rendement grain et biomasse du sorgho

Année	2013		2014	
	Grain	Biomasse	Grain	Biomasse
Treatments	----- (kg ha ⁻¹) -----			
Formes de phosphore (FP)				
Témoïn (sans-P)	48,20	413	262	445
PNT Granule	58,10	702	338,20	713
P+K	82,90	367	253	441
P+SAM	132,40	969	457	986
P+K+SAM	89,80	920	405	949
Lsd (0.05)	26,67	288,80	91,30	297,40
Fpr	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Doses de phosphore (DP) kg/ha				
0	39,80	333	213	356
11	87,80	709	371	763
16	119,20	980	446	1001
Ppds (0.05)	20,66	223,70	70,70	230,40
Fpr	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Interaction FP x DP				
Fpr	<0.001	0,002	0,001	0,002
CV (%)	33,60	44,40	27,60	43,60

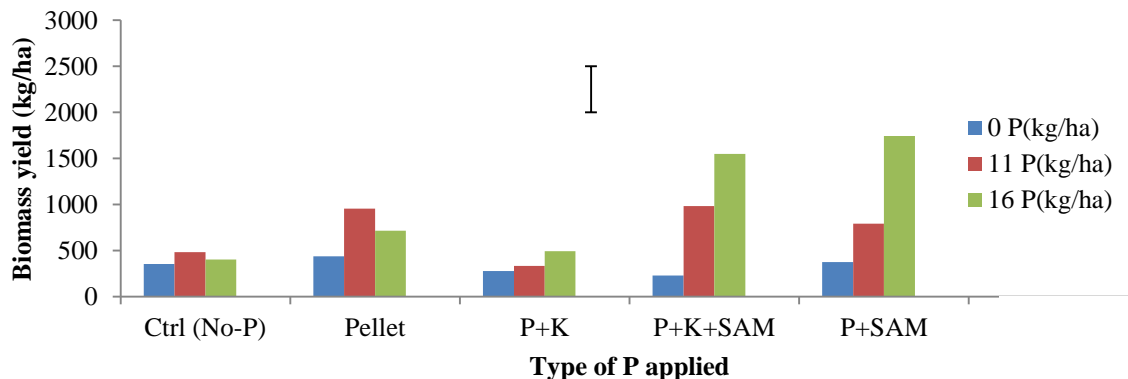


Figure 1 : Effet de l'interaction entre les formes et la dose d'apport du phosphore

3.2.3 Absorption du phosphore et de l'azote par le sorgho

Le type de fertilisation a significativement ($P < 0.003$) influencé l'absorption du phosphore (P) par le sorgho au cours des deux années d'étude (Tableau 3). L'interaction entre la dose d'application et le type de fertilisation a influencé le taux d'absorption du P par la graine au cours des deux années d'étude. Une tendance similaire a été observée avec l'absorption de P par la biomasse. Le taux d'absorption augmente avec la dose d'application du phosphore. L'apport combiné du P avec le SAM améliore de façon significative l'absorption du P par le sorgho. Ainsi, une différence significative a été observée entre le P

+SAM et P + K + SAM comparé aux autres traitements.

L'absorption de l'azote (N) par le sorgho a été significativement influencée par le type de fertilisation, aussi l'interaction type de fertilisation et dose d'apport a significativement influencé le taux d'absorption du N. Le taux d'adsorption du N augmente avec l'accroissement de la dose d'apport du P. Les traitements P + SAM et P + K+ SAM ont enregistré la plus grande valeur d'absorption du N par le sorgho.

Tableau 3 : Effet des différentes formes de fumures et dose du phosphore sur l'absorption du N et du P par le sorgho

	2013		2014	
	Grain	Biomasse	Grain	Biomasse
	-----kg/ha ¹ -----			
Formes de phosphore (FP)				
Témoin (Sans-P)	0,70	1,76	3,10	1,69
Granule	0,94	2,98	5,01	2,89
P+K	1,54	1,65	3,99	1,90
P+SAM	3,16	4,04	10,94	4,17
P+K+SAM	2,13	3,85	9,46	4,03
Ppds (0.05)	0,70	1,43	2,64	1,23
Fpr	<0.001	0.003	<0.001	<0.001
Doses de phosphore (DP) kg/ha				
0	0,59	1,25	2,81	1,33
11	1,97	2,96	7,38	3,15
16	2,53	4,36	9,32	4,33
Lsd (0.05)	0,54	1,11	2,05	0,95
Fpr	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Interaction FP x DP				
Fpr	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
CV (%)	42.80	52	42.20	43.40

3.3 Relation entre le phosphore assimilable du PNT, les paramètres de croissance de la plante et les propriétés du sol

Le Tableau 4 donne la relation entre le phosphore assimilable, les paramètres de croissance et quelques propriétés chimiques du sol. Une corrélation significative a été observée entre le P assimilable et le taux de croissance de la plante évalué à la période C1 et C2 (respectivement à 21- 42 JAS et 43 - 64 JAS) au cours de l'étude. De même la capacité d'échange cationique effective (CECE), l'absorption du P par la plante (graine et biomasse) et la hauteur du sorgho ont été significativement corrélés avec le P assimilable durant les deux années d'étude. Une corrélation positive a été observée entre le pH avec le P assimilable mais la relation n'était pas significative en première année d'étude (Tableau 4).

Tableau 4: Relation entre le phosphore assimilable, les paramètres de croissance et les propriétés du sol

Paramètres	Coefficient de Correlation (r)	
	2013	2014
C1	0.85***	0.61***
C2	0.66***	0.64***
CECE	0.73***	0.51***
A N G	0.77***	0.61***
A N B	0.57***	0.48***
A T N	0.68***	0.59***
Hauteur des plants	0.33*	0.36*
Exch.ac	-0.42**	-0.63***
pH	0.16 ^{NS}	0.65***

NS: non significatif, *** Significatif á $P < 0.001$, ** Significatif á $P < 0.01$, * Significatif á $P < 0.05$, C1: Taux de croissance á 21- 42 JAS, C2: Taux de

croissance á 43- 64 JAS, A N G : Absorption de l'azote par la graine, A N B : Absorption de l'azote par la biomasse, A T N : Absorption totale de N par la plante Exch.ac: Acidité d'échange.

La relation entre les rendements grain et biomasse et les paramètres de croissance du sorgho est décrite par l'analyse de la régression multiple. Cette analyse a démontré que la croissance rapide de la plante au cours de la période C1 (21- 42 JAS) et l'absorption du N par le sorgho ont significativement influencé le P assimilable du sol durant les deux années d'étude (Tableaux 5 et 6).

Tableau 5 : Analyse de la régression multiple entre le p assimilable les paramètres de croissance et les propriétés du sol en 2013.

Parameters	Coefficients	Erreur standard	Signification
Constant	-2.37	3.40	0.49
C1	0.4280	0.0980	< 0.001
C2	-0.0044	0.0158	0.78
ECEC	1.90	0.477	< 0.001
A N G	-57.9	23.5	0.01
A N B	-58.2	23.5	0.01
A T N	58.1	23.5	0.01
Hauteur	-0.188	0.354	0.59
Exch.ac	11.06	9.24	0.23
pH	0.636	0.643	0.32

$Y_{Av,P} = 0.4280 (\pm 0.0980) C1 + 1.90 (0.477) ECEC - 57.9 (23.5) A N G - 58.2 (23.5) A N B + 58.1 (23.5) A T N$ $P < 0.001$ $R^2 = 0.73$

Tableau 6: Analyse de la régression multiple entre le p assimilable les paramètres de croissance et les propriétés du sol en 2014.

Tableau 7 : Effet des formes de fumure et de la dose d'apport du phosphore sur les indices d'absorption du phosphore

	2013		2014	
	EAP (kg/kg)	TRP (%)	EAP (kg/kg)	TRP (%)
Formes de Phosphore (FP)				
Temoin (No-P)	-	-	-	-
Granule	1,90	4,80	11,99	20
P+K	4,92	2,00	7,16	15
P+SAM	10,46	8,10	28,07	28
P+K+SAM	5,26	9,10	23,13	40
Ppds (0.05)	2,99	5,20	5,92	10
Fpr	< 0.001	0.04	< 0.001	< 0.001
Doses de Phosphore (DP)				
0	-	-	-	-

Paramètres	Coefficients	Erreur Standard	Signification
Constant	-2.79	1.99	0.16
C1	0.0817	0.0366	0.03
C2	0.0126	0.0151	0.41
ECEC	0.761	0.452	0.10
A N G	-0.0853	0.0676	0.21
A N B	-0.121	0.103	0.24
A T N	0.2305	0.0425	0.002
Hauteur	0.250	0.48	0.63
Exch .ac	12.4	11.8	0.29
pH	0.518	0.262	0.06

$Y_{Av,P} = 0.0817 (0.0366) C1 + 0.2305 (0.0425) A T N$ $P < .001$ $R^2 = 0.72$

3.4 Effet des formes de fumure et de la dose d'apport du phosphore sur les indices d'absorption du phosphore

Le type de fertilisation a significativement influencé ($P < 0,01$) l'efficacité agronomique du phosphate (EAP) et le taux de recouvrement du phosphore (TRP) au cours de l'étude. En 2013, l'application de P + SAM a significativement ($P < 0,001$) donné la plus grande valeur pour le EAP comparé á P + K+ SAM ; P + K ; PNT granule et le témoin. Cependant, aucune différence significative n'a été observée entre P+K+SAM et P+K, alors qu'ils sont significativement supérieurs au PNT apporté seul sous forme granule pour le EAP. Aucune différence n'a été observée entre le P+SAM et le P+K+SAM mais les valeurs obtenues avec les deux étaient significativement supérieures á celui de P+K. En 2014 pour le EAP, P + SAM et P + K + SAM ont donné des valeurs significativement supérieures ($P < 0.05$) aux valeurs obtenues avec l'apport du PNT et le PNT avec le KCl.

11	5,15	5,70	16,73	22,90	
16	6,12	6,30	18,45	28,70	
Lsd (0.05)	2,11	3,60	4,19	7,50	
Fpr	0.34	0.74	0.39	0.12	
Interaction Doses de P(kg ha⁻¹)					
Pellet	11	1.90	5.60	16.21	23.60
	16	1.88	4.00	7.77	16.30
P+K	11	4.67	2.30	13.70	20
	16	5.16	1.60	1.61	10
P+SAM	11	8.65	5.60	20.77	17
	16	12.26	11	35.37	39
P+K+SAM	11	5.36	9.30	16.23	31
	16	5.16	9	30.02	49.30
Ppds (0.05)	4.23	7.39	8.38	15	
Fpr	0.50	0.53	<0.001	0.009	
CV (%)	43.00	69.90	27.20	33.40	

3.5 Effet des formes de fumure et de la dose d'apport du phosphore sur le bilan partiel du phosphore

L'évaluation du bilan partiel du phosphore au cours des deux années d'étude a démontré que durant les deux années d'étude, un bilan négatif a été observé sans apport de P et l'exploitation minière du sol a été plus prononcée en deuxième année d'expérience comparée à la première.

L'application de P à la dose recommandée (11 kg ha⁻¹) donne un bilan partiel positif en P pour tous les traitements mais la quantité de P restant dans le sol décroît avec la mise en culture. La même tendance a été observée quand le P a été apporté à 16 kg ha⁻¹. Cependant, la quantité résiduelle de P à 16 kg ha⁻¹ était plus importante qu'à 11 kg ha⁻¹ durant les deux années sauf pour P+K (Tableau 7).

Tableau 7 : Effet des formes de phosphore et la dose d'application du P sur le bilan partiel du P

Formes de P	Doses de P (kg ha ⁻¹)	Bilan partiel du P (kg ha ⁻¹)	
		2013	2104
Granule	0	-0.53	-1.18
	11	10.30	8.73
	16	14.75	13.18
P+K	0	-0.27	-1.35
	11	10.43	8.79
	16	10.05	8.71
P+SAM	0	-0.37	-1.02
	11	10.05	8.71
	16	13.70	10.47
P+K+SAM	0	-0.31	-0.44
	11	9.65	7.20
	16	13.98	7.50

IV DISCUSSION

4.1 Effet des traitements sur les propriétés chimiques du sol

Le pH-H₂O est le facteur déterminant la disponibilité ou de l'assimilabilité des éléments minéraux par la plante notamment le phosphore (Rahman et Ranamukhaarachi, 2003). Il affecte à la fois l'absorption la désorption et la disponibilité du phosphore pour la plante. Le pH du sol au début de l'expérimentation était fortement acide (4,15). Cependant une augmentation du pH a été enregistrée avec l'application du PNT surtout en deuxième année de l'expérimentation comparée au témoin. L'accroissement de la valeur du pH avec l'application du PNT s'explique par son pouvoir chaulant, résultant de la dissolution du PNT entraîna la libération des cations basiques. L'apatite, est le minéral principal qui entre dans la composition des phosphates naturels, le PNT, est une apatite du type Ca-P qui a donc un potentiel de fournir du Ca et du Mg en présence des conditions favorables à sa dissolution. Zin *et al* (2005) ont apporté que le taux de Ca des PNs varie entre (24-33%), qui est un taux suffisant pour accroître le pH du sol et la capacité d'échange cationique effective (ECEC) et qui en conséquence induisent un effet positif sur la croissance et le rendement de la culture.

Les valeurs de P assimilable obtenues ont été significativement influencées par le type d'amendement apporté durant les deux années d'étude. Le sulfate d'ammonium (SAM) en plus d'apporter une quantité importante de N et de S a aussi un effet acidifiant sur le sol, d'où la création de condition favorable pour la dissolution du phosphate

naturel (PN) (Prochnow *et al.*, 2006; Rivaie *et al.*, 2008). Le sulfate d'ammonium est un fertilisant azoté à réaction acide quand il est associé au PNT améliore sa dissolution par la libération d'ion H^+ et la neutralisation des ions OH^- . Mowo, (2000) a apporté que l'apport d'éléments nutritifs azoté améliore la croissance de la plante, créant un gradient de concentration et une augmentation de la demande en P. L'accroissement de la demande de P assimilable favorise la dissolution du PN et l'augmentation de la quantité P assimilable du sol.

L'apport des fertilisants a eu un effet significatif sur le calcium échangeable durant les deux années d'étude avec les valeurs élevées obtenues avec les parcelles ayant reçu le PNT. La libération des ions basiques comme le Ca et le Mg provenant de la dissolution du phosphate naturel de Tilemsi a contribué à augmenter de façon significative le taux de calcium échangeable des parcelles ayant reçu le PNT. Ce résultat est en concordance avec celui de Wright *et al.* (1991) qui a observé une concentration élevée de Ca de la solution du sol suivant l'application du phosphate naturel de Caroline du Nord. De la même manière l'augmentation du taux d'apport du PNT a entraîné une augmentation du taux de Ca suite à l'apport de quantité importante de $CaCO_3$. Le taux élevé de Ca obtenu en deuxième année avec l'apport du PNT s'explique par la dissolution continue du PNT et la libération de plus de cation Ca dans la solution du sol. Des observations similaires ont été faites par Akande (2011) qui a observé une augmentation régulière du Ca de la solution du sol après application du phosphate naturel (PN) du Nigeria.

4.2 Effet des traitements sur le rendement grain et biomasse du sorgho

Les traitements PNT plus le sulfate d'ammonium (P+SAM) et le PNT plus le chlorure de potassium et le sulfate d'ammonium et (P+ K + SAM) ont produit les rendements biomasse et grain les plus élevés durant les deux années de l'étude. L'effet combiné des éléments majeurs tels que l'azote, le phosphore, et le potassium entraîne une augmentation du rendement grain surtout apporté sur un sol très peu fertile. Wortmann *et al.* (2007) ont observé une augmentation du rendement biomasse et grain du sorgho par addition du N et P fertilisants.

Le mélange du sulfate d'ammonium avec le PNT a permis une augmentation significative du rendement grain comparé à l'apport seul du PNT et le PNT associé au chlorure de potassium (KCl). L'augmentation du rendement grain est due à la croissance rapide des plants qui résulte d'un

développement rapide, précoce et fournit du système racinaire qui s'explique par la synergie d'absorption des éléments N et P par la plante. La combinaison du PNT avec un fertilisant azoté entraîne une libération plus rapide et améliore ainsi l'absorption des nutriments par la plante. Selon la FAO (2004), l'augmentation de l'efficacité du PNT quand il est apporté sous forme de mélange peut être attribuée à un développement précoce du système racinaire du à la disponibilité du P assimilable et conséquemment, améliore l'exploration racinaire ou l'absorption du phosphore apporté. Le rendement grain relativement élevé avec le P+SAM que le P+K +SAM est du à la différence de quantité de sulfate d'ammonium qui est plus élevée pour le premier que pour le second. Ainsi plus la quantité de sulfate d'ammonium apportée est importante plus élevée est la dissolution du PNT et la libération du P assimilable dans la solution du sol et aussi la probabilité ou la chance d'interception des éléments par les racines.

Au cours de cette étude le mélange du PNT avec le sulfate d'ammonium (SAM) a permis une augmentation du rendement grain du sorgho jusqu'à 70 % sur le témoin. Un résultat similaire a été obtenu par Shahandeh *et al.* (2004) qui ont apporté un accroissement du rendement grain du mil à hauteur de 89 % avec le PNT comparé au témoin. Bollan *et al.* (1990) ont apporté que l'incorporation du PN assure une libération constante (stable et équilibrée) du P sur une longue période et aussi fournit une densité racinaire importante à la plante.

Le rendement grain a été significativement ($P < 0.001$) et positivement corrélé avec le taux de phosphore assimilable ($r = 0.72$ et 0.56) durant les deux années de l'étude. L'analyse de la régression multiple a démontré que le phosphore assimilable a significativement entraîné une augmentation du rendement grain en 2013 comparé aux autres propriétés du sol. Ce résultat est conforme avec ceux apportés par Teng et Timmer (1994). Mokwunye *et al.* (1996) ont apporté que la déficience en phosphore est la principale contrainte biophysique pour la production agricole dans une grande partie des régions sub-humide et semi-aride de l'Afrique. Le phosphore stimule la formation et le développement précoce des racines et la capacité de la plante à absorber l'eau et les autres nutriments (Schachtman *et al.*, 1998).

4.3 Relation entre le phosphore assimilable et les paramètres de croissance du sorgho

Une corrélation positive et significative ($P < 0.001$) a été observée entre le phosphore assimilable et le taux de croissance du sorgho (C),

l'absorption du N par le sorgho et la CECE du sol au cours des deux saisons. L'analyse de la régression multiple a montré que la rapidité de croissance du sorgho surtout au premier stade de développement (C1) et l'absorption de l'azote ont un impact significatif sur le taux de P phosphore assimilable de la solution du sol et donc de la dissolution du PNT durant les deux années comparé aux autres paramètres. L'impact significatif de la croissance du sorgho au premier stade (stade précoce) (C1) durant les deux années sur le P assimilable indique que l'augmentation du phosphore assimilable provenant du PNT est plus liée à la croissance rapide et globale de la plante qui a un impact positif sur l'absorption du P que l'acidité générée par le fertilisant azoté. L'impact du fertilisant azoté sur la disponibilité du P est plus important au début de la croissance de la plante. L'incorporation du $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ au moment du semis est donc la meilleure voie pour améliorer la solubilité du PNT et la disponibilité du P.

4.4 Effet des traitements sur les indices d'absorption du phosphore

L'évaluation de l'efficacité d'utilisation du phosphore assimilable au cours de cette étude a révélé que le traitement P+SAM a permis une utilisation plus efficace du P comparé aux autres traitements. L'association du PNT avec le sulfate d'ammonium $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ a permis une amélioration de la croissance de la plante une augmentation importante de l'absorption du P d'où une utilisation plus efficace obtenue avec le P+SAM.

Cette efficacité d'utilisation peut être attribuée à l'effet direct de la quantité importante de l'azote qui améliore la croissance de la plante.

Pour le taux de recouvrement du phosphore la combinaison PNT + KCl et le $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (P+K+SAM) a donné le taux de recouvrement du phosphore le plus élevé en deuxième année de l'étude. Cela peut être attribué à l'effet synergétique des 3 principaux éléments N, P, K de cette formulation.

4.5 Effet des traitements sur le bilan partiel du phosphore

Le bilan négatif observé avec le témoin (sans apport de P) s'explique par la faible fertilité observée sur le site de l'étude en début d'expérimentation. Le bilan négatif indique que la production du sorgho au cours des deux années s'est faite sur le stock de P initial pour soutenir la croissance et le développement du sorgho. L'apport de P avec les amendements à base de PNT un bilan positif a été obtenu durant les deux années. La valeur la plus élevée a été observée avec

le phosphate apporté à 16 kg ha^{-1} . Cette valeur élevée du bilan du P est due à la quantité substantielle de P apportée à un taux élevé qu'à un faible taux.

Un bilan positif élevé a été obtenu avec l'apport seul du PNT et le PNT associé au KCl comparé au PNT associé au $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. Cela peut s'expliquer par l'absorption et le recouvrement plus important avec le PNT associé au sulfate d'ammonium. La régression du bilan du P avec le temps s'explique par l'absorption importante du P et une augmentation plus importante des rendements grain et biomasse obtenus en seconde année d'expérimentation.

V) CONCLUSION

Au terme de cette étude il ressort que la combinaison du PNT avec le sulfate d'ammonium accroît la solubilité du PNT. L'augmentation de la solubilité du PNT est linéairement reliée à la quantité de sulfate d'ammonium apportée. L'amélioration de la solubilité du PNT semble être plus liée à l'apport de quantité importante de N et S nutriments qui améliore la croissance rapide de la plante et l'absorption du P assimilable qui en retour améliore la solubilité du PNT plutôt que l'effet acidifiant du sulfate d'ammonium.

Pour un sol à faible fertilité l'application combinée du sulfate d'ammonium avec le PNT même à un taux relativement faible peut être une alternative à l'utilisation des engrais phosphates hydrosolubles.

L'apport annuel du PNT à 16 kg ha^{-1} permet d'améliorer la croissance, le rendement et aussi les propriétés chimiques du sol. Cet apport annuel de 16 kg ha^{-1} est bénéfique à l'utilisation de quantité importante de PNT en un seul apport pour le site de l'étude.

REFERENCES

- [1] Bationo, A., Rhodes, E., Smaling, E.M.A. and Visker, C. (1996). Technologies for restoring soil fertility. In A.U. Mokwunye., A. de Jager., and E.M.A. Smaling. (eds). Restoring and maintaining the productivity of West African soils: key to sustainable development Misc. Fert. Stud. 14. Int. Fert. Dev. Ctr., Africa, Lome, Togo
- [2] Chien, S. H., Hammond, L. L. and Leon, L. A. (1987). Long-term reactions of phosphate rocks with an oxisol in Colombia. *Soil Sci* 144 : 257 – 265.
- [3] Fageria, N. K., Dos Santos, A. B. and Moraes, M. F. (2010). Influence of urea and ammonium sulfate on soil acidity indices in lowland rice production. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 41: 1565 – 1575
- [4] Kablan, R., Yost, R.S., Brannan, K., Doumbia, M.D., Traoré, K., Yoroté, A., Toloba, Y., Sissoko, S., Samaké, O., Vaksman, M., Dioni, L. and Sissoko, M. (2008). Aménagement en courbes de niveau “Increasing rainfall capture, storage, and drainage in soils of Mali”, *Arid Land Research and Management* 22 (1): 62 –80.
- [5] Rahman, M. M. and Ranamukhaarachchi, S. L. (2003). Fertility status and possible environmental consequences of Tista floodplain soils. *Thammasat Int. J. Sc. Tech* 8 (3): 111 – 117
- [6] Zin, Z.Z., Zulkifli, H., Tarmizi, A.M., Hammad, A.B., Khalid, H. and Raja, Z.R.O. (2005). Rock phosphate fertilizers recommended for young oil palm planted on inland soils. MPOB information series. ISSN 1511-7871. *Journal of Science and Technology* © KNUST
- [7] Prochnow, L. I., Quespe, J. F. S., Francisco, E. A. B. and Braga, G. (2006). Effectiveness of phosphate fertilizers of different water solubilities in relation to soil phosphorus adsorption, *Scientia Agricola* 63: 333 - 340
- [8] Rivaie, A., Loganathan, A. P., Graham, J. D., Tillman, R. W. and Payn, T. W. (2008). Effect of phosphate rock and triple superphosphate on soil phosphorus fractions and their plant availability and downward movement in two volcanic ash soils under *Pinus radiata* plantations in New Zealand”, *Nutr Cycl Agroecosyst* (82) : 75 - 88.
- [9] Wright, R.J., Baligar, V.C., Belesky, D.P. and Snuffer, J.D. (1991). The effect of phosphate rock dissolution on soil chemical properties and wheat seedling root elongation. *Plant and soil* 134: 21 - 30 Kluwer Academic Publishers.
- [10] Akande, M.O. (2011). Effect of phosphate rock on selected chemical properties and nutrient uptake of maize and cowpea grown sequentially on three soil types in south western Nigeria. *International Research Journal of Agricultural Science and Soil Science* 11: 471- 480.
- [11] Wortmann, C.S., Mamo, M. and Doberman, A. (2007): Nitrogen response of grain sorghum in rotation with soybean. *Agron. J.* 99 : 808 - 813.
- [12] FAO. (2004). Use of rocks phosphate for sustainable agriculture. *FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin* 13. ISSN 0532-0488
- [13] Shahandeh, H., Hons, F. M., Hossner, L. R. and Doumbia, M. D. (2004). Effect of Diamou Lime, Gypsum, and Tilemsi Phosphate Rock on Acid Soils of the Sudano-Sahelian Region of Mali, *Arid Land Research and Management*. 18: 77-88.
- [14] Bollan, 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. *Aust. J. Exp. Agric* 30: 297 – 313.
- [15] Teng, Y. and Timmer, V.R. (1994). Nitrogen and phosphorus interaction in an intensively managed nursery soil plant system. *Soil Sci Soc of America R. J* 58 (1): 232-238.
- [16] Mokwunye, A.U., De Jager, A. and Smaling, E.M.A. (1996). Restoring and maintaining the productivity of West African soils: key to sustainable development. IFDC-Africa, LEI-DLO and SC-DLO
- [17] Schachtman, D.P., Reid, R.J. and Ayling, S.M. (1998). Phosphorus uptake by plants: From soil to cell. *Plant physiology* 116: 447 - 453.