



Original Paper

<http://ajol.info/index.php/ijbcs>

<http://indexmedicus.afro.who.int>

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

Aliou Badara KOUYATE¹, Ali IBRAHIM², Idriss SERME^{3*} et Sidiki Gabriel DEMBELE¹

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

²Africa Rice Center (AfricaRice), Saint Louis, Senegal.

³Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles (INERA).

*Auteur correspondant ; E-mail: sermeidriss@yahoo.fr

Received: 19-09-2020

Accepted: 20-12-2020

Published: 31-12-2020

RESUME

La déficience en phosphore assimilable du sol est l'une des contraintes majeures à la production céréalière au Mali. L'objectif de cette étude est d'évaluer les effets de différentes formules de fumures à base de phosphore naturel de tilemsi (PNT) et d'engrais azotés et potassiques sur les propriétés chimiques du sol et les performances agronomiques du sorgho. Pour ce faire, un dispositif factoriel en blocs complètement randomisés a été implanté. Le premier facteur est composé des 4 formules de fumures (PNT granule (P), PNT granule avec KCl, PNT granule avec $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ et PNT granule avec KCl et $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) et le second facteur les niveaux de doses de phosphore ($0 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$; $11 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, et $16 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$). L'association du PNT avec le sulfate d'ammonium $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ a entraîné une augmentation significative des rendements grain et biomasse pendant les deux années d'étude. L'augmentation de la dose d'apport du phosphore a amélioré le rendement grain de 29% en moyenne. L'application combinée du sulfate d'ammonium $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ avec le PNT a augmenté significativement l'efficacité agronomique du PNT. Ces résultats montrent qu'il y a une possibilité d'améliorer la productivité du sorgho au Mali avec l'utilisation combinée de phosphore naturel de Tilemsi à la dose de $16 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ et les engrais solubles notamment le sulfate d'ammonium. Ainsi cette formulation pourrait être recommandée en culture de sorgho pour les producteurs à faible revenu en zone Sahélienne du Mali.

© 2020 International Formulae Group. All rights reserved.

Mots clés : Phosphate naturel, sorgho, solubilité, productivité, Mali.

Sorghum responses to different forms of Tilemsi rock phosphate combined with soluble fertilizers in a low-input production system in Mali

ABSTRACT

The deficiency in bioavailable phosphorus is one of the major constraints to cereal production in Mali. The objective of this study was to assess the combined effects of Tilemsi rock phosphate (PNT) with different doses of soluble fertilizers on the solubility of rock phosphate, the agronomic performance of sorghum and the chemical properties of the soil. The study consisted of the comparison of four (4) types of fertilization at three (3) levels of variation $0 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$; $11 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, and $16 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ of phosphorus arranged in a complete randomized

block with three replicates. The combination of PNT with sulfate ammonium $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ resulted in a significant increase in grain and biomass yields during the two years of the study. The increase of the rate of phosphate rock application lead to improve the sorghum grain yield by an average of 29%. The combined application of sulfate ammonium $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ with PNT significantly increased the phosphorus uptake indices from PNT. These results show that there is a possibility of improving the productivity of sorghum in Mali with the combined use of Tilemsi rock phosphate and soluble fertilizers, particularly sulfate ammonium.

© 2020 International Formulae Group. All rights reserved.

Keywords: Natural phosphorus, sorghum, solubility, productivity, Mali.

INTRODUCTION

La déficience en phosphore est largement considérée comme une contrainte biophysique majeure à la production céréalière dans une grande partie des régions semi-aride et subhumide de l'Afrique (Koné et al., 2010 ; Nakamura et al., 2013). Le phosphore constitue un facteur limitant de la productivité des sols sans lequel l'application d'autres éléments minéraux n'entraînera pas un accroissement de rendement des cultures dans ces régions.

Ainsi l'intensification de la production agricole dans les pays Sahéliens nécessite l'apport de phosphore (P) non seulement pour augmenter la productivité mais aussi pour améliorer le niveau de cet élément dans les sols afin d'éviter davantage la baisse de la fertilité des sols. Les engrais phosphatés hydrosolubles comme le phosphate d'ammoniaque sont généralement recommandés pour corriger la déficience en phosphore du sol. Cependant, la plupart des pays en voie de développement importent ces engrais, qui sont difficiles d'accès pour les producteurs à faible revenu. De fait il est nécessaire d'explorer des méthodes alternatives d'apport de phosphore (P). Plusieurs 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 nutrition phosphatée des cultures. Les résultats de ces études ont montré des effets positifs de cette combinaison sur l'efficacité agronomique des phosphates naturels caractérisés par leur faible réactivité (FAO, 2004 ; Gholizadeh et al., 2009).

Chien et al. (1987) ont rapporté que de petites quantités de phosphore soluble ajoutée au PN ont un effet starter sur la plante jusqu'à ce que le phosphore du PNT devienne 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-delà 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 ; Serme et al., 2015).

Il est 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. Par conséquent, 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'augmenter sa solubilité et améliorer de façon significative son efficacité agronomique dans un écosystème caractérisé par une pluviométrie erratique en termes de quantité et distribution dans la zone Sahélienne du Mali.

L'objectif de cette étude est d'évaluer les effets de différentes formules de fumures à base du PNT et d'engrais azotés et potassiques sur les propriétés chimiques du sol et les performances agronomiques du sorgho.

MATERIEL ET METHODES

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.

Matériel végétal

La variété locale de sorgho CSM 65 (*S. bicolor* L Monch) avec un cycle de 90-100 jours et un rendement en station de 2 t ha⁻¹ a été le matériel végétal utilisé au cours de l'étude.

Composition chimique des fertilisants utilisés

Le tableau 1 donne la composition chimique des fertilisants utilisés lors de l'étude Dispositif expérimental et collecte des données

L'essai a été conduit sur un dispositif factoriel en bloc complètement randomisé. Le premier facteur est composé de formules de fumures à base de PNT associés au sulfate d'ammonium et au chlorure de potassium.

- (i) PNT granule (P),
- (ii) (ii) PNT granule avec KCl (P+K),
- (iii) (iii) PNT granule avec (NH₄)₂SO₄ (P + SAM) et
- (iv) PNT granule avec KCl et (NH₄)₂SO₄ (P + K + SAM).

Le deuxième facteur est la dose d'apport de PNT à 3 niveaux : (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). Les fertilisants ont été épandus et incorporés avant le semis.

Les dimensions des parcelles élémentaires expérimentales sont de 5 m x 5

m. Le semis de la variété améliorée du sorgho CSM 65 (90-100 jours à maturité) a été réalisé après les premières pluies utiles d'environ 20 mm en 2013 et 2014. L'écartement de semis était 70 cm x 50 cm. Deux semaines après le semis, le démariage a été effectué en laissant 2 plants par poquet. Les désherbages à la daba ont été effectués au démariage et 5 semaines après le démariage.

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

Evaluation des rendements grains et biomasse

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

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

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.

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

Ea: Efficacité agronomique, Rdt_P: Rendement de la parcelle ayant reçu le phosphore, Rdt_T: Rendement de la parcelle témoin, P_P: Quantité de P apportée

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

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.

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

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

Estimation de l'absorption des nutriments par la plante

L'absorption du phosphore (P) et de l'azote (N) a été calculée comme le produit de la concentration du nutriment (P, N) dans la graine et la biomasse multipliée par le Rendement (Rdt).

$$\text{Nutriment absorbé} = \text{Rdt grain} \times \text{concentration du nutriment (P, N) dans le grain} + \text{Rdt paille} \times \text{concentration du nutriment (P, N) dans la biomasse} \quad (6)$$

Prélèvement du sol et analyse de laboratoire

L'échantillonnage du sol 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.

Analyses statistiques

Les données collectées ont été soumises à l'Analyse de la Variance (ANOVA) avec le logiciel « Genstat 9th édition ». En cas de différence significative, la séparation des moyennes a été faite en utilisant le test de 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.

Tableau 1 : Formes du phosphate naturel de Tilemsi utilisées au cours de l'étude.

Formes de PNT	Ratio (%)			Formule
	PNT	(NH ₄) ₂ SO ₄	KCl	N-P-K
PNT+KCl	70	-	30	0-20 -18
PNT+(NH ₄) ₂ SO ₄	70	30	-	7-18-0
PNT+KCl+(NH ₄) ₂ SO ₄	70	20	10	4-20-6
PNT Granule	100	-	-	0- 11- 0

RESULTATS

Effet des traitements sur les propriétés chimiques du sol

Le Tableau 2 présente l'effet des différentes formes de fumures et doses d'apport du phosphore 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 avec une augmentation de 1,08 unité de pH-H₂O comparé au témoin (Tableau 2).

L'augmentation de la quantité de phosphore appliqué a entraîné 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 le 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 2).

La teneur en calcium échangeable a été significativement influencée par les différents types de PNT durant les deux années d'étude. Le témoin a constamment donné les plus faibles valeurs de 0,35 et de 0,67 Cmol_ckg⁻¹ respectivement en 2013 et 2014, par contre aucune différence significative n'a été observée entre les autres traitements (Tableau 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 > Témoin, 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 3).

Le rendement biomasse a été significativement influencé par le type de fertilisation au cours de l'étude (Tableau 3) dans l'ordre décroissant suivant P + SAM > P + K + SAM > PNT > Témoin > P + K.

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

Le Tableau 4 montre 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).

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 le développement précoce (C1) et l'absorption du N par le sorgho ont significativement influencé la libération du P assimilable du PNT et son absorption par les cultures durant les deux années d'étude (Tableau 5).

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 (Tableau 6).

En 2013, l'application de P + SAM a donné la plus grande valeur pour le EAP comparé à 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 supérieures à celui de P+K. En 2014 pour le EAP, P + SAM et P + K + SAM ont donné des valeurs significativement supérieures (P < 0.05) à ceux obtenues avec l'apport du PNT et le PNT avec le KCl.

Tableau 2 : Effet des différentes formes de fumures et doses d'apport 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)	Ca
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	
CV (%)	4.30	21.20	19.10	10.60	23.30	20.30	

Tableau 3 : Effet des différentes formes de fumures et doses d'apport du phosphore sur les rendements grain et biomasse du sorgho.

Année	2013		2014	
	Grain	Biomasse	Grain	Biomasse
------(kg _{ha} ⁻¹)-----				
Formes de phosphore (FP)				
Témoin (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
Ppds (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
CV (%)	33.60	44.40	27.60	43.60

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 à P < 0.001, ** Significatif à P < 0.01, * Significatif à P < 0.05, C1: Taux de croissance à 21- 42 JAS, C2: Taux de croissance à 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.

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

Paramètres	2013			2014		
	Coefficients	Erreur Standard	Signification	Coefficients	Erreur Standard	Signification
Constant	-2.37	3.40	0.49	-2.79	1.99	0.16
C1	0.4280	0.0980	< 0.001	0.0817	0.0366	0.03
C2	-0.0044	0.0158	0.78	0.0126	0.0151	0.41
ECEC	1.90	0.477	< 0.001	0.761	0.452	0.10
A N G	-57.9	23.5	0.01	-0.0853	0.0676	0.21
A N B	-58.2	23.5	0.01	-0.121	0.103	0.24
A T N	58.1	23.5	0.01	0.2305	0.0425	0.002
Hauteur	-0.188	0.354	0.59	0.250	0.48	0.63
Exch .ac	11.06	9.24	0.23	12.4	11.8	0.29
pH	0.636	0.643	0.32	0.518	0.262	0.06

$Y_{AvP} = 0.4280 (\pm 0.0980) C1 + 1.90 (0.477) ECEC - 57.9 (23.5) A N G - 58.2 (23.5) A N B + 58.1 (23.5) A T N$ P < 0.001 ; $R^2 = 0.73$. ; $Y_{AvP} = 0.0817 (0.0366) C1 + 0.2305 (0.0425) A T N$ P < .001 $R^2 = 0.72$

Tableau 6 : Effet des formes de fumure et de la dose d’apport du phosphore sur les indices d’absorption du phosphore.

		2013		2014	
		EAP	TRP	EAP	TRP
		(kg/kg)	(%)	(kg/kg)	(%)
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		-	-	-	-
11		5,15	5,70	16,73	22,90
16		6,12	6,30	18,45	28,70
Ppds (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

DISCUSSION

Le pH-H₂O au début de l'expérimentation était fortement acide (4,15). Cette valeur est caractéristique des sols de la zone d'étude (Kanté, 2001). 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. 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 rapporté que le taux de Ca des PN varie entre (24-33%), qui est un taux suffisant pour accroître le pH du sol et la capacité d'échange cationique effective (CECE) 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 d'azote (N) et de soufre (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 rapporté 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

phosphate naturel 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 sur les parcelles ayant reçu le PNT. La libération des ions basiques comme le Ca²⁺ et le Mg²⁺ 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. Ces résultats sont en concordance avec ceux de Szilas et al. (2007) qui ont rapporté que l'apport de phosphate naturel augmente le taux de calcium et de magnésium échangeable de la solution du sol. De la même manière, l'augmentation du taux d'apport du PNT a entraîné une augmentation du taux de Ca²⁺ suite à l'apport de quantité importante de CaCO₃. Le taux élevé de Ca²⁺ obtenu en deuxième année avec l'apport du PNT s'explique par la dissolution continue du PNT et la libération de plus de cation Ca²⁺ dans la solution du sol. Des observations similaires ont été faites par Akande (2011) qui a observé une augmentation régulière du Ca²⁺ de la solution du sol après application du PN du Nigeria.

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. 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. Il résulte d'un développement précoce et fourni 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 attribué à un développement précoce du système racinaire dû 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 dû à la différence de quantité de sulfate d'ammonium qui est plus élevée pour le premier que pour le second (Tableau 1). 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 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 rapporté un accroissement du rendement grain du mil à hauteur de 89% avec le PNT comparé au témoin. Fardeau et Zapata (2002) ont rapporté que l'incorporation du PN améliore la disponibilité du P assimilable accroît le taux de calcium et magnésium et par conséquent réduit la toxicité aluminique et ferrique.

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 à significativement entraîné une augmentation du rendement grain en 2013 comparé aux autres propriétés du sol. Ce résultat est conforme avec ceux rapporté par Dabre et al. (2016) qui ont constaté un accroissement significatif du rendement du sorgho avec l'apport du phosphate naturel du Burkina (Burkinaphosphate). Koné et al. (2010) ont rapporté 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, il est généralement connu comme l'élément nutritif qui assure la croissance et le développement chez les végétaux (Bourama et Laouali, 2020).

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 phosphore assimilable de la solution du sol et donc de la dissolution du PNT durant les deux années comparées aux autres paramètres. L'impact significatif de la croissance du sorgho au premier stade de développement (stade précoce) (C1) durant les deux années sur le taux de phosphore 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 stade précoce 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.

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 d'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.

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 liée 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 pourra être une alternative à l'utilisation des engrais phosphates naturels. 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.

CONFLIT D'INTERETS

Les auteurs déclarent qu'il n'existe aucun conflit d'intérêt pour cet article.

CONTRIBUTIONS DES AUTEURS

ABK est l'auteur qui a élaboré le protocole et conduit les travaux de terrain. AI et ABK ont effectué les analyses statistiques et ont produit le 1^{er} draft de l'article. IS et SGD ont supervisé les travaux et ont participé à la rédaction finale du manuscrit de l'article.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier la direction et l'ensemble du personnel du Laboratoire Sol Eau Plante de l'IER de Sotuba pour la facilité accordée lors des analyses de sol et de plante.

REFERENCES

- Akande MO. 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.
- Bourama S, Laouali IM. 2020. Effets de la déficience en phosphore du sol sur la croissance et le développement du Sésame (*Sesamum indicum* L.). *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **14**(3): 1014-1024. DOI: 10.4314/ijbcs.v14i3.28
- Chien SH, Hammond LL, Leon LA. 1987. Long-term reactions of phosphate rocks with an oxisol in Colombia. *Soil Sci.*, **144**: 257 – 265.
- Dabre A, Hien E, Some D, Drevon JJ. 2016. Impacts des pratiques culturales sur la production du sorgho (*Sorghum bicolor* L.) et du niébé (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) et sur le bilan partiel de l'azote sous niébé au Burkina Faso. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **10**(5): 2215-2230. DOI: <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v10i5.22>
- Fageria NK, Dos Santos AB, Moraes MF. 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.
- FAO. 2004. Use of rocks phosphate for sustainable agriculture. *FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin* 13.
- Fardeau JC, Zapata F. 2002. Phosphorus fertility recapitalization of nutrient depleted tropical acid soils with reactive phosphate rock: An assessment using the isotopic exchange technique. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, **63**: 69-79.

- Gholizadeh A, Ardalan M, Tehrani MM, Hosseini HM, Karimian N. 2009. Solubility Test in Some Phosphate Rocks and their potential for Direct Application in Soil. *World Applied Sciences Journal*, **6**(2): 182-190.
- Kablan R, Yost RS, Brannan K, Doumbia MD, Traoré K, Yoroté A. 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.
- Kante S. 2001. Gestion de la fertilité des sols par classe d'exploitation au Mali-Sud. Thèse de Doctorat, Université de Wageningen, Département Plant Production Systems, Wageningen, 239 p.
- Kone B, Yao-Kouame A, Sorho F, Diatta S, Sie M, Ogunbayo A. 2010. Long-term effect of Mali Phosphate Rock on the yield of interspecifics and salt-tolerant rice cultivars on acid soil in a humid forest zone of Côte d'Ivoire. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **4**(3): 563-570. DOI: 10.4314/ijbcs.v4i3.60451
- Mowo JG. 2000. Effectiveness of phosphate rock on ferralsols in Tanzania and the influence of within-field variability. PhD Thesis, Department of environmental science, sub-department of soil science and plant nutrition, Wageningen University, Wageningen.
- Nakamura S, Issaka RN, Dzomeku IK, Fukuda M, Buri MM, Avornyo V, Adjei EO, Awuni J, Tobita S. 2013. *African Journal of Agricultural Research*, **8**(17): 1779-1789. DOI 10.5897/AJAR12.1830.
- Prochnow LI, Quespe JFS, Francisco EAB, Braga G. 2006. Effectiveness of phosphate fertilizers of different water solubilities in relation to soil phosphorus adsorption. *Scientia Agricola*, **63**: 333 – 340.
- Rahman MM, Ranamukhaarachchi SL. 2003. Fertility status and possible environmental consequences of Tista floodplain soils. *Thammasat Int. J. Sc. Tech.*, **8**(3): 111 – 117.
- Rivaie A, Loganathan AP, Graham JD, Tillman RW, Payn TW. 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.
- Serme I, Ouattara K, Logah V, Taonda JB, Pale S, Quansah C, Abaidoo CR. 2015. Impact of tillage and fertility management options on selected soil physical properties and sorghum yield. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, **9**(3): 1154-1170. DOI: <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v9i3.2>
- Shahandeh H, Hons FM, Hossner LR, Doumbia MD. 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.
- Szilas C, Semoka JMR, Borgaard OK. 2007. Establishment of an agronomic database for Minjingu phosphate rock and example of its potential use. *Nutrient Cycling in Agroecosystem*, **78**: 225-237.
- Wortmann CS, Mamo M, Doberman A. 2007. Nitrogen response of grain sorghum in rotation with soybean. *Agron. J.*, **99**: 808 - 813.
- Zin ZZ, Zulkifli H, Tarmizi AM, Hama-dan AB, Khalid H, Raja ZRO. 2005. Rock phosphate fertilizers recommended for young oil palm planted on inland soils. *Journal of Science and Technology*, **13**: 121 - 130.