

Evaluation de l'efficacité du Phosphate Naturel de Tilemsi (PNT) sous différentes pratiques de travail du sol en zone Sahélienne du Mali

[Evaluation of the effectiveness of Tilemsi phosphate rock (PNT) under different tillage practices in the Sahelian zone of Mali]

Aliou Badara Kouyate¹ and Idriss Serme²

¹ Institut Polytechnique Rural de Formation et de Recherche Appliquée (IPR, IFRA), Département des Sciences et Techniques Agricoles, Unité science du sol, BP 06 Koulikoro, Mali

² Institute of the Environment and Agricultural Research (INERA), 04 B.P. 8645, Ouagadougou 04, Burkina Faso

Copyright © 2021 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: The deficiency in available phosphorus for crops is a major constraint on cereal production in Mali. The objective of this study was to assess the combined effects of phosphorus sources at different rate and tillage practice on maize agronomic performance and soil chemical properties. The treatments used consisted of the combination of three sources of phosphorus at three doses each and two types of tillage, arranged in a split-plot device with three repetitions. Contour plowing increased corn grain yield by 22 and 16% compared to conventional plowing in 2013 and 2014, respectively, and improved the availability of PNT's phosphorus due to its ability to increase soil moisture. Maize growth and phosphorus uptake were better with contour plowing compared to conventional plowing with an increase of 44% and 65% respectively in 2013 and 2014. Relative agronomic efficiency was higher with contour plowing level compared to conventional plowing. The powdered form of PNT significantly ($P < 0.05$) increased phosphorus adsorption indices compared to the granule form. These results show that there is a great opportunity to improve maize production in Mali through the use of natural phosphorus combined with an adequate tillage practice.

KEYWORDS: Available phosphorus, Maize, Mali, Tillage practice, TPR.

RESUME: La déficience en phosphore disponible pour les cultures, est une contrainte majeure à la production céréalière au Mali. L'objectif de cette étude était d'évaluer les effets combinés des sources de phosphore à différentes doses et le travail des sols sur les performances agronomiques du maïs et les propriétés chimiques du sol. Les traitements utilisés consistaient à la combinaison de trois sources de phosphore à trois doses chacune et deux types de travail du sol, arrangés dans un dispositif en split-plot avec trois répétitions. Le labour en courbe de niveau augmentait le rendement en grain du maïs de 22 et 16 % comparé au labour conventionnel, respectivement en 2013 et 2014 et améliorait la disponibilité du phosphore du PNT du fait de sa capacité à augmenter l'humidité du sol. La croissance du maïs et le prélèvement du phosphore ont été meilleurs avec le labour en courbe de niveau comparé au labour conventionnel avec respectivement une augmentation de 44 et 65 % en 2013 et 2014. L'efficacité agronomique relative était plus élevée avec le labour en courbe de niveau comparativement au labour conventionnel. La forme en poudre du PNT a augmenté significativement ($P < 0.05$) les indices d'adsorption du phosphore comparée à la forme granule. Ces résultats montrent qu'il existe une grande opportunité pour améliorer la production du maïs au Mali à travers une utilisation du phosphore naturel combiné à une pratique adéquate de travail du sol.

MOTS-CLEFS: Maïs, Mali. Phosphore assimilable, PNT, Travail du sol.

1 INTRODUCTION

La déficience des sols en phosphore est considérée comme l'une des contraintes biophysiques majeures à la production agricole dans les régions semi-aride et sub-humide de l'Afrique. L'apport de phosphore est une nécessité absolue sans lequel l'apport d'autres éléments minéraux n'entraînera pas un accroissement de la production agricole dans ces régions [1], [2], [3].

Les systèmes de culture Sahéliens sont caractérisés par des sols fortement altérés, une extraction des nutriments avec des faibles apports externes [4] qui, au fil des siècles ont entraîné l'appauvrissement de ces sols en phosphore avec des valeurs souvent inférieures à 5 mg Bray-P kg⁻¹ de sol [5].

L'apport d'engrais phosphatés plus ou moins solubles comme le superphosphate triple, le superphosphate simple et les phosphates naturels est proposé pour assurer l'approvisionnement des plants en phosphore assimilable. Considérant que les phosphates hydrosolubles sont des engrais industriels qui nécessitent des investissements onéreux et que leurs applications régulières ont des incidences sur l'environnement [6], [7]; il est indispensable de trouver d'autres alternatives pour corriger le déficit en phosphore dans les sols.

L'utilisation du phosphate naturel (PN) a été suggérée comme une alternative pour pallier à la déficience du phosphore des sols tropicaux [8].

L'efficacité agronomique des phosphates naturels dépend de leur réactivité, des propriétés des sols, du climat, des cultures et des pratiques culturales [9], [10], globalement des conditions agropédoclimatiques. L'amélioration de l'efficacité agronomique des phosphates naturels peut se faire par augmentation de l'humidité du sol qui affecte positivement le taux de dissolution du phosphate naturel [8]. Le processus est affecté par la rapide neutralisation des ions hydroxydes libérés et l'enlèvement de calcium (Ca) et autres produits de la réaction dans la zone proche des particules du phosphate naturel. Un approvisionnement adéquat en eau favorise l'absorption du phosphore par la plante, entraînant une amélioration de l'efficacité agronomique des phosphates naturels [8].

Le maïs est la 3^{ème} céréale la plus cultivée au Mali après le mil et le sorgho [11]. Malgré cette importance du maïs dans la production vivrière, il convient de signaler que le développement des productions céréalières en général et de celle du maïs en particulier au Mali et dans les autres pays Sahéliens, se trouvent contrariés non seulement par des aléas climatiques devenus presque endémique (insuffisance et/ ou mauvaise répartition des pluies) mais aussi la faible productivité des sols agricoles. L'utilisation des engrais minéraux et de la fumure organique constitue un moyen efficace pour contribuer à restaurer la fertilité des sols et à accroître les rendements des plantes cultivées. 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. L'application directe du phosphate naturel de Tilemsi pourrait être rentable en comparaison avec les engrais phosphatés importés [12].

Bien que l'utilisation du phosphate naturel de Tilemsi dans la production agricole au Mali ait fait l'objet de plusieurs recherches [13], [14], la plupart de ces travaux ont porté sur le broyage, la combinaison du phosphate naturel de Tilemsi avec la matière organique ou l'acidulation partielle et l'inoculation avec des microorganismes. Il existe actuellement peu d'informations scientifiques sur la dose de PNT à apporter en combinaison avec le type de gestion ou de travail du sol qui peut améliorer de façon significative son efficacité agronomique dans une zone à pluviométrie faible et aléatoire comme la zone Sahélienne du Mali. C'est dans ce cadre que cette étude a été initiée dans l'objectif d'évaluer les effets de différentes formes et doses d'application du phosphate sous différentes pratiques de travail des sols sur les performances agronomiques du maïs et les propriétés chimiques du sol. L'hypothèse de cette étude est que le mode de gestion du sol comme le labour en courbe de niveau améliore la solubilité du PNT et le rendement du maïs.

2 MATERIEL ET METHODES

2.1 DESCRIPTION DU SITE D'ETUDE

L'étude a été conduite pendant deux ans (Mars 2013 à Décembre 2014) en plein champ à Konobougou au Mali. La zone est localisée entre le 12° 55' Nord et 6° 46' Ouest. Le climat est de type sahélien avec une longue saison sèche qui s'étend d'octobre à mai et une courte saison des pluies de juin à septembre. La moyenne annuelle des pluies varie entre 500 et 700 mm [15]. La longueur de la saison des cultures est de 90 -100 jours. Les sols sont à dominance sablo-limoneuse.

2.2 MATERIEL DE L'ETUDE

Le matériel végétal utilisé dans le cadre de cette recherche est la variété de maïs Sotubaka (*Zea mays L.*). Les semences ont été obtenues auprès du «Programme Maïs» du Centre Régional de Recherche Agronomique de Sotuba. Elle a un cycle cultural de 90 - 100 jours avec un rendement moyen en station variant entre 3,5 et 4 t ha⁻¹.

Trois types d'engrais ont été utilisés: le DAP (18-46-0), l'urée (46% d'azote) et le KCl (60%).

2.3 METHODES

2.3.1 DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET COLLECTE DES DONNEES

L'étude a consisté à comparer trois (3) types d'engrais phosphatés: PNT granulé, PNT en poudre et le DAP à trois (3) doses d'application: 0 kg ha⁻¹, 11kg ha⁻¹ (dose recommandée), et 16 kg ha⁻¹ (dose standard pour le site de l'étude) combinées à deux (2) types de travail du sol: labour en courbe de niveau (LCN) et le labour conventionnel (LC) disposés en split-plot arrangé en bloc randomisé complet avec trois répétitions.

Les engrais phosphatés ont été apportés avant le semis suivi d'un léger enfouissement. L'urée a été apportée en fumure de couverture en deux fractions (15 jours après semis et 45 jours après semis).

PARAMÈTRES MESURÉS

Les paramètres suivants ont été déterminés:

LE RENDEMENT GRAIN ET LA BIOMASSE SÈCHE

Le rendement en grain du maïs a été déterminé à la récolte après maturation complète des grains. Les épis récoltés sur chaque parcelle élémentaire ont été séchés au soleil et égrenés. Les grains de maïs, après vannage ont été ensuite pesés.

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

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

La biomasse a été déterminée après séchage au soleil dans les conditions du milieu ambiant pendant 10 jours. Le séchage a été suivi par la pesée avec une balance de précision.

Le rendement de la biomasse sèche par unité expérimentale a été aussi converti en kg ha⁻¹ par la formule suivante:

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

ESTIMATION DE L'ABSORPTION DES NUTRIMENTS PAR LA PLANTE

Pour l'évaluation de l'absorption générale des éléments nutritifs, des échantillons de grains, de feuilles et de tiges ont été sélectionnés pour l'analyse du phosphore total.

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

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

L'HUMIDITÉ DU SOL

L'humidité du sol ou humidité gravimétrique a été déterminée par échantillonnage du sol en trois (3) périodes: 4, 8 et 12 semaines après semis sur le labour en courbe de niveau et le labour conventionnel. Douze (12) échantillons de sols ont été prélevés par répétition et par date de prélèvement. L'humidité du sol ou la masse de l'eau a été déterminée par séchage de sol humide (Phs) à un poids constant (105 °C à 24 H). Le poids du sol a été pesé après et avant séchage (Pss). La masse de l'eau ou poids de l'eau a été estimé par la différence entre le poids humide et le poids sec [16].

L'humidité du sol sur la base du poids sec a été calculée suivant la formule:

$$\Theta_g = \frac{(Phs + tare) - (Pss + tare)}{(Pss + tare) - (tare)}$$

Phs: poids humide du sol; Pss: poids sec du sol

L'EFFICACITÉ AGRONOMIQUE RELATIVE (EAR)

L'efficacité agronomique relative (EAR) a été calculée comme le rapport du rendement (Rdt) avec le PNT sur le rendement obtenu avec le DAP au même niveau d'application (11 kg de P ha⁻¹ et 16 kg de P ha⁻¹) en utilisant la formule:

$$EAR = \frac{Rdt_{PNT} - Rdt_{Temoin}}{Rdt_{DAP} - Rdt_{Temoin}} \times 100$$

PRÉLÈVEMENT ET ANALYSE DES ÉCHANTILLONS DE SOL

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.

ANALYSE STATISTIQUE

Les données collectées ont été soumises à l'Analyse de la Variance (ANOVA) avec le logiciel « *Genstat statistical package 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 corrélation et de régression a été faite entre les propriétés du sol et les paramètres du maïs à la récolte.

3 RESULTATS

3.1 CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DU SITE DE L'ETUDE

Les résultats d'analyse du sol au moment de l'implantation de l'expérimentation sont consignés dans le tableau 1. Le pH du sol était fortement acide, les teneurs en matière organique, en azote, et en phosphore assimilable étaient très faibles avec une capacité d'échange cationique effective très faible.

Tableau 1. Caractéristiques physico-chimiques du sol du site de l'étude

Analyse chimique	
pH (1: 1 H ₂ O)	4,70
M.O (%)	0,68
Azote total (%)	0,02
P assimilable (mg kg ⁻¹)	2,13
Cations échangeables (Cmol+ kg⁻¹)	
Ca	0,85
K	0,10
Na	0,21
Mg	0,40
Al+H	0,06
CECE	1,62
Granulometrie (%)	
Sable	76,5
Limon	19,3
Argile	4,20
Classe texturale	Limon sableux

Légende: M.O: Matière organique; P: Phosphore; CECE: Capacité d'échange cationique effective

3.2 EFFET DU TRAVAIL DU SOL ET DE L'APPLICATION DU PHOSPHORE SUR CERTAINES PROPRIETES CHIMIQUES DU SOL

L'apport des formes de phosphore (DAP et PNT) a influencé de façon significative ($P < 0.01$) le pH du sol. La valeur du pH mesurée dans les parcelles qui ont reçu le PNT a été supérieure à celles des parcelles du DAP et du témoin (Tableau 2). Le calcium échangeable (Ca^{2+}) a été significativement ($P = 0.004$) influencé par les formes de phosphore dans la deuxième année de l'étude (Tableau 2). Les parcelles qui ont reçu le PNT ont donné la plus grande valeur Ca^{2+} ($0,92 \text{ Cmol+kg}^{-1}$).

Le type de travail du sol a significativement influencé ($P < 0.01$) la teneur du phosphore assimilable du sol, pendant la première année de l'expérience, le labour en courbe de niveau a enregistré le taux de P assimilable le plus élevé comparé au labour conventionnel (Tableau 2). Bien qu'en deuxième année aucune différence significative n'a été observée entre les deux types de travail du sol le taux de phosphore assimilable libéré dans le sol avec le labour en courbe de niveau a été plus élevé que le labour conventionnel.

La teneur en phosphore assimilable du sol a été significativement influencée ($P < 0.001$) par les différentes formes de P (Tableau 2). Parmi les sources de phosphore, le DAP a été supérieur aux différentes formes de PNT pour la teneur en phosphore assimilable libérée dans le sol. La teneur du phosphore assimilable du sol augmente avec le niveau d'application du phosphore aussi bien avec le labour en courbe de niveau que le labour conventionnel durant les deux années de l'expérimentation.

Tableau 2. Effets des engrais phosphatés et du travail du sol sur le pH, le Ca et le P assimilable

	2013			2014		
	pH	Ca (cmol.kg ⁻¹)	P (mgkg ⁻¹)	pH	Ca (cmol.kg ⁻¹)	P (mgkg ⁻¹)
TraT Type de travail du sol						
LCN	4,41	0,68	5,26	4,76	0,80	4,25
LC	4,38	0,59	3,81	4,71	0,74	3,96
Fpr	0,55	0,49	0,01	0,13	0,32	0,25
Forme de phosphore (FP)						
Témoin (sans-P)	4,25	0,59	3,12	4,20	0,57	2,73
DAP	4,29	0,63	6,67	4,72	0,77	4,69
PNT (Granule)	4,59	0,63	4,13	4,98	0,92	4,11
PNT (Poudre)	4,54	0,67	4,55	5,03	0,84	4,61
Ppds (0.05)	0,21	0,13	0,85	0,20	0,19	0,46
Fpr	0,01	0,71	< 0.001	< 0.001	0,004	<0.001
Dose de Phosphate (DP) kg/ha						
0	4,26	0,64	3,10	4,33	0,66	2,25
11	4,38	0,60	4,63	4,89	0,92	4,79
16	4,54	0,65	6,13	4,98	0,75	5,28
Ppds (0.05)	0,18	0,11	0,74	0,17	0,16	0,40
Fpr	0,01	0,69	< 0.001	<0.001	0,01	<0.001
CV (%)	7.20	31.70	28.10	6.30	36.90	16.90

3.3 EFFET DU TRAVAIL DU SOL ET DE L'APPLICATION DU PHOSPHORE SUR LE RENDEMENT GRAIN ET LA BIOMASSE SECHE DU MAÏS.

Le type de travail du sol n'a pas eu une influence significative ($P > 0.05$) sur le rendement grain. Cependant on note que le labour en courbe de niveau a permis une augmentation du rendement grain de 22 % et 16 % respectivement en 2013 et 2014 comparé au labour conventionnel.

L'apport du phosphore a eu une influence significative ($P < 0,001$) sur le rendement grain du maïs dans l'ordre décroissant DAP > PNT poudre > PNT granulé > témoin au cours de l'étude (Tableau 3). Un rendement grain significativement élevé a été obtenu avec le DAP avec les différents niveaux d'apport du phosphore (11 et 16 kg ha⁻¹) comparé aux formes de PNT (poudre et granulé) durant les deux années. Le PNT sous forme de poudre a produit un rendement grain significativement plus élevé que le PNT sous forme granulé et le témoin à la fois à 11 et 16 kg ha⁻¹ pendant les deux années d'étude (Figures 1 et 2).

Une augmentation générale a été observée du faible niveau d'application à la dose de 16 kg ha⁻¹ pendant les deux années.

Le rendement biomasse sèche a connu une augmentation avec le labour en courbe de niveau de 32 % et 14 % respectivement en 2013 et 2014 comparé au labour conventionnel. Parmi les différentes formes de phosphore, aucune différence significative n'a été observée entre le DAP et le PNT (poudre) durant les deux années. Ceux-ci sont significativement supérieurs dans l'élaboration du rendement biomasse sèche en comparaison au PNT (granulé) et le Témoin (Tableau 3).

Tableau 3. Effets des engrais phosphatés et du travail du sol sur le rendement grain et biomasse du maïs

	2013		2014	
	Grain	Biomasse	Grain	Biomasse
	(kg ha ⁻¹)			
Travail du sol (TS)				
LCN	1544	4391	1504	4261
LC	1267	3321	1299	3727
Fpr	0.07	0.11	0.08	0.14
Type de phosphore (TP)				
Témoin (sans- P)	460	2753	521	2909
DAP	2300	4790	2270	4667
PNT (Granule)	1097	3494	1133	4073
PNT (Poudre)	1765	4389	1683	4326
Ppds (0.05)	228.50	838.40	219.20	535.10
Fpr	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
Dose de Phosphate (DP kg/ha)				
0	578	2729	615	2871
11	1610	4146	1633	4298
16	2029	4694	1957	4812
Ppds (0.05)	197.90	726.10	189.80	463.40
Fpr	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
Interactions				
TP x DP	< 0.001	0.60	< 0.001	0.001
CV (%)	24.20	32.40	23.30	19.90

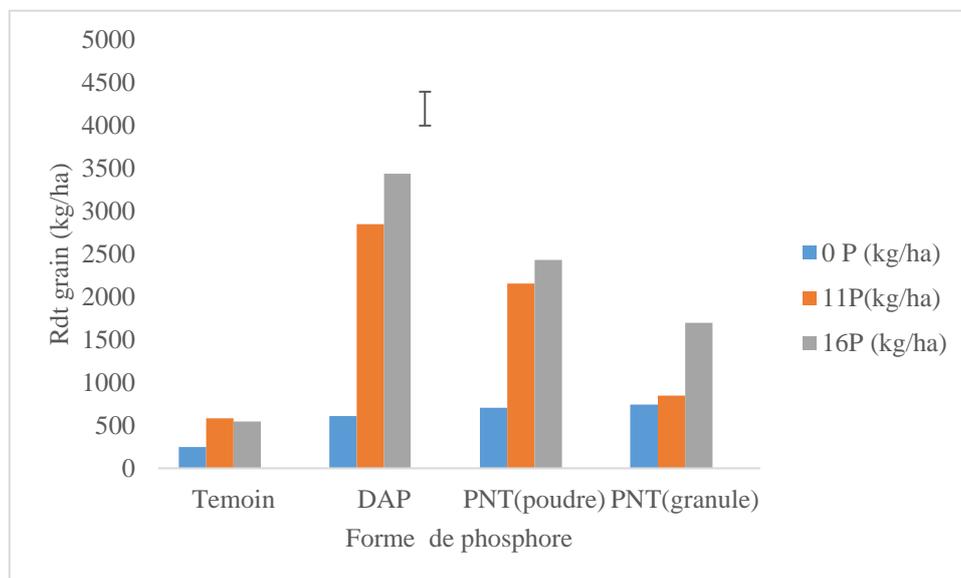


Fig. 1. Effets d'interaction entre le type et le taux d'apport du phosphore sur le rendement grain en 2013

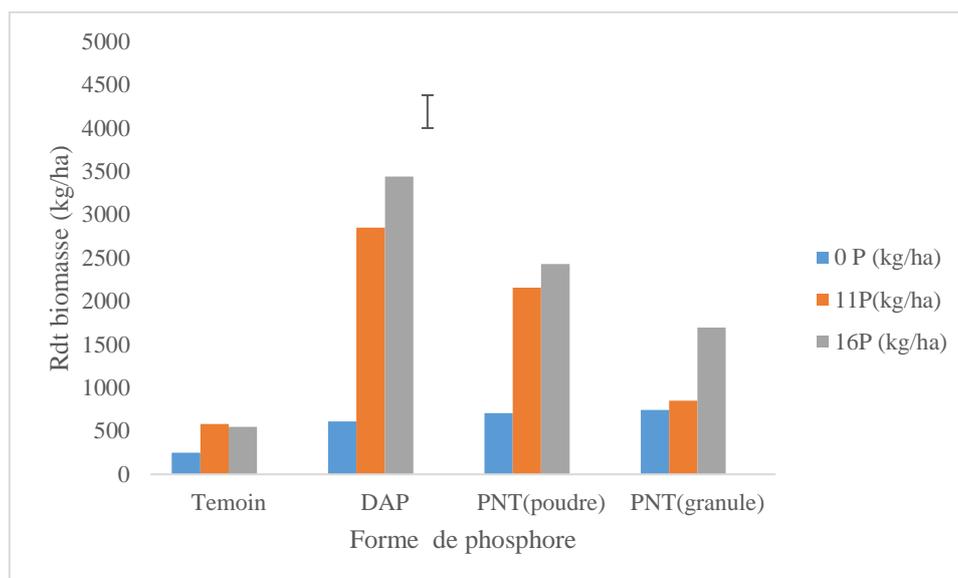


Fig. 2. Effets d'interaction entre le type et le taux d'apport du phosphore sur le rendement grain en 2014

3.4 EFFET DU TRAVAIL DU SOL SUR L'HUMIDITE GRAVIMETRIQUE A 0-20 ET 20-60 CM DE PROFONDEUR

L'humidité du sol a été plus importante avec le labour en courbe de niveau que le labour conventionnel pendant les deux années de l'expérimentation aussi bien à 0 - 20 que 20 - 60 cm. Le taux d'accroissement de l'humidité du sol pour le labour en courbe de niveau comparé au labour conventionnel a été de 59 % et 22 % respectivement en 2013 et 2014. Une augmentation générale de l'humidité gravimétrique a été observée du début à la fin de l'expérimentation. La teneur en humidité du sol augmente avec la profondeur du sol.

3.5 RELATION ENTRE LE RENDEMENT GRAIN ET CERTAINES PROPRIETES DU SOL A LA RECOLTE

L'équation de régression multiple qui décrit la relation entre le rendement en grain et certaines propriétés du sol est présentée dans les tableaux 4 et 5. Le rendement grain a été significativement influencé par le phosphore assimilable et le pH du sol avec le labour en courbe de niveau. L'analyse a montré que le P assimilable du sol ($P < 0,001$) a permis une augmentation significative du rendement grain au cours des deux saisons et pour les deux types de labour (Tableaux 4 et 5). À l'inverse, les autres propriétés du sol n'ont pas eu d'influence significative ($P > 0,05$) sur le rendement en grain, à l'exception de l'azote total en 2014.

Tableau 4. Régression multiple entre le rendement grain et les propriétés du sol en 2013

Propriétés du sol	LCN			LC		
	Coeff	SE	Significance	Coeff	SE	Significance
Constant	-2830	1614	0.09	-2135	2199	0.34
P.ass	267.20	38.8	< 0.001	3516	91.8	< 0.001
Humidité	24.60	53.30	0.64	0.7	80.6	0.99
Exch. Ac	15350	7698	0.06	-14699	10479	0.17
Exch. Ca	4589	9369	0.62	1763	14937	0.24
Exch. K	-5146	3157	0.11	-2837	5055	0.57
Exch.Mg	-8467	18489	0.65	-32894	29515	0.27
Total N	893	16489	0.95	-2598	34693	0.94
Carbone du sol	-533	973	0.58	-2149	1820	0.24
pH	515	282	0.05	643	543	0.24

Coeff: coefficient; SE: standard error; P.ass: P assimilable

$Y_{LCN} = 267.20 (\pm 38.8) P.ass + 515 (\pm 282) pH$ $P < 0.001$ $R^2 = 0.74$

$Y_{LC} = 3516 (\pm 91.8) P.ass$ $P < 0.01$ $R^2 = 0.42$

Tableau 5. Régression multiple entre le rendement grain et les propriétés du sol en 2014

Propriétés du sol	LCN			LC		
	Coeff	SE	Significane	Coeff	SE	Significane
Constant	-451	1349	0.74	-2022	1768	0.26
P.ass	343.30	61.2	< 0.001	429	157	0.01
Humidité	-15	51.4	0.77	108.9	83.3	0.20
Exch. Ac	873	6668	0.89	10048	15402	0.52
Exch. Ca	-449	794	0.57	483	1140	0.67
Exch. K	-486	4018	0.90	-248	5869	0.96
Exch.Mg	826	1702	0.63	-650	2159	0.76
Total N	220	251	0.38	467	222	0.04
SOC	187	969	0.84	259	874	0.76
pH	35	258	0.89	-266	376	0.48

Coeff: coefficient, SE: standard error

$Y_{CR} = 343.30 (\pm 61.2) P.ass P < 0.001 R^2 = 0.69$

$Y_{HT} = 429 (\pm 157) P.ass + 467 (\pm 222) Total N P < 0.001; R^2 = 0.52$

3.6 ABSORPTION DU PHOSPHORE PAR LE MAÏS

Le type de travail du sol a eu une influence significative ($P < 0.004$) sur l'absorption du phosphore par le maïs. L'absorption du phosphore a été plus élevée avec le labour en courbe de niveau comparé au labour conventionnel (Figures 3 et 4) durant les deux années d'expérimentation. Le taux d'accroissement de l'absorption du phosphore avec le labour en courbe en niveau comparé au labour conventionnel a été de 44 % et 65 % respectivement en 2013 et 2014.

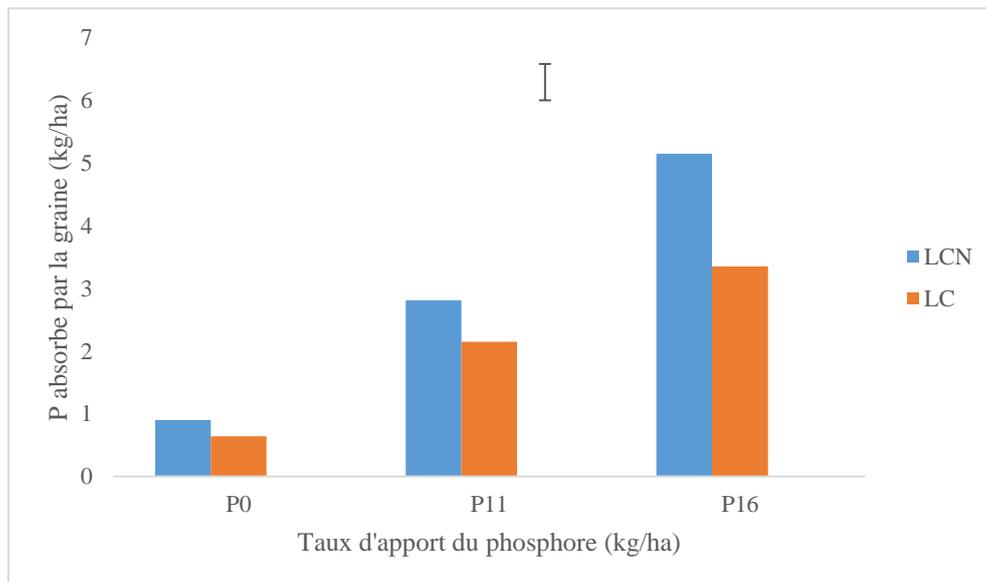


Fig. 3. Effets du taux d'apport du phosphore sur l'absorption du phosphore par la graine

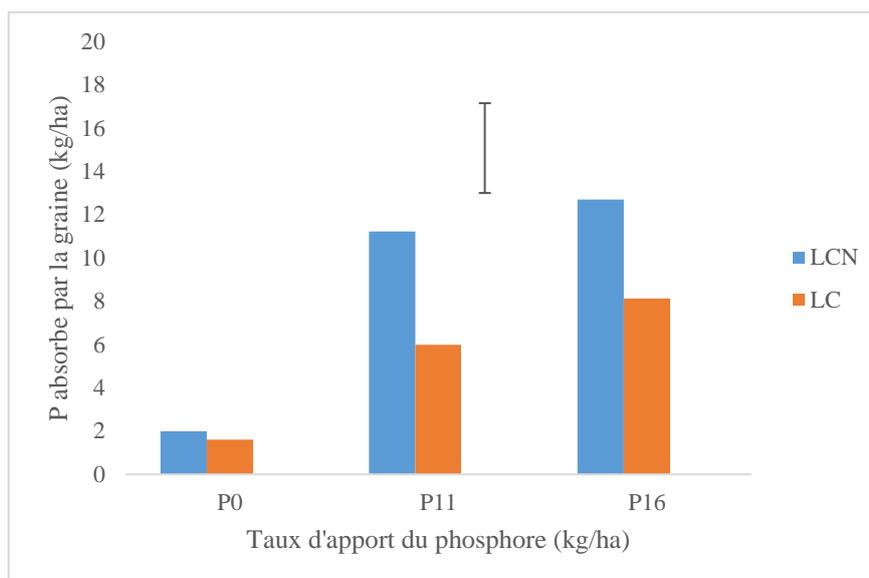


Fig. 4. Effets du taux d'apport du phosphore sur l'absorption du phosphore par la graine

3.7 LES EFFETS DU TRAVAIL DU SOL SUR L'EFFICACITE AGRONOMIQUE RELATIVE

Le type de travail du sol a eu une influence sur l'efficacité agronomique relative (EAR) des différentes formes de PNT. L'efficacité agronomique relative du PNT par rapport au DAP s'est nettement améliorée avec le labour en courbe de niveau qu'avec le labour conventionnel (Tableau 6). L'application du PNT sous forme de poudre a permis d'accroître son efficacité agronomique comparé à la forme granulée avec les différentes doses d'apport aussi bien avec le labour en courbe de niveau que le labour conventionnel. Les valeurs de l'efficacité agronomique relative décroissent avec l'accroissement du taux de P apporté avec le PNT pour le labour en courbe de niveau.

Tableau 6. Rendement grain du maïs et efficacité agronomique relative du PNT par rapport au DAP avec le LCN

	2013				2014			
	Doses de P (kg/ha)		Doses de P (kg/ha)		Doses de P (kg/ha)		Doses de P (kg/ha)	
	P11	P16	P11	P16	P11	P16	P11	P16
Engrais	Rdt (kg/ha)	EAR (%)						
Granule	1114	31	1810	44	1159	32	1635	39
Poudre	2405	78	2543	64	2508	88	2470	65
DAP	3016	100	3802	100	2786	100	3619	100
Témoin -P0	221.42	-	221.42	-	380.95	-	380.95	-

Rdt: Rendement; EAR: Efficacité Agronomique Relative

4 DISCUSSION

Le pH du sol est l'indicateur de la réaction du sol mais aussi de la disponibilité des nutriments pour les plantes. L'accroissement de la valeur du pH avec l'application du PNT s'explique par son pouvoir chaulant, résultant de la dissolution du PNT entraînant 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, il y a donc la potentialité de fournir du Ca et du Mg s'il y a les conditions favorables à sa dissolution. La référence [17] ont indiqué que l'application des phosphates naturels augmente le taux de calcium, de magnésium échangeable et le pH du sol. En outre, la dissolution de l'apatite consomme les ions H⁺ et permet ainsi d'augmenter le pH en fonction de la réactivité du PN [8], [18].

L'augmentation du Ca échangeable du sol en deuxième année d'expérience avec les parcelles ayant reçu le PNT comparé au témoin pourrait s'expliquer par la dissolution continue du PNT sur sol acide. Le PNT contient une quantité importante de Ca

(environ 40%) qui contribue à une libération importante de Ca durant le processus de dissolution avec le temps. Cependant, si la dissolution des carbonates libres augmente significativement le pH et le calcium échangeable au tour de la particule de phosphate naturel, il peut entraver la dissolution de l'apatite et ainsi réduire la disponibilité du phosphore [19], [20].

L'augmentation du taux de P assimilable avec le labour en courbe de niveau comparé au labour conventionnel pendant les deux années de l'expérimentation, s'explique par l'augmentation relative de l'humidité du sol avec le premier. Plusieurs études ont apporté l'effet bénéfique de l'impact de l'humidité du sol sur la solubilisation du PNT. La référence [21] a souligné que l'humidité du sol améliore la croissance de la plante et l'absorption du P et du Ca par la plante qui en retour augmente le taux de solubilisation du phosphate naturel. Le déplacement de l'équilibre de la solution du sol, augmente le transfert de la phase solide à la phase liquide. L'absorption du phosphate par la plante ou sa rétention par le sol augmente le taux de dissolution du PNT [22]. La valorisation des différentes formes de phosphore du sol via la stimulation des activités biologiques par des pratiques culturales adaptées favorisent la solubilisation du phosphore [23]. Le DAP a donné la plus grande valeur de phosphore assimilable comparé au PNT aussi bien à 11 et 16 kg ha⁻¹. Cela peut s'expliquer par le fait que le DAP est un engrais hydrosoluble et libère plus de phosphore dans la solution du sol que le PNT.

Quoi que non significatif, le rendement grain et la biomasse ont été 19 % supérieur avec le labour en courbe de niveau comparé au labour conventionnel. Cela s'explique par l'augmentation et la conservation de l'humidité du sol avec le labour en courbe de niveau. [15] ont rapporté une augmentation de rendement grain du maïs de 50 % avec le labour en courbe de niveau. L'apport des formes de phosphore a permis une augmentation significative des rendements grain et biomasse comparé au témoin durant les deux années de l'étude. La forme en poudre du PNT a permis une augmentation significative du rendement grain par rapport à la forme granule, et l'application du DAP a produit une augmentation significative ($P < 0.001$) du rendement grain comparé au PNT aussi bien à la dose d'application du phosphore à 11 et 16 kg ha⁻¹. Cela peut s'expliquer par le fait que la libération du phosphore est plus rapide et son absorption par les plantes avec le DAP que le PNT, et aussi par la forme en poudre du PNT que la forme granule. Les rendements avec le DAP ont été supérieurs comparés aux différentes formes de PNT à cause de sa capacité à libérer le phosphore rapidement. La libération précoce d'une grande quantité de phosphore (hydrosoluble) stimule le développement précoce des racines et la capacité de la plante a absorbé l'eau et les autres nutriments. Cependant, les rendements grain et biomasse ont été plus élevés avec la forme poudreuse que la forme granule. Cela peut s'expliquer par la différence de la taille des particules entre les deux types de fertilisant. La solubilité du PNT augmente généralement avec les particules de taille petite et conséquemment, la libération du phosphore à partir du PNT pour la croissance de la plante [8]. Comme les phosphates naturels sont relativement insolubles, leur surface spécifique est un paramètre important pour leur solubilisation. Plus la particule est de dimension petite, plus grande est la surface de contact entre elle et le sol et meilleure est la solubilité du phosphate naturel.

La corrélation positive entre le rendement grain de maïs et le phosphore peut s'expliquer par l'apport de quantité suffisante d'engrais phosphatés (DAP et PNT) au cours des deux saisons. L'ajout du phosphore sur des sols à faible fertilité améliore la productivité des cultures [24]. Le pH relativement élevé du sol, le taux de phosphore assimilable et son absorption ont entraîné une amélioration de rendement comparé au témoin. Ceci est confirmé par la corrélation positive entre ces paramètres et le rendement grain du maïs. Bien qu'ils aient contribué à l'augmentation du rendement du maïs dans le cadre des deux pratiques de travail du sol, leur impact sous la parcelle labour en courbe de niveau était plus élevé que labour conventionnel.

D'autre part, l'analyse de régression multiple a montré que le phosphore assimilable est le paramètre qui permet une amélioration significative du rendement grain du maïs au cours des deux saisons et pour les deux types de travail du sol par rapport aux autres propriétés du sol. Ce résultat confirme que le P est l'un des éléments nutritifs les plus limitants pour la croissance et le développement des cultures [1], [2], [25].

L'absorption des nutriments est le processus par lequel les racines de la plante absorbent les nutriments présents dans la solution du sol, ces nutriments étant ensuite distribués aux parties aériennes de la plante [26].

En général, une absorption plus élevée de nutriments a été observée dans la parcelle aménagée en courbe de niveau ce résultat peut s'expliquer par l'amélioration de la teneur en eau du sol dans le cadre de cette pratique. Les résultats de la recherche ont démontré une interaction positive entre l'humidité du sol et l'absorption de phosphore car l'amélioration de l'état d'humidité du sol augmente la disponibilité du phosphore du sol [27]. Aussi la teneur du phosphore assimilable et son absorption par la plante sont liées à la concentration de phosphore dans la solution du sol du sol. [28], [29] ont montré une augmentation de l'absorption des éléments nutritifs du sorgho avec une augmentation de la teneur en éléments nutritifs disponibles dans le sol. [30] a montré que l'absorption de phosphore par le maïs a augmenté dans trois sols différents au Nigéria due à un apport croissant des doses de phosphore.

Parmi les formes de PNT utilisées, la forme en poudre est significativement plus efficace que la forme en granulé avec les deux types de travail du sol, ce qui suggère que la taille des particules exerce une influence positive sur l'efficacité d'utilisation du

phosphate naturel. L'application de PNT finement broyé améliore à la fois le taux de dissolution des phosphates naturels et son absorption par les plantes [8].

L'application directe du phosphate naturel de Tilemsi est aussi efficace que les engrais phosphates hydrosolubles avec une efficacité agronomique relative élevée. Des résultats similaires ont été rapportés par [31], [32]. Les valeurs de l'efficacité agronomique relative sensiblement plus élevées (64% à 88% avec LCN et 50% à 73% avec LC) obtenues dans cette étude peuvent être attribuées à l'acidité du sol qui a favorisé la solubilisation du PNT. [33] ont indiqué que le phosphate naturel de Tilemsi était de 78 à 100 % aussi efficace que le super phosphate triple.

5 CONCLUSION

Au terme de cette étude il ressort que le labour suivant des courbes de niveau a un impact positif sur la disponibilité du phosphore du PNT, à cause de sa capacité de conservation de l'humidité du sol. Cependant, l'humidité du sol n'est pas le facteur déterminant de l'amélioration de la disponibilité du phosphore issu de la dissolution du PNT. Il est plutôt un intermédiaire qui améliore l'absorption du phosphore et la croissance et le développement de la plante, réduisant la concentration de phosphore dans la solution du sol améliorant ainsi la solubilisation du PNT.

Ce résultat confirme que le PNT en poudre utilisé avec le labour en courbe de niveau à la dose de 16 kg ha^{-1} au Sahel est aussi efficace que les engrais phosphatés solubles comme le DAP sous des précipitations faibles et erratiques avec des hauteurs annuelles moyennes (entre 500 et 600 mm). Le phosphate naturel de Tilemsi peut donc être utilisé comme alternative aux engrais phosphates hydrosolubles dans la région Sahélienne du Mali en combinaison avec les technologies de conservation des eaux et des sols.

REFERENCES

- [1] B. Kone, A.Y.Kouame, F.Sorho, S.Diatta and S.M. A Ogunbayo, Long-term effect of Mali Phosphate Rock on the yield of interspecifics and sativa rice cultivars on acid soil in a humid forest zone of Côte d'Ivoire. *Int. J. Biol. Chem. Sci*, 4 (3): 563-570, 2010.
- [2] S. Nakamura, R.N. Issaka, I.K.Dzomeku, M. Fukuda, M.M. Buri, V. Avorny, E.O. Adjei and S.A.J.Tobita, Effect of Burkina Faso phosphate rock direct application on Ghanaian rice cultivation. *African Journal of Agricultural Research*, 8 (17): 1779-1789, 2013.
- [3] S. Boureima et I.L.Mahaman, 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): 1014-1024,2020.
- [4] S. Nacro, S. Ouédraogo, K.Traore, E. Sankara, C. Kabore et B. Ouattara, Effets comparés des pratiques paysannes et des bonnes pratiques agricoles de gestion de la fertilité des sols sur les propriétés des sols et les rendements des cultures dans la zone sud soudanienne du Burkina Faso. *Int. J. Biol. Chem. Sci*, 4 (4): 1044-1055. DOI: 10.4314/ijbcs.v4i4.63042, 2010.
- [5] A.Buerkert, A. Bationo and K. Dossa, Mechanisms of residue mulch-induced cereal growth increases in West Africa. *Soil Sci. Soc. Am. J*, 64: 346–358. DOI: 10.2136/sssaj2000.641346x, 2000. .
- [6] F. Lompo, Z. Segda, Z. Gnankambary et N. Ouandaogo, Influence des phosphates naturels sur la qualité et la biodégradation d'un compost de pailles de maïs *Tropicultura*, 27, 2, 105-109, 2009.
- [7] M. Touati, M. Benhamza, et F. Bouhafs, Impact de la pollution agricole sur la qualité des eaux souterraines dans le périmètre irrigué Guelma-Boucheougouf (Nord Est Algérien) *Rev. Sci. Technol.*, Synthèse 37: 103-112, 2018.
- [8] FAO, Use of rocks phosphate for sustainable agriculture. *FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin* 13.ISSN 0532-0488, 2004.
- [9] A. Hodge, Microbial ecology of the arbuscular mycorrhiza. *FEMS Microbiology Ecology*. 32: 91–96, 2000.
- [10] K.L. Sahrawat, M.P. Jones, S. Diatta et M. Sika, 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, 2003.
- [11] MDR, Résultats définitifs de la campagne agropastorale situation alimentaire et nutritionnelle. *CPS/SDR 70P*, 2016.
- [12] A. Bationo, E. Ayuk, D. Ballo et M. Koné, Agronomic and economic evaluation of Tilemsi phosphate rock in different agroecological zones of Mali. *Nutrient Cycling Agrosyst*. 48, 179-189, 1997.
- [13] W.J. Veldkamp, A. Traore, K.N'Diaye, M.K. Keita, B. Keita et M. Bagayoko, Fertilités des sols du Mali; Mali Sud/ Office du Niger: Interprétation des données analytiques des sols et plantes. *Cellule Agro-pédologique, Institut d'économie rurale, N'Tarla, Mali*. 149p, 1991.
- [14] A. Bationo, S. Koala et E. Ayuk, Fertilité des sols pour la production céréalière en zone sahélo-soudanienne et valorisation des phosphates naturels. *Cahiers Agriculture* V0.7 N 5, 1998.

- [15] R. Kablan, R.S. Yost, K. Brannan, M.D. Doumbia, K. Traoré, A. Yoroté, Y. Toloba, S. Sissoko, O. Samaké, M. Vaksman, L. Dioni et M. Sissoko, Aménagement en courbes de niveau "Increasing rainfall capture, storage, and drainage in soils of Mali", *Arid Land Research and Management* 22 (1): 62–80, 2008.
- [16] K.M. De Angelis, Measurement of soil moisture content by gravimetric water method. In C.A. Black. (eds). "Methods of Soil Analysis: Part I physical and mineralogical properties". American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA, 2007.
- [17] C. Szilas, J.M.R. Semoka et O.K Borggaard, Establishment of an agronomic database for Minjingu phosphate rock and example its potential use. *Nutrient Cycling in Agroecosystem* 78: 225 – 237, 2007.
- [18] M. S. Maiga, B. Traore, R. Maguiraga et M. Keita, Évaluation de l'effet de l'apport de fumier de bovins et de petits ruminants et du phosphate naturel de tilemsi sur la productivité des sols et des cultures dans le sahel: cas de la région de Mopti. *Revue Malienne de Science et de Technologie –ISSN 1987-1031 Série A: Sciences Naturelles, Agronomie, Techniques et Sciences de l'Ingénieur Vol. 01 No 23, Juin 2020.*
- [19] S.H. Chien and R.G. Menon, Factors affecting the agronomic effectiveness of phosphate rock for direct application. *Fert. Res* 41: 227 – 234, 1995.
- [20] O.M. Sani, Z. Adamou et N.Ibrahim, Traitement Des Phosphates Naturels De Tahoua (Niger) Par Quelques Acides Conventionnels. *European Scientific Journal* Vol.13, No.24 ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857- 7431, 2017.
- [21] H. Marschner, Mineral nutrition of higher plants. 2nd ed Acadmic Press, London, 1995.
- [22] P.V. Straaten, Rocks for crops, agro minerals of sub-Sahara Africa. (CD), ICRAF, Nairobi, Kenya. ISBN: 0-88955-512-5, pp, 2002.
- [23] C. Plassard, A. Robin, E. Le Cadre, C.Marsden, J.Trap, L. Herrmann, K. Waithaisong D. Lesueur, E.Blanchart, L. Chapuis-Lardy et P. Hinsinger, Améliorer la biodisponibilité du phosphore: comment valoriser les Compétences des plantes et les mécanismes biologiques du sol ? *Innovations Agronomiques* 43, 115-138, 2015.
- [24] AA. Bandaogo, K. Ouattara, I. Serme, Long Term Effect of Tillage and Organo-Mineral Fertilizer Application on Phosphorus Dynamics on Ferric Lixisol in Burkina Faso. *Journal of Agricultural Studies.*; 8 (4): 240-51, 2020.
- [25] A.B. Kouyate, A. Ibrahim, I. Serme et S.G Dembélé, 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. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 14 (9): 3285-3296, 2020.
- [26] J.L. Havlin, J.D. Beaton, S.L Tisdale and W.L Nelson, Soil fertility and fertilizers: An introduction to Nutrient Management 7th Ed. Pearson Education Inc. 515p, 2005. Upper Saddle River, New Jersey.
- [27] B. Ouattara, Contribution à l'étude de l'évolution de propriétés physiques d'un sol ferrugineux tropical sous culture: pratiques culturales et états structuraux du sol. Thèse UNCI, Abidjan, 153 pp, 1994.
- [28] D. Fatondji, Organic amendment decomposition, nutrient release and nutrient uptake by millet in a traditional land rehabilitation technique (Zai) in the Sahel. *Ecology and Development Series. PhD. Dissertation, University of Bonn. Bonn, Germany.* pp 147, 2002.
- [29] M.Sharif, M. Arif, T. Burni, F Khan, B. Jan and I. Khan, Growth and phosphorus uptake of sorghum plants in salt affected soil as affected by organic materials Composted with rock phosphate. *Pakistan Journal of Botany*, 46 (1): 173 – 180, 2014.
- [30] M.O. Akande, 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, 2011.
- [31] J.A. Adediran F.I. Oguntoyinbo, R. Omonode, and R.A. Sobulo, Agronomic evaluation of phosphorus fertilizers developed from Sokoto Rock Phosphate in Nigeria. *Comm. Soil Sci. Plant Anal* 29: 2659 – 2673, 1998.
- [32] M.O Akande, E.A Aduayi, A. Olayinka, and R.A. Sobulo, Efficiency of Sokoto rock phosphate as a fertilizer source for maize production in South Western Nigeria. *Journal of Plant Nutrition* 21: 1339 – 1353, 1998.
- [33] D.T Hellums and Honolu, Alternative phosphorus fertilizers in the tropics: "An agronomic and economic evaluation" *Phosphorus Decision Support System Workshop (BALAS, S., ed), Trop Soils Bulletin No. 92- 01, 1992.*