

Amélioration des propriétés chimiques d'un sol ferrugineux tropical lessivé par le phosphate naturel calciné

Boubacar Traoré^{1,2*}, Mamoudou Traoré¹, André Béyé^{1,2}, Hassan Bismarck Nacro²

⁽¹⁾Centre National de la Recherche Scientifique et Technologique. Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles. Département Gestion des Ressources Naturelles et Systèmes de Production. 01 BP 476 Ouagadougou 01 (Burkina Faso). E-mail : boubatr10@gmail.com

⁽²⁾Université Nazi Boni. Laboratoire d'étude et de recherche sur la fertilité du sol. 01 BP 1091 Bobo-Dioulasso (Burkina Faso)

Reçu le 12 octobre 2023, accepté le 25 novembre 2023, publié en ligne le 30 décembre 2023

DOI : <https://dx.doi.org/10.4314/rafea.v6i4.13>

RESUME

Description du sujet. La calcination offre une opportunité de solubiliser le Burkina phosphate naturel afin d'accroître son efficacité agronomique sur les sols pauvres en phosphore.

Objectif. La présente étude menée à la station expérimentale de Kamboinsé de l'Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles (Ouagadougou, Burkina Faso), a pour objectif d'examiner la contribution du phosphate naturel calciné à l'amélioration de quelques propriétés chimiques des sols ferrugineux tropicaux lessivés sous culture de sorgho (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) et de niébé (*Vigna unguiculata* (L.) Walp).

Méthodes. Les traitements suivants ont été comparés à l'aide de blocs de Fisher complètement randomisés pour le sorgho et le niébé séparément de 2021 à 2022 : Témoin, Matière Organique (MO), Burkina phosphate naturel (BP, 23 kg ha⁻¹ P), Phosphate naturel calciné (PNC, 23 kg ha⁻¹ P), Triple superphosphate (TSP, 23 kg ha⁻¹ P), engrais complexe (NPK 14-23-14), PNC 50 + TSP 50, PNC 75 + TSP 25, et PNC 25 + TSP 75.

La quantité d'azote (N) fournie était de 37 kg ha⁻¹ pour le sorgho et 14 kg ha⁻¹ pour le niébé, celle de phosphore (P) et de potassium (K) étaient respectivement de 23 kg ha⁻¹ et 14 kg ha⁻¹ pour tous les traitements, sauf le Témoin et la MO. Ces quantités ont été appliquées sur des micro parcelles de 20 m².

Résultats. Les résultats obtenus ont indiqué que c'est la combinaison du PNC avec le TSP qui a eu un impact significatif sur la disponibilité de phosphore assimilable et les bases échangeables dans le sol. Les niveaux de phosphore stockés étaient plus élevés avec les combinaisons PNC 50 + TSP 50 (100,2 ± 13,3 %) pour le niébé et PNC 75 + TSP 25 (17,34 ± 6,49 %) pour le sorgho. L'application de PNC seul a également entraîné une augmentation significative des bases échangeables, de la capacité d'échange cationique (CEC) et de la saturation du sol. Ces traitements ont conduit à une augmentation annuelle des bases échangeables et de la capacité de stockage du sol en ions.

Conclusion. Pour gérer efficacement la fertilité des sols ferrugineux tropicaux lessivés, il est nécessaire d'intégrer judicieusement l'utilisation du phosphate naturel calciné dans les pratiques de fertilisation.

Mots-clés: Sols ferrugineux tropicaux, phosphate naturel calciné, bases échangeables, capacité de stockage du sol en ions, Burkina Faso.

ABSTRACT

Improvement of chemical properties of leached tropical ferruginous soil by calcined phosphate rock

Description of the subject. Calcination is an opportunity to improve Burkina phosphate rock solubility and its agronomic efficiency.

Objective. The present study, conducted at the Kamboinsé station of the Institute of Environmental and Agricultural Research (Ouagadougou, Burkina Faso), aimed to examine the contribution of calcined phosphate rock to the improvement of certain chemical properties of leached tropical ferruginous soils under sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) and cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) cultivation.

Methods. The following treatments were compared in randomized bloc design for sorghum and cowpea separately from 2021 to 2022: Control, Organic Matter (OM), Burkina phosphate rock (BP, 23 kg ha⁻¹ P), Calcined Phosphate Rock (PNC, 23 kg ha⁻¹ P), TSP (23 kg ha⁻¹ P), NPK (14-23-14), PNC 50 + TSP 50, PNC 75 + TSP 25, and PNC 25 + TSP 75. Similar amounts of N, P, and K were applied in all treatments, except for the Control and OM.

The amount of nitrogen was 37 kg ha⁻¹ for sorghum and 14 kg ha⁻¹ for cowpea, those of phosphorus and potassium were 23 kg ha⁻¹ and 14 kg ha⁻¹ respectively for all crops and treatments except the control and OM. These amounts were applied in plot of 20 m² area.

Results. The results indicated that the combination of PNC with TSP had a significant impact on the availability of a phosphorus and exchangeable bases of the soil. Phosphorus storage levels were higher with the PNC 50 + TSP 50 combination (100.2 ± 13.3 %) for cowpea and PNC 75 + TSP 25 (17.34 ± 6.49 %) for sorghum. The application of PNC alone also resulted in a significant increase in exchangeable bases, cation exchange capacity (CEC), and soil saturation. The treatments led to an annual increase in exchangeable bases and ion storage capacity in the soil.

Conclusion. It is possible to effectively manage the fertility of leached tropical ferruginous soils by incorporating the use of calcined phosphate rock into fertilization practices.

Keywords: Ferruginous tropical soils, Calcined phosphate rock, Exchangeable bases, soils ions storage capability, Burkina Faso.

1. INTRODUCTION

La sous-utilisation des nutriments en Afrique subsaharienne a entraîné un épuisement significatif des éléments nutritifs du sol, de faibles rendements des cultures et la pauvreté, laissant de nombreuses familles agricoles vulnérables et en insécurité alimentaire (FAO, 2022).

La disponibilité des réserves de phosphates naturels en Afrique subsaharienne offre de nombreuses opportunités pour rehausser le niveau de phosphore des sols, bien que plusieurs contraintes subsistent. Les contraintes qui limitent l'utilisation optimale du phosphate naturel du Burkina Faso sont sa faible teneur en phosphore soluble, sa faible réactivité et la présence d'éléments pénalisants comme l'aluminium et le fer (Bikienga, 2011, Chien *et al.*, 2011). Des efforts sont déployés pour améliorer la qualité et l'efficacité agronomique du phosphate naturel du Burkina Faso afin d'augmenter la disponibilité des engrais pour les agriculteurs. Les processus réussis incluent le phospho-compostage (Chtouki *et al.*, 2022), la combinaison avec les engrais solubles, l'acidulation partielle avec de l'acide sulfurique (Cicek *et al.* 2020) et la calcination (Iwasaki *et al.*, 2022).

Les défis que chaque stratégie de solubilisation devra relever consistent à réduire le coût des engrais chimiques, à minimiser la perturbation des propriétés physiques et chimiques du sol et à préserver la biodiversité des sols agricoles. Il a été rapporté que les apports du phosphate naturel brut affectent le statut phosphaté des sols mais aussi d'autres composantes telles que les bases échangeables (Kouyaté et Sermé 2021), l'acidité et les propriétés biologiques (Dabré *et al.*, 2017). Malgré leur faible solubilité, les phosphates naturels en Afrique de l'ouest sont bien adaptés pour améliorer la fertilité du sol en permettant de recharger le réservoir du « P capital », qui à son tour alimentera le réservoir du P agricole qui serait profitable aux plantes (Bationo *et al.*, 2018).

La calcination du phosphate naturel est un processus essentiel dans la production d'engrais phosphatés de

qualité inférieure, car elle permet d'améliorer la pureté, la solubilité et la réactivité du phosphate, le rendant ainsi plus efficace pour la nutrition des plantes (Bikienga, 2011 et Nakamura *et al.* 2015). Bien qu'il soit moins efficace que le phosphate acidulé, le phosphate naturel calciné a démontré son utilité dans l'augmentation des rendements agricoles (Fukuda *et al.*, 2021; Iwasaki *et al.*, 2022). En conséquence, l'application de phosphate naturel calciné peut entraîner des modifications des propriétés physico-chimiques et biologiques des sols qui méritent d'être élucidées.

Dans cette optique, cette étude vise à évaluer l'impact du phosphate naturel calciné sur le stockage de phosphore assimilable dans le sol ainsi que sur les bases échangeables du sol. L'hypothèse formulée est que l'application de phosphate naturel calciné contribuera à améliorer la disponibilité du phosphore dans le sol, les concentrations de bases échangeables, ainsi que la capacité d'échange cationique du sol.

2. MATERIEL ET METHODES

2.1. Description du site d'étude

L'expérience a été menée au Centre de Recherches Environnementales, Agricoles et de Formation (CREAF) à Kamboinsé (latitude 12° 28N, longitude 1° 32W, avec une altitude d'environ 296 m) dans la région centrale du Burkina Faso. Pendant la période d'étude, les précipitations annuelles étaient de 749,9 mm et 1114,7 mm en 2021 et 2022 respectivement. Les niveaux de précipitations totales pendant les périodes de production du sorgho et du niébé (de juillet à octobre) étaient de 478,8 mm et 756,6 mm en 2021 et 2022 respectivement.

2.2. Dispositif expérimental

L'essai expérimental a été installé sur deux saisons hivernales (2021 et 2022) dans l'optique d'étudier les effets du phosphate naturel calciné sur la production d'une céréale et d'une légumineuse ainsi

que sur les propriétés chimiques d'un sol ferrugineux tropical lessivé. Le dispositif est constitué de blocs de Fischer complètement randomisés avec quatre répétitions par bloc. Le même dispositif a été installé pour le sorgho et pour le niébé en culture continue. Les micro-parcelles étaient de dimension de 5 m x 4 m et séparées de 1 m.

Les traitements ont été constitués de manière à comparer différentes formes de fumures phosphatées. Neuf (09) traitements ont été comparés à savoir : Témoin absolu, matière organique (MO), Burkina phosphate naturel (BP, 23 kg ha⁻¹ P), phosphate naturel calciné (PNC, 23 kg ha⁻¹ P), Triple Super Phosphate (TSP, 23 kg ha⁻¹ P), engrais complexe (NPK, 14-23-14), PNC 50 + TSP 50, PNC 75 + TSP 25, PNC 25 + TSP 75. Les chiffres qui suivent PNC et TSP indiquent la proportion de phosphore couvert par le TSP et le PNC. L'azote (N) et le potassium (K) ont été fournis respectivement par de l'urée et du KCl, tandis que le phosphore (P) a été apporté par le phosphate naturel, le phosphate naturel calciné, le TSP et le NPK (14-23-14) selon les traitements.

La quantité d'azote (N) fournie était de 37 kg ha⁻¹ pour le sorgho et 14 kg ha⁻¹ pour le niébé, celle de phosphore (P) et de potassium (K) étaient respectivement de 23 kg ha⁻¹ et 14 kg ha⁻¹ pour tous les traitements, sauf le Témoin et la MO. La matière organique a été appliquée à 2,5 t ha⁻¹ par an pour tous les traitements, sauf le Témoin. La quantité de matière organique a été répartie uniformément sur la surface totale des micro parcelles (20 m²) puis remuer avant d'effectuer les semis. Les quantités d'engrais nécessaires pour chaque micro parcelle afin de couvrir les besoins de N, P et K ont été dosées et réparties entre les poquets de semis à la main.

2.3. Calcination du phosphate naturel

La calcination du Burkina phosphate (BP) a été effectuée selon la méthode décrite par Nakamura *et al.*

(2015). Pour ce faire une proportion (50 %) du Burkina phosphate a été mélangée aux carbonates respectifs, K₂CO₃ (21 %) + CaCO₃ (25 %) et MgCO₃ (4 %) pour obtenir du phosphate naturel calciné. Les constituants ont été soigneusement mélangés manuellement et calcinés à 900 °C pendant 10 minutes à l'aide d'un four à moufle (FP 32; Yamato Scientific Co., Ltd., Tokyo, Japon) installé à l'Institut de Recherche sur l'Environnement et l'Agriculture (INERA), Ouagadougou, Burkina Faso. Le processus est basé sur le fait qu'à mesure que la température augmente, davantage de phosphore, associé au calcium, à l'aluminium et au fer est libéré. La combinaison de carbonates avec du BP avant la calcination contribue à améliorer la composition chimique et la réactivité de l'engrais obtenu.

2.4. Caractérisation du sol et des fertilisants

Afin d'effectuer la caractérisation des sols de départ un premier prélèvement a été effectué avant l'installation des essais. Pour ce faire, un échantillon composite a été constitué à partir de cinq (05) prélèvements élémentaires dans les profondeurs de 0-10 cm et 10-20 cm en cinq endroits différents dans l'aire utile du périmètre d'expérimentation. Des échantillons de matière organique et de phosphate naturel calciné ont été analysés avant leur application. Le tableau 1 fourni par Traoré *et al.* (2023) présente la composition chimique des fertilisants.

Un prélèvement de sol a été effectué à la fin de la récolte par parcelle élémentaire pour la détermination des effets des fertilisants testés sur les bases échangeables, le phosphore résiduel après récolte (Phosphore assimilable) et la capacité d'échange cationique. Pour ce faire, un échantillon composite a été constitué à partir de cinq (05) points de prélèvement élémentaire dans la profondeur 0-20 cm dans l'air utile (11,52 m²) de chaque micro parcelle (20 m²).

Tableau 1. Caractérisation des fertilisants

Désignation	Burkina phosphate naturel (%)*	Phosphate naturel calciné (%)	Matière organique (%)
Phosphore total (P ₂ O ₅)	28,3	23,20	0,81
P soluble dans l'eau	0,19	11,00	-
P soluble dans le citrate (2 %)	30,00	86,00	-
Potassium total (%)	0,22	12,99	0,72
Azote total (%)	-	-	0,87
Carbone total (%)	-	-	23,59
Calcium total (%)	-	29,47	12,91
Magnésium total (%)	-	0,62	0,26
Cuivre total (%)	-	0,00046	0,0047
Zinc total (%)	-	0,00067	0,012
Manganèse total (%)	-	0,014	0,015

*Données de Bikienga (2011),

Légende : P=phosphore, les tirets indiquent les valeurs non déterminées.

2.5. Méthodes d'analyse des échantillons de sol

Les échantillons de sol collectés ont été séchés à l'ombre puis tamisés à 2 mm avant d'être analysés selon les méthodes appliquées par le laboratoire d'analyse du Bureau National des Sols (BUNASOLS) du Burkina Faso. La détermination du carbone total a été faite selon la méthode de Walkley et Black (1934). L'azote total a été dosé après une minéralisation des échantillons par la méthode Kjeldahl (Hillebrand *et al.*, 1953). Après cette minéralisation, l'azote total a été dosé directement à l'auto-analyseur. De même, après la minéralisation, le phosphore total et le potassium total ont été dosés respectivement à l'auto-analyseur et au photomètre à flamme (BUNASOLS, 1987). Le phosphore assimilable a été déterminé par la méthode Bray I (Bray et Kurtz, 1945) en utilisant une solution mixte de fluorure d'ammonium (0,03M) et d'acide chlorhydrique (0,025M). Le dosage a été

effectué par colorimétrie au spectrophotomètre. Le potassium disponible a été dosé selon la méthode décrite par Walinga *et al.* (1989) en utilisant une solution d'acide chlorhydrique (0,1N) et d'acide oxalique (0,4N). Le pH eau et le pH KCl ont été mesurés respectivement dans une solution d'eau distillée et de KCl à l'aide d'un pH-mètre électronique (AFNOR, 1981). La Capacité d'Echange Cationique (CEC) et les bases échangeables (Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+ et Na^+) ont été déterminés par centrifugation avec l'argent thiouré (0,01M). La CEC et les bases échangeables à savoir Mg^{2+} et Ca^{2+} ont été dosées au spectrophotomètre d'absorption atomique. Le K^+ et le Na^+ ont été dosés au spectrophotomètre à flamme (BUNASOLS, 1987). Les caractéristiques initiales du sol du site d'étude sont résumées dans le tableau 2.

Tableau 2. Caractéristiques physico-chimiques du sol de départ

Paramètres	Profondeur	
	(0-10 cm)	(10-20cm)
Granulométrie		
Sable (%)	25,49	50,98
Limon (%)	56,86	33,33
Argile (%)	17,65	15,69
Paramètres chimiques		
Carbone total (g kg ⁻¹)	0,570	490
Azote total (g kg ⁻¹)	20	20
Phosphore total (mg kg ⁻¹)	197,47	118,48
Potassium total (mg kg ⁻¹)	1029,08	857,57
P assimilable (mg kg ⁻¹) ou P Bray I	3,77	1,42
Potassium disponible (mg kg ⁻¹)	477,47	240,00
pH eau	7,23	7,16
pH KCl	6,28	5,8
CEC (meq/100g)	9,36	9,14
Calcium échangeable (meq/100g)	4,4	3,65
Magnésium échangeable (meq/100g)	0,48	0,33
Potassium échangeable (meq/100g)	0,83	0,75
Sodium échangeable (meq/100g)	0,33	0,23

Calculs et analyses statistiques des données

Le stock assimilable (%) indiquant le stockage de phosphore assimilable après deux années de mise en culture a été estimé à l'aide de la formule suivante :

$$\text{Stock de Bray 1 (\%)} = \frac{P \text{ Bray 1}_{\text{année 2}} - P \text{ Bray 1}_{\text{année 1}}}{P \text{ Bray 1}_{\text{année 1}}} \times 100$$

A la suite de ces calculs, une analyse de variance à deux facteurs (ANOVA) a été utilisée pour évaluer l'impact des traitements, de l'année et de leurs interactions sur les propriétés chimiques du sol concerné. Les différences entre les traitements et les années ont été identifiées à l'aide de R Studio. Les comparaisons multiples des valeurs moyennes ($p < 0,05$) ont été effectuées à l'aide du test DMRT au niveau de signification de 5 %.

3. RESULTATS

3.1. Effet des traitements sur la proportion de P Bray 1 rétrocedé au sol

Les réserves de P Bray 1 (Phosphore assimilable) trouvées dans les sols après la deuxième année de mise en culture, sont présentées dans le tableau 3. Il ressort que les fertilisants impliquant le phosphate naturel calciné (PNC) et non calciné (BP) ont significativement augmenté les réserves de P Bray 1 surtout dans la parcelle de niébé. Pour la parcelle de niébé, les traitements consistant à apporter le PNC seul ou en combinaison avec le TSP (PNC, PNC 75 + TSP 25, PNC 50 + TSP 50, PNC 25 + TSP 75) présentent des moyennes significativement élevées par rapport au Témoin, à la MO et au NPK. Seul le traitement MO a entraîné une perte de P Bray 1. Les plus fortes moyennes des réserves de P Bray 1 ont été obtenues avec la combinaison PNC 50 + TSP 50

(100,2 ± 13,3 %) dans la parcelle de niébé. L'analyse statistique a montré des différences significatives entre les moyennes pour le stock de P Bray 1 (%) dans la parcelle de niébé.

Les résultats ont montré que seul les traitements Témoin, MO, PNC et NPK présente une baisse des réserves de P Bray 1 dans la parcelle de sorgho après deux années de mise en culture. La proportion de P Bray 1 stockée dans le sol présente sa plus forte moyenne (17,34 ± 6,49 %) avec la combinaison PNC 75 + TSP 25. Il ressort qu'il y a une perte de P Bray 1 significativement avec le Témoin, la MO, le PNC et le NPK et une hausse du P Bray 1 avec BP, PNC 75 + TSP 25, PNC 50 + TSP 50, PNC 25 + TSP 75 et TSP.

Tableau 3. Effet des traitements sur le stock de P Bray 1 dans la parcelle de niébé

Traitements	Niébé	Sorgho
	Stock Bray 1 (%)	Stock Bray 1 (%)
Témoin	10,68 ± 5,63 b	-5,25 ± 1,13
MO	-0,17 ± 1,87 b	-8,36 ± 7,02
BP	11,6 ± 12,2 b	1,89 ± 7,48
PNC	79,8 ± 31,6 ab	-6,79 ± 8,94
PNC 75 + TSP 25	43,2 ± 16,9 ab	17,34 ± 6,49
PNC 50 + TSP 50	100,2 ± 13,3 a	3,5 ± 10,4
PNC 25 + TSP 75	67,5 ± 30 ab	3,93 ± 9,1
TSP	58,9 ± 18,5 ab	8,57 ± 7,21
NPK	18,3 ± 12,2 ab	-12,89 ± 6,5
P	< 0,005	0,18

Légende : Pour la même année, les moyennes suivies des mêmes lettres ne présentent pas de différences significatives selon le test DMRT ($p < 0,05$). MO : Matière Organique, PNC : Phosphate naturel calciné, BP : Phosphate naturel du Burkina, TSP et NPK sont des engrais solubles, les erreurs indiquées correspondent aux erreurs standards sur les moyennes.

3.2. Variation de la CEC et des bases échangeables du sol selon les traitements

Dans la parcelle de niébé

Les données du tableau 4 indiquent qu'à la fin de la première année d'essai (2021), les parcelles fertilisées selon la formulation PNC 50 + TSP 50 ont montré des teneurs plus élevées en Ca^{++} ($2,01 \pm 0,24$ meq 100g^{-1}), en K^+ ($0,67 \pm 0,08$ meq 100g^{-1}), en somme des bases échangeables ($3,2 \pm 0,3$ meq 100g^{-1}) de même qu'un taux de saturation plus élevé ($40,51 \pm 3,63$ %) par rapport aux autres. L'analyse statistique a confirmé des différences significatives entre les traitements pour le potassium échangeable et le taux de saturation.

Après les récoltes de 2022, les résultats ont montré que pour la majorité des paramètres mesurés à savoir le Ca^{++} ($2,53 \pm 0,36$ meq 100g^{-1}), le Mg^{++} ($0,54 \pm 0,07$ meq 100g^{-1}), le K^+ ($0,37 \pm 0,07$ meq 100g^{-1}), la

somme des bases ($3,52 \pm 0,47$ meq 100g^{-1}), la capacité d'échange cationique ($8,68 \pm 0,17$ meq 100g^{-1}) ainsi que le taux de saturation ($40,71 \pm 6,19$ %), les parcelles fertilisées avec le phosphate naturel calciné (PNC) ont présenté les moyennes les plus élevées. L'analyse statistique suivie du test de DMRT, a révélé des différences significatives entre les traitements pour l'ensemble des paramètres à l'exception du magnésium (Mg) et du sodium (Na) échangeables. Les résultats n'ont pas montré de différences significatives entre les moyennes de 2021 et 2022 pour les bases échangeables et la CEC. Seul le potassium échangeable a significativement diminué entre 2021 et 2022.

Tableau 4. Variation des bases échangeables et de la CEC dans la parcelle de niébé

Années	Traitements	Ca	Mg	K	Na	SBE	CEC	TS (%)
		(meq 100g ⁻¹)	(meq 100g ⁻¹)	(meq 100g ⁻¹)	(meq 100g ⁻¹)	(meq 100g ⁻¹)	(meq 100g ⁻¹)	
2021	Témoïn	1,27 ± 0,12 c	0,34 ± 0,04 bcd	0,34 ± 0,1 ab	0,07 ± 0,01	2,02 ± 0,14 cd	7,3 ± 0,61	27,75 ± 1,07 c
	MO	1,37 ± 0,1 c	0,56 ± 0,06 abc	0,42 ± 0,06 ab	0,06 ± 0,01	2,41 ± 0,15 bcd	7,87 ± 1,69	33,41 ± 6,57 abc
	BP	1,26 ± 0,0 c	0,21 ± 0,03 d	0,29 ± 0,05 b	0,06 ± 0,01	1,83 ± 0,07 d	7,28 ± 1,09	26,14 ± 2,35 c
	PNC	1,8 ± 0,08 ab	0,22 ± 0,08 d	0,56 ± 0,04 ab	0,07 ± 0,02	2,68 ± 0,3 ab	8,72 ± 0,91	30,82 ± 1,53 bc
	PNC 75 +TSP 25	1,5 ± 0,07 bc	0,33 ± 0,05 cd	0,45 ± 0,1 ab	0,05 ± 0	2,33 ± 0,18 bcd	6,59 ± 0,57	35,4 ± 1,01 ab
	PNC 50 +TSP 50	2,01 ± 0,24 a	0,57 ± 0,03 ab	0,67 ± 0,08 a	0,05 ± 0	3,2 ± 0,3 a	7,91 ± 0,18	40,51 ± 3,63 a
	PNC 25 +TSP 75	1,54 ± 0,12 bc	0,69 ± 0,03 a	0,43 ± 0,02 ab	0,04 ± 0,01	2,7 ± 0,14 ab	8,52 ± 0,44	31,72 ± 1,06 bc
	TSP	1,53 ± 0,05 bc	0,61 ± 0,03 a	0,42 ± 0,14 ab	0,03 ± 0,01	2,59 ± 0,16 bc	7,39 ± 0,94	35,81 ± 2,46 ab
	NPK	1,5 ± 0,11 bc	0,67 ± 0,07 a	0,33 ± 0,05 ab	0,03 ± 0,01	2,54 ± 0,21 bc	8,58 ± 0,76	29,6 ± 0,28 bc
	Probabilité	0,01	<0,001	0,04	0,05	0,003	0,63	0,01
CV(%)	20,33	21,11	36,12	36,08	21,06	20,44	18,83	
2022	Témoïn	1,64 ± 0,19 abc	0,47 ± 0,03	0,33 ± 0,01 ab	0,05 ± 0	2,5 ± 0,18 ab	6,13 ± 0,05 c	40,76 ± 3,21a
	MO	1,96 ± 0,25 abc	0,52 ± 0,07	0,26 ± 0,07 ab	0,05 ± 0	2,79 ± 0,39 ab	7,24 ± 0,35 bc	38,33 ± 3,97ab
	BP	1,61 ± 0,32 abc	0,42 ± 0,06	0,28 ± 0,05 ab	0,05 ± 0	2,36 ± 0,42 ab	7,9 ± 0,6 ab	29,93 ± 4,57bc
	PNC	2,53 ± 0,36 a	0,54 ± 0,07	0,37 ± 0,07 a	0,07 ± 0,01	3,52 ± 0,47 a	8,68 ± 0,17 a	40,71 ± 6,19a
	PNC 75 +TSP 25	2,32 ± 0,25 ab	0,51 ± 0,05	0,27 ± 0,04 ab	0,05 ± 0	3,15 ± 0,33 ab	7,81 ± 0,55 ab	40,16 ± 1,37a
	PNC 50 +TSP 50	1,36 ± 0,24 bc	0,36 ± 0,07	0,25 ± 0,03 ab	0,05 ± 0	2,03 ± 0,3 ab	6,93 ± 0,13 bc	29,11 ± 3,75bc
	PNC 25 +TSP 75	1,54 ± 0,13 abc	0,43 ± 0,03	0,19 ± 0,03 ab	0,05 ± 0	2,21 ± 0,12 ab	7,42 ± 0,32 bc	29,7 ± 0,66bc
	TSP	1,07 ± 0,13 c	0,34 ± 0,02	0,19 ± 0,05 ab	0,05 ± 0	1,66 ± 0,15 b	6,88 ± 0,55 bc	24,12 ± 1,15c
	NPK	1,15 ± 0,12 c	0,36 ± 0,03	0,15 ± 0,02 b	0,05 ± 0	1,71 ± 0,14 b	6,28 ± 0,22 c	27,21 ± 1,69c
	Probabilité	0,003	0,09	0,05	0,08	0,005	0,001	0,01
CV (%)	24,17	20,01	29,64	16,46	21,73	7,78	18,58	
Années	2021	1,53 ± 0,05	0,48 ± 0,03	0,43 ± 0,03	0,05 ± 0	2,48 ± 0,09	7,79 ± 0,27	32,32 ± 1,03
	2022	1,69 ± 0,11	0,44 ± 0,02	0,26 ± 0,02	0,05 ± 0	2,44 ± 0,14	7,25 ± 0,18	33,34 ± 1,54
	Probabilité	0,19	0,49	<0,001	0,63	0,79	0,12	0,53

Légende : les moyennes suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes, MO = Matière organique, PNC = phosphate naturel calciné, BP = Burkina phosphate naturel, CV = coefficient de variation, P = probabilité, Ca = calcium, Mg = Magnésium, K = potassium, Na = sodium, SBE = somme des bases échangeables, CEC = Capacité d'échange cationique, TS = taux de saturation

Dans la parcelle de sorgho

Les résultats présentés dans le tableau 5 révèlent une variation significative des valeurs moyennes des bases échangeables, de la capacité d'échange cationique et du taux de saturation du sol en fonction des traitements appliqués dans la parcelle de sorgho. Ces valeurs montrent que l'impact de la fertilisation phosphatée impliquant le phosphate naturel calciné s'est principalement manifesté à la première année d'essai. Les teneurs en Ca⁺⁺ (2,45 ± 0,02 meq 100g⁻¹), en Mg⁺⁺ (0,71 ± 0,05 meq 100g⁻¹), en K⁺ (0,19 ± 0,01 meq 100g⁻¹), la somme des bases échangeables (3,44 ± 0,04 meq 100g⁻¹) et le taux de saturation (44,61 ± 1,33 %) ont atteint leurs moyennes les plus élevées avec le traitement impliquant le phosphate naturel calciné (PNC) comme source de phosphore. L'analyse statistique a révélé des différences significatives entre les traitements pour le calcium échangeable (Ca⁺⁺), la somme des bases et le taux de saturation. Contrairement à la première année, la fertilisation phosphatée impliquant le phosphate naturel calciné n'a pas eu d'effet significatif sur les

bases échangeables et le taux de saturation du sol après la récolte de la deuxième année. L'analyse statistique suivie du test de DMRT n'a pas mis en évidence des différences significatives entre les traitements.

Il a été observé une augmentation significative des bases échangeables, de la somme des bases et du taux de saturation du sol après deux années de culture du sorgho. Le calcium échangeable a augmenté de 1,82 ± 0,08 meq 100g⁻¹ (2021) à 2,84 ± 0,11 meq 100 g⁻¹ (2022). De même, la somme des bases échangeables et le taux de saturation ont augmenté respectivement de 2021 à 2022, soit de 2,63 ± 0,1 meq 100 g⁻¹ à 3,47 ± 0,12 meq 100 g⁻¹ et de 32,85 ± 1,09% à 49,27 ± 1,74 %. Cependant, le potassium échangeable ainsi que la capacité d'échange cationique (CEC) ont significativement diminué dans la parcelle de sorgho après les deux années de culture.

Tableau 5. Variation des teneurs de bases échangeables et de la CEC dans la parcelle de sorgho

	Traitements	Ca	Mg	K	Na	SBE	CEC	TS (%)
		(meq 100g ⁻¹)	(meq 100g ⁻¹)	(meq 100g ⁻¹)	(meq 100g ⁻¹)	(meq 100g ⁻¹)	(meq 100g ⁻¹)	
2021	Témoin	1,52 ± 0,16 cd	0,55 ± 0,09	0,15 ± 0,02	0,08 ± 0	2,49 ± 0,31 bc	7,92 ± 0,67 ab	31,36 ± 2,48 bc
	MO	1,53 ± 0,14 cd	0,68 ± 0,1	0,17 ± 0,01	0,08 ± 0,01	2,45 ± 0,24 bc	8,93 ± 0,18 ab	27,33 ± 2,19 c
	BP	1,74 ± 0,18 bcd	0,52 ± 0,09	0,15 ± 0,01	0,07 ± 0,01	2,47 ± 0,29 bc	6,7 ± 0,37 bc	36,77 ± 2,91 b
	PNC	2,45 ± 0,02 a	0,71 ± 0,05	0,19 ± 0,01	0,09 ± 0,01	3,44 ± 0,04 a	7,74 ± 0,31 ab	44,61 ± 1,33 a
	PNC 75 +TSP 25	2,16 ± 0,05 ab	0,68 ± 0,03	0,18 ± 0	0,08 ± 0,02	3,1 ± 0,07 ab	9,78 ± 0,51 a	31,87 ± 1,75 bc
	PNC 50 +TSP 50	1,97 ± 0,1 abc	0,51 ± 0,02	0,17 ± 0,03	0,09 ± 0,01	2,74 ± 0,12 abc	8,42 ± 0,36 ab	32,53 ± 0,17 bc
	PNC 25 +TSP 75	1,42 ± 0,25 d	0,4 ± 0,11	0,13 ± 0,02	0,09 ± 0,01	2,05 ± 0,17 c	7,25 ± 0,65 abc	28,4 ± 1,77 c
	TSP	1,76 ± 0,21 bcd	0,44 ± 0,02	0,15 ± 0,02	0,14 ± 0,04	2,48 ± 0,27 bc	8,16 ± 0,75 ab	30,34 ± 1,12 c
	NPK	1,83 ± 0,29 bcd	0,39 ± 0,09	0,15 ± 0,03	0,09 ± 0,01	2,46 ± 0,39 bc	7,52 ± 0,99 ab	32,45 ± 1,62 bc
	Probabilité	0,01	0,05	0,67	0,21	0,02	0,05	<0,0001
CV (%)	22,43	24,63	22,62	32,3	19,93	15,16	17,19	
2022	Témoin	2,6 ± 0,11	0,56 ± 0,05	0,11 ± 0,02	0,08 ± 0	3,35 ± 0,08	6,38 ± 0,13	52,6 ± 2,37
	MO	3,35 ± 0,52	0,54 ± 0,05	0,09 ± 0	0,08 ± 0,02	4,07 ± 0,54	7,1 ± 0,35	57,96 ± 9,03
	BP	3,19 ± 0,12	0,49 ± 0,02	0,1 ± 0,01	0,09 ± 0,01	3,72 ± 0,21	6,79 ± 0,29	55,34 ± 5,65
	PNC	2,89 ± 0,42	0,49 ± 0,05	0,09 ± 0	0,07 ± 0,01	3,54 ± 0,44	7,29 ± 0,33	48,29 ± 4,69
	PNC 75 +TSP 25	3,1 ± 0,23	0,54 ± 0,05	0,09 ± 0	0,1 ± 0	3,82 ± 0,28	7,17 ± 0,25	53,19 ± 3,39
	PNC 50 +TSP 50	3,04 ± 0,25	0,5 ± 0,02	0,09 ± 0	0,07 ± 0,02	3,7 ± 0,24	7,91 ± 0,42	46,71 ± 1,62
	PNC 25 +TSP 75	2,71 ± 0,38	0,44 ± 0,04	0,08 ± 0,01	0,08 ± 0,01	3,31 ± 0,41	6,73 ± 0,28	48,77 ± 4,26
	TSP	2,32 ± 0,26	0,41 ± 0,04	0,08 ± 0,01	0,06 ± 0,01	2,86 ± 0,29	7,47 ± 0,04	38,35 ± 3,94
	NPK	2,34 ± 0,27	0,41 ± 0,05	0,08 ± 0,01	0,08 ± 0,01	2,9 ± 0,33	6,84 ± 0,58	42,18 ± 2,48
	Probabilité	0,26	0,2	0,34	0,43	0,24	0,13	0,13
CV (%)	19,07	15,03	18,83	27,69	16,94	9,17	18,32	
Années	2021	1,82 ± 0,08	0,54 ± 0,03	0,16 ± 0,01	0,09 ± 0,01	2,63 ± 0,1	8,05 ± 0,23	32,85 ± 1,09
	2022	2,84 ± 0,11	0,49 ± 0,01	0,09 ± 0	0,08 ± 0	3,47 ± 0,12	7,08 ± 0,12	49,27 ± 1,74
	Probabilité	<0,0001	0,13	<0,0001	0,08	<0,0001	0,001	<0,0001

Légende : Les moyennes suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes, MO = Matière organique, PNC = phosphate naturel calciné, BP = Burkina phosphate naturel, CV = coefficient de variation, P = Probabilité, Ca = calcium, Mg = Magnésium, K = potassium, Na = sodium, SBE = somme des bases échangeables, CEC = Capacité d'échange cationique, TS = taux de saturation.

4. DISCUSSION

4.1. Contribution du phosphate naturel calciné à l'amélioration des réserves de P des sols ferrugineux tropicaux lessivés

Les réserves élevées de phosphore assimilable (P Bray 1) obtenues avec les combinaisons du PNC avec le TSP comparativement au BP et au PNC seul montrent que c'est le TSP qui a accentué la solubilisation du phosphate calciné. En effet, malgré l'absorption par les plantes et les pertes éventuelles par lessivage, il a été révélé qu'une part substantielle du P Bray 1 subsiste dans les sols sous l'influence de ces deux traitements à savoir PNC 75 + TSP 25 et PNC 50 + TSP 50.

La dissolution rapide du TSP, créant un environnement favorable au développement du système racinaire, favorise de ce fait la solubilisation du phosphate naturel (Akande, 2011 ; Kouyaté *et al.*, 2020). Le phosphate naturel calciné (PNC) utilisé sans combinaison avec le TSP seul n'a pas eu un impact significatif sur les réserves de phosphore dans les sols pour les deux cultures. Ceci s'explique par le fait que le phosphore pourrait être immobilisé en raison des niveaux élevés de calcium, et également parce que la calcination ne semble pas favoriser une solubilisation rapide du phosphate brut (BP). Les analyses ont révélé la présence de quantité

importante de calcium dans le PNC et dans les sols pour les traitements PNC pour les deux cultures. L'immobilisation du phosphore par le calcium peut se produire principalement dans des sols alcalins ou à pH élevé, où la concentration de calcium est élevée (Kouyaté, 2015). Dans ces conditions, le phosphore peut réagir avec le calcium pour former des précipités de phosphate de calcium, le dicalcium phosphate particulièrement, qui sont moins disponibles (Kouyaté, 2015 ; Weil et Brady, 2017).

Cette immobilisation n'a pas impacté les combinaisons du PNC avec le TSP car les résultats dévoilent un impact significatif des traitements PNC 75 + TSP 25 et PNC 50 + TSP 50 sur le stockage potentiel de phosphore après la mise en culture sur deux années. En plus, toutes les combinaisons du PNC et TSP ont entraîné une hausse des stocks de P Bray 1 dans la parcelle de niébé surtout. L'augmentation des stocks de P Bray 1 avec ces traitements laisse entrevoir des possibilités de rehausser le niveau de phosphore libre dans les sols ferrugineux tropicaux lessivés. Il ressort également des réserves positives de P Bray 1 avec le BP non

calciné pour les deux cultures. Cela présage que malgré la faible solubilisation du BP, son application peut concourir à rehausser le phosphore du sol. Cela corrobore plusieurs résultats précédents (Bationo *et al.*, 2018 ; Chien, 2019) sur l'efficacité du phosphate naturel à améliorer le statut phosphaté des sols ferrugineux tropicaux.

Les réserves potentielles de P dans les sols ont été plus importantes avec le niébé qu'avec le sorgho pour tous les traitements en raison des besoins nutritionnels des cultures. En effet, le sorgho possède un système racinaire plus étendu que le niébé facilitant un épuisement du sol en phosphore dans la zone racinaire (Weil et Brady, 2017). Les légumineuses peuvent contribuer à enrichir le sol rhizosphérique en raison de la forte symbiose entre ces racines et les microorganismes (Faucon *et al.*, 2015). L'amélioration des niveaux de phosphore dans les sols ferrugineux tropicaux lessivés est possible grâce à une gestion appropriée de la fertilisation, qui inclut l'utilisation du phosphate naturel calciné.

4.2. Contribution du phosphate naturel calciné à l'augmentation des bases échangeables et la CEC du sol

Les résultats présentés démontrent que l'utilisation du phosphate naturel calciné (PNC) en tant que fertilisant entraîne une amélioration remarquable des bases échangeables dans les sols, comparativement au phosphate non calciné et aux engrais solubles. Cette amélioration des bases s'accompagne d'une saturation du complexe absorbant. Le processus de calcination provoque la dissociation des carbonates, comme l'ont souligné El Ouardi *et al.* (2012). Cette dissociation favorise ensuite une libération progressive des bases échangeables qui étaient initialement présentes dans le phosphate naturel, les rendant disponibles dans la solution du sol, et par conséquent, facilement accessibles aux racines des plantes. Cette présence de bases facilitée par le PNC est favorable à la CEC du sol et la saturation du complexe absorbant car elle entraîne la diminution des ions H^+ sur les sites d'absorption du complexe absorbant et dans la solution du sol. En effet, la CEC du sol est corrélée non seulement à la texture du sol mais aussi à la somme des bases échangeables et le pH (Julien et Tessier 2020). La présence de cations alcalins dans la solution du sol facilite la saturation du complexe absorbant en remplissant ses sites de fixation négativement chargés. Cela signifie que le sol peut retenir et fournir plus de nutriments essentiels aux plantes, ce qui est bénéfique pour la croissance des plantes et pour le sol. Des résultats similaires montrant les effets positifs du phosphate naturel sur la capacité de stockage des bases échangeables du sol ont été rapportés par Akande (2011). Kouyaté (2015) a rapporté des résultats similaires, toutefois il convient de signifier que la

hausse de Ca dans le sol augmente le pH et cela est défavorable à la solubilisation du phosphate naturel. La hausse du taux de calcium contribue également à expliquer le manque d'effets significatifs du PNC précédemment observé sur le P Bray 1 du sol.

5. CONCLUSION

Les résultats de l'étude ont montré que l'application de phosphate naturel calciné en combinaison avec le TSP a contribué à augmenter significativement les réserves de phosphore du sol après deux années de mise en culture. Les traitements PNC 50 + TSP 50 ($100,2 \pm 13,3 \%$) et PNC 75 + TSP 25 ($17,34 \pm 6,49 \%$) ont indiqué des valeurs moyennes significativement les plus élevées du stock de P Bray 1 respectivement pour le niébé et pour le sorgho. Les teneurs de bases échangeables ont été significativement améliorées par le phosphate naturel calciné (PNC et PNC 50 + TSP 50). En somme, c'est la combinaison du phosphate naturel calciné avec le TSP qui entraîne une augmentation substantielle du phosphore assimilable mais aussi des bases échangeables.

L'augmentation des réserves de P Bray 1 ainsi que celle des bases échangeables ont été particulièrement remarquables dans le champ de niébé par rapport au sorgho en raison de sa capacité à stimuler les microorganismes du sol qui peuvent solubiliser les phosphates par le biais de son système racinaire. Ces conclusions suggèrent qu'il est judicieux de réévaluer la pertinence de la calcination du phosphate naturel en vue de son utilisation agricole, étant donné qu'il doit être combiné avec le TSP avant d'être appliqué comme fertilisant pour les sols.

Enfin, compte tenu du coût élevé des engrais chimiques et des besoins énergétiques élevés de la calcination, l'application du phosphate naturel brut doit être encouragée davantage dans les systèmes de production à faibles revenus afin d'augmenter les rendements et d'améliorer la fertilité des sols. Le phosphate naturel calciné serait un amendement efficace pour les sols pour améliorer leur capacité de stockage en ions, des études futures devront évaluer la viabilité économique de la calcination du phosphate naturel.

Remerciements

Cette étude a été réalisée grâce à l'appui technique et financier de l'Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles du Burkina Faso à travers le projet Recherche Scientifique et Technologique pour le Développement (SATREPS).

Références

AFNOR, 1981. Détermination du pH. In *AFNOR ISO 103 90, Qualité des sols*, pp.339–348.

- Akande M., 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*, 1(11), 471-480. <http://www.cabdirec.org/abstracts/20123357873.html>.
- Bationo, Sedogo MP., Bado VB., Hien V. & Ouattara B., 2018. Chapter 9. Role of Local Agro-minerals in Mineral Fertilizer Recommendations for Crops: Examples of Some West Africa Phosphate Rocks Franc. In A. Bationo et al. (eds.), *Improving the Profitability, Sustainability and Efficiency of Nutrients Through Site Specific Fertilizer Recommendations in West Africa Agro- Ecosystems*, pp. 157-180. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-58789-9>
- Bikienga IM., 2011. Les phosphates naturels du Burkina Faso: Caractérisation efficacité agronomiques et intérêt économique. Editions Techniques et Professionnelles Groupe Horizon.
- Bray RH., & Kurtz LT. 1945. Determination of total organic P and available forms of phosphorus in soils. *Soil Science*, 59, 39-45.
- Bureau National des Sols (BUNASOLS), 1987. *Méthodes d'analyse physique et chimique des sols, des eaux et des plantes*. Document technique BUNASOLS, n° 3, 159 p.
- Chien S., 2019. Enhancement Effect of Water-Soluble Phosphorus on Agronomic Effectiveness of Phosphate Rocks. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 50(16), 2065-2073. <https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1654502>.
- Chien SH., Prochnow LI., Tu S. & Snyder C S., 2011. Agronomic and environmental aspects of phosphate fertilizers varying in source and solubility: an update review. *Nutr. Cycl. Agroecosyst*, 89, 229-255. <https://doi.org/10.1007/s10705-010-9390-4>
- Chtouki M., Bargaz A., Lyamlouli K., Oukarroum A. & Zeroual Y., 2022. A phospho-compost biological-based approach increases phosphate rock agronomic efficiency in faba bean as compared to chemical and physical treatments. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(49), 74012-74023. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21087-z>
- Cicek H., Bhullar GS., Mandloi LS., Andres C. & Riar AS., 2020. Partial acidulation of rock phosphate for increased productivity in organic and smallholder farming. *Sustainability (Switzerland)*, 12(2), 1-13. <https://doi.org/10.3390/su12020607>.
- Dabré A., Hien E., Some D. & Drevon JJ., 2017. Effets d'amendements organiques et phosphatés sous zaï sur les propriétés chimiques et biologiques du sol et la qualité de la matière organique en zone soudano-sahélienne du Burkina Faso. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 11(1), 473-487. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v11i1.38>
- El Ouardi E M., Chehouani H., Mrani I., Anoua M. & Noubhani A., 2012. Optimization of the heat treatment of phosphate. *Revue de Métallurgie, Cahiers d'Informations Techniques*, 109(6), 453-463. <https://doi.org/10.1051/metal/2012041>
- FAO, 2022. *Soils for nutrition: state of the art*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cc0900en>
- Faucon M., Houben D., Reynoird J., Mercadal-Dulaurent AM., Armand R. & Lambers H., 2015. Advances and Perspectives to Improve the Phosphorus Availability in Cropping Systems for Agroecological Phosphorus Management. *Advances in Agronomy*, 134, 51-79. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2015.06.003>
- Fukuda M., Soma DM., Iwasaki S. & Nakamura S., 2021. Site-specific responses of lowland rice to acidulated and calcined phosphate rock fertilizers in the Center-West region of. *PLOS ONE*, 14(2), 1-20. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0250240>
- Hellal FAA., Nagumo F. & Zewainy RM., 2013. Influence of phosphocompost application on phosphorus availability and uptake by maize grown in red soil of Ishigaki Island, Japan. *Agricultural Sciences*, 4(2), 102-109. <https://doi.org/10.4236/as.2013.42016>
- Hillebrand WF., Lundell GE., Bright HA. & Hoffman J.I., 1953. *Applied inorganic analysis*. 2nd edition, J. Wiley et I. Sons (eds.), 1034 p.
- Iwasaki S., Ikazaki K., Bougma A. & Nagumo F., 2022. Appropriate Use of Local Phosphate Rock Increases Phosphorus Use Efficiency and Grain Yield of Sorghum and Cowpea in the Sudan Savanna. *Frontiers in Soil Science*, 1, 1-12. <https://doi.org/10.3389/fsoil.2021.709507>
- Julien JL. & Tessier D., 2021. Rôles du pH, de la CEC effective et des cations échangeables sur la stabilité structurale et l'affinité pour l'eau du sol. *Étude et Gestion des Sols*, 28, 159-179. <http://www.afes.fr/publications/revue-etude-et->
- Kouyaté AB., 2015. *Impact of Tilemsi Phosphate Rock on Soil Phosphorus*. PhD Thesis, University of Science and Technology, Kumassi, Ghana, 205p.
- Kouyaté AB., Ibrahim A., Serme I. & Dembele G., 2020. 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. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 14(9), 3285-3296.
- Kouyaté AB. & Serme I., 2021. Evaluation de l'efficacité du Phosphate Naturel de Tilemsi (PNT) sous différentes pratiques de travail du sol en zone Sahélienne du Mali. *Innovative Space of Scientific Research Journals*, 34(4), 845-857.
- Nakamura S., Imai T., Toriyama K., Tobita S., Matsunaga R., Fukuda M., & Nagumo F. 2015. Solubilization of Burkina Faso phosphate rock through calcination method. *Japanese Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 86(6), 534-538. https://doi.org/10.20710/dojo.86.6_534
- Traoré B., Traoré M., Birba S., Nacro HB., Sarr PS. & Ouattara B. 2023. Short-term effect of calcined phosphate rock on soil macrofauna diversity and abundance in lixisol in a semi-arid area of Burkina Faso. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 39(2), 655-666.
- Walinga J., Van V., Houba V. & Van D. 1989. *Plant analysis procedures*. Wageningen Agricultural University, pp.197-200.
- Walkley A. & Black IA. 1934. *An examination of the Detjareff method for determining soil organic matter and*

a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Science, 29–38.

Weil RR. & Brady NC., 2017. Phosphorus and Potassium, Chapter 14. *The Nature and Properties of soils*, 19, 643–695.