

## Effet du phosphate naturel partiellement acidulé sur les propriétés physicochimiques d'un sol ferrugineux tropical lessivé

Jacques SAWADOGO<sup>1,2\*</sup>, Fousseni SOMA<sup>2</sup>, Gregbo Yann Kévin ZOUZOUHO<sup>4</sup>, Ali OUATTARA<sup>3</sup>,  
Wend-Panga Florent Rufin KABORE<sup>3</sup> et Yasmina Bil Zonabou SAYAOGO<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Centre National de la Recherche Scientifique et Technologique (CNRST), Département de Gestion des Ressources Naturelles et Systèmes de Productions, Laboratoire des Ressources Naturelles et Innovations Agricoles (LaReNIA), 01 BP 476 Ouagadougou 01, Burkina Faso

<sup>2</sup> Université Norbert ZONGO, Laboratoire de Chimie Analytique, de Physique Spatiale et Énergétique (L@CAPSE), Avenue Maurice Yaméogo, Koudougou BP 376, Burkina Faso

<sup>3</sup> Université Thomas SANKARA, Unité de Formation et de Recherche en Sciences et Technologie (UFR/ST), Département de Chimie, 12 BP 417 Ouagadougou 12, Saaba

<sup>4</sup> Université Saint Thomas d'Aquin (USTA), Faculté des Sciences et Technologies, Département de Chimie, 06 BP 10212 Ouagadougou 06, Burkina Faso

(Reçu le 29 Janvier 2026 ; Accepté le 24 Mars 2026)

\* Correspondance, courriel : [jacques.sawadogo@inera.bf](mailto:jacques.sawadogo@inera.bf)

### Résumé

Cette étude évalue l'effet du phosphate naturel partiellement acidulé (PNPA) sur certaines propriétés chimiques et physiques d'un sol ferrugineux tropical lessivé du Burkina Faso. Un essai en pots, entièrement randomisé, a été mis en place avec neuf traitements et quatre répétitions. Les traitements comprenaient : un témoin sans fertilisation, du compost enrichi au *Trichoderma harzianum*, du Burkina phosphate, du triple superphosphate (TSP), du NPK (14-23-14-6S), du PNPA seul, ainsi que trois combinaisons PNPA–TSP (25/75, 50/50 et 75/25). Les résultats montrent une amélioration significative des propriétés chimiques et physiques du sol par rapport au témoin. La combinaison 50 % PNPA et 50 % TSP s'est révélée la plus performante, avec : une stabilisation du pH (6,2 à 8,4), une augmentation de la capacité d'échange cationique (7,97 à 15,53 meq/100 g), une hausse de la conductivité électrique (4,88 à 8,46 dS·m<sup>-1</sup>), une amélioration de la capacité de rétention en eau (1,88 à 5,46 %) et une légère variation de la teneur en sable (33,56 à 34,36 %). Ainsi, l'association équilibrée du phosphate naturel partiellement acidulé (50 %) et du triple superphosphate (50 %) représente une approche fertilisante durable et économiquement avantageuse. Elle permet de valoriser les ressources locales tout en améliorant la productivité agricole dans les zones à faible fertilité du Burkina Faso.

**Mots-clés :** sol ferrugineux tropical lessivé, phosphate acidulé, conductivité électrique, capacité de rétention en eau, fertilité du sol, Burkina Faso.

## Abstract

### Effect of partially acidulated natural phosphate on the physicochemical properties of a leached tropical ferruginous soil

This study evaluates the effect of partially acidified natural phosphate (PANP) on certain chemical and physical properties of a leached tropical ferruginous soil from Burkina Faso. A fully randomized pot trial was conducted with nine treatments and four replications. The treatments included: a control with no fertilization, *Trichoderma harzianum*-enriched compost, Burkina phosphate, triple superphosphate (TSP), NPK (14-23-14-6S), PANP alone, and three PANP-TSP combinations (25/75, 50/50, and 75/25). The results show a significant improvement in the chemical and physical properties of the soil compared to the control. The 50% PNPA and 50% TSP combination proved to be the most effective, with: pH stabilization (6.2 to 8.4), an increase in cation exchange capacity (7.97 to 15.53 meq/100 g), a rise in electrical conductivity (4.88 to 8.46 dS·m<sup>-1</sup>), an improvement in water retention capacity (1.88 to 5.46%), and a slight variation in sand content (33.56 to 34.36%). Thus, the balanced combination of partially acidified natural phosphate (50%) and triple superphosphate (50%) represents a sustainable and economically advantageous fertilization approach. It allows for the utilization of local resources while improving agricultural productivity in low-fertility areas of Burkina Faso.

**Keywords :** *leached tropical ferruginous soil, acidified phosphate, electrical conductivity, water retention capacity, soil fertility, Burkina Faso.*

## 1. Introduction

Les sols ferrugineux tropicaux lessivés couvrent environ 233 070 km<sup>2</sup>, soit près de 85 % du territoire du Burkina Faso [1 - 3]. En effet, les sols sahariens, notamment ceux du Burkina Faso, se caractérisent par une faible teneur en phosphore et en nutriments minéraux indispensables à la croissance végétale [4, 5]. De plus, la teneur en phosphore (P) assimilable de ces sols est d'environ 0,4 mg·kg<sup>-1</sup>, tandis que leur teneur en nutriments essentiels demeure faible, ce qui limite fortement leur fertilité naturelle [6, 7]. Cette pauvreté résulte de la faible densité de la couverture végétale et la limitation de la production de biomasse caractéristique typique des zones arides [8, 9]. La mise en valeur des terres dans ces régions, l'augmentation de la productivité par unité de surface et leur conservation nécessitent des études plus approfondies [1, 3, 10]. Au Burkina Faso, les sols sont d'origine tropicale lessivée et principalement dominée par une texture sableuse en surface et argilo-sableux en profondeur ; c'est le cas de la province et de la région du Kadiogo [11 - 13]. Compte tenu de leurs caractéristiques, ces sols présentent des propriétés chimiques et physiques médiocres. Une stratégie d'amélioration consiste à leur apporter du phosphate naturel partiellement acidulé, ce qui permet d'enrichir simultanément leurs qualités chimiques et physiques. Pour mieux comprendre l'action du phosphate naturel partiellement acidulé, sur les sols ferrugineux tropicaux lessivés, une étude expérimentale a été réalisée. Cette étude vise à évaluer l'effet du phosphate naturel partiellement acidulé, appliqué seul ou en association avec le triple superphosphate, sur l'évolution des propriétés physico-chimiques des sols ferrugineux tropicaux lessivés. L'approche permet de déterminer le potentiel de ces fertilisants dans l'amélioration de la fertilité et la durabilité des systèmes agricoles en zones tropicales.

## 2. Matériel et méthodes

### 2-1. Matériel

Les expérimentations ont été réalisées au Centre de Recherches Environnementales, Agricoles et de Formation (CREAF) de Kamboinsé, situé dans la province du Kadiogo (12°28'N, 1°32'W). Le site d'études est situé entre les isohyètes 600 mm et 900 mm avec un climat de type nord-soudanien [14, 15]. La province étudiée présente un régime climatique bimodal, marqué par une saison pluvieuse de cinq mois (juin–octobre) et une saison sèche de sept mois (novembre–mai). Le sol du site expérimental appartient à la classe des lixisols, caractérisés par une faible teneur en nutriments essentiels, ce qui limite leur fertilité naturelle et justifie l'évaluation de stratégies de fertilisation adaptées [16]. En effet, les Lixisols présentent une faible adsorption par rapport à d'autres sols, mais ils possèdent tout de même des schémas d'adsorption qui peuvent conduire à la fixation de P [17]. Leur réactivité peut être attribuée à des facteurs tels qu'une faible capacité de rétention des cations, une forte fixation du P et une sensibilité à l'érosion et à la dégradation [18, 19].

### 2-2. Méthodes

Dans cette étude, les engrais utilisés sont constitués de compost enrichi au *Trichoderma harzianum*, de NPK (14-23-14-6S), de Burkina phosphate et de phosphate naturel partiellement acidulé. Le sol utilisé avait une texture de 50,98% de sable, 33,33% de limon et 15,69% d'argile. Il est neutre (pH = 7,2), non calcaire et salé (conductivité électrique de 3,3 dS.m<sup>-1</sup>). Outre une très faible teneur en matière organique (0,3 %) et en azote, le sol étudié se caractérise par une capacité d'échange cationique limitée (6,85 meq/100 g). Ces propriétés témoignent d'une fertilité intrinsèque réduite, renforçant la nécessité d'apporter des amendements adaptés pour améliorer la disponibilité des nutriments et la productivité agricole (*Tableau 1*) [1]. Pour la présente étude, un dispositif en blocs complètement randomisés a été réalisé.

**Tableau 1 : caractéristiques du sol initial (avant expérimentation)[1]**

Caractéristiques du sol	Valeur (0 -20 cm)	
Taille des particules (%)	Limon	33,33
	Argile	15,69
	Sable	50,98
pH (1/2,5)		6,23
CE à 25°C (1/5) (dS/m)		3,3
MO (%)		0,3
CEC (meq/100g de sol)		6,85
Capacité de rétention en eau (%)		30,25
Pbray l (mg.kg <sup>-1</sup> )		3,77

*Légende : CE : conductivité électrique ; MO : matière organique ; CEC : capacité d'échange cationique ; P : phosphore.*

Les traitements appliqués étaient les suivants : T0 : témoin sans engrais ; T1 : compost enrichi au *Trichoderma harzianum* (CETH = 15 t. ha<sup>-1</sup>) ; T2 : Burkina phosphate (BP = 187 kg. ha<sup>-1</sup>) ; T3 : triple superphosphate (TSP = 117 kg.ha<sup>-1</sup>) ; T4 : NPK ( 14-23-14-6S = 100 kg.ha<sup>-1</sup>) ; T5 : phosphate naturel partiellement acidulé (PNPA = 107 kg.ha<sup>-1</sup>) ; T6 : 25% PNPA + 75% TSP ; T7 : 50% PNPA + 50% TSP ; T8 : 75% PNPA + 25% TSP. La mise en place des tests en pots a été effectuée en saison humide le 23 juillet 2024 selon le dispositif expérimental adopté. Chaque pot en plastique (diamètre supérieur : 23 cm, diamètre inférieur : 15,3 cm et 21,4 cm de profondeur soit un volume moyen de 6246,7 cm<sup>3</sup>) a été percé et contenant 10 kg de sol avec une densité apparente de 1,54. Le sol a été bien mélangé et séché avant l'utilisation et les mélanges (sol-

*Trichoderma harzianum*) ont été préparés à l'état sec dans de grands récipients avant d'être mis dans les pots percés. Quatre répétitions ont été effectuées pour chaque traitement, soit 144 pots au total. Les irrigations ont été réalisées au besoin tout au long du cycle de l'expérience (70 jours), de manière à maintenir l'humidité à un niveau optimal correspondant à d'environ 75% de la capacité au champ, soit 2,5 litres/pot [1]. À l'issue de l'expérimentation, des échantillons de sol ont été collectés afin de procéder à une caractérisation approfondie. Les paramètres analysés incluaient le pH, la conductivité électrique, la capacité de rétention en eau, la capacité d'échange cationique, la teneur en matière organique, le phosphore assimilable et la granulométrie. Ces mesures permettent d'évaluer l'impact des traitements sur l'évolution des propriétés physico-chimiques du sol et d'apprécier leur potentiel agronomique.

### **2-2-1. Phosphate naturel brut (PNB)**

Le PNB testé est celui du site de gisement de Kodjari (Burkina Faso) reconnu comme l'un des PNB à faible teneur en Afrique subsaharienne. Selon les études de Nakamura et al. [20], les PNB de Kodjari seraient des dépôts sédimentaires protérozoïques, et leur réserve a été estimée à 60 millions de tonnes. Les phosphates naturels bruts en poudre sont accessibles sur le marché local à un coût d'environ 4 500 FCFA pour un sac de 50 kg. Leur teneur en phosphore assimilable est de  $117 \text{ g P} \cdot \text{kg}^{-1}$  (soit 268 g P par sac), ce qui les rend compétitifs par rapport aux engrais importés. Cette concentration est en accord avec les valeurs rapportées par Zapata ( $250 \text{ g P}_2\text{O}_5 \cdot \text{kg}^{-1}$ ), confirmant la pertinence de l'utilisation de cette ressource locale dans les stratégies de fertilisation durable [21]. Aussi, la solubilité de ce PNB dans l'acide citrique est 41,4%, mais il contient peu de phosphore (P) soluble dans l'eau.

### **2-2-2. Préparation du phosphate naturel partiellement acidulé (PNPA)**

Pour la préparation du phosphate naturel partiellement acidulé (PNPA), la méthode d'acidulation décrite par Braithwaite et Iwasaki [12, 22] a été mise en œuvre. Le taux d'ajout d'acide sulfurique a été déterminé en fonction de la composition minérale du phosphate naturel brut (PNB). La préparation du phosphate naturel partiellement acidulé à 75 % (PNPA75) a consisté à incorporer 3 268 mL d'acide sulfurique ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) commercial dilué à 10 kg de phosphate naturel brut (PNB). Le mélange a été effectué dans un appareil de 30 litres de capacité, réglé à une vitesse de rotation de  $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Ce procédé permet une acidulation partielle contrôlée, favorisant la solubilisation du phosphore et l'amélioration de l'efficacité agronomique du fertilisant. Après un malaxage de cinq (05) minutes pour rendre la solution homogène, l'ensemble restera hermétiquement fermé pendant quatre (04) heures dans le mixeur pour permettre la finalisation des différentes réactions chimiques. Des formulations telles que les 50 % et 100 % d'acidulation (PNPA50 et PNPA100) ont également été préparées. Le produit obtenu est ensuite séché à l'air libre pendant quatre (04) jours puis à l'étuve à une température de  $105^\circ \text{C}$  pendant 24 heures. À l'issue du processus de préparation, le phosphate naturel partiellement acidulé (PNPA) a été broyé à l'aide d'un broyeur muni d'un tamis de 0,7 mm afin d'obtenir une granulométrie homogène. Les propriétés chimiques du produit obtenu ont été caractérisées conformément aux protocoles du Centre d'inspection des matériaux alimentaires et agricoles, garantissant la fiabilité et la comparabilité des résultats [23]. La solubilité dans l'eau, la solubilité dans le citrate d'ammonium alcalin, ainsi que la solubilité dans l'acide citrique à 2 % ont été mesurées.

### **2-2-3. Analyse physico-chimique du sol**

Le pH et la CE du sol ont été déterminés suivant la méthode d'extraction solide/liquide de 1 :2,5 par la méthode de l'électrode de verre utilisant le LAQUA F72 (HORIBA, Japon) et l'EC-mètre ES51 (HORIBA) respectivement. Les teneurs en azote total et en carbone ont été mesurées par une méthode de combustion sèche à l'aide d'un

analyseur Sumigraph NC 220F, garantissant une précision élevée. Le phosphore assimilable du sol a été extrait suivant le protocole de Bray I, puis quantifié par spectrophotométrie UV-visible en appliquant la méthode colorimétrique du bleu de molybdate. Ce dispositif analytique permet d'obtenir des données fiables sur la disponibilité des nutriments, essentielles pour l'évaluation de la fertilité des sols étudiés [24].

### 2-3. Analyse des données

Les comparaisons multiples ont été effectuées selon la procédure de Newman-Keuls (NKS), tandis que les différences significatives entre deux traitements ont été déterminées à l'aide du test de Student. L'ensemble des analyses statistiques a été réalisé à l'aide du logiciel GenStat (version 12.1). Les visualisations graphiques ont été générées avec RStudio (version 2024.12.1), en lien avec l'environnement R (version 4.5.0) et le tableur Excel.

## 3. Résultats

### 3-1. Caractérisations chimiques des fertilisants

Le phosphate naturel partiellement acidulé (**Tableau 2**) et le compost enrichi au *Trichoderma harzianum* (**Tableau 3**) ont fait l'objet d'une caractérisation chimique. Les deux types de fertilisants ont été analysés au Bureau National des Sols (BUNASOLS) du Burkina Faso. Les analyses chimiques (**Tableau 2**) ont révélé que le phosphate naturel partiellement acidulé (PNPA) présente une forte acidité (pH = 4,04) et une teneur élevée en phosphore assimilable (76,07 mg·kg<sup>-1</sup>).

**Tableau 2 :** *Caractérisations chimiques du phosphate naturel partiellement acidulé*

N	P	P/eau	P/citrate	P <sub>assimilable</sub>	K	Ca	Mg	Zn	pH
(%)	(%)	(%)	(%)	(mg/kg)	(%)	(g/Kg)	(g/Kg)	(mg/kg)	eau
0,041	21,66	28,76	68,46	76,07	1,202	17,67	1,55	5,04	4,04

*Légende : PNPA : phosphate naturel partiellement acidulé ; N : Azote ; P : Phosphore ; K : Potassium ; Ca : Calcium ; Mg : Magnésium ; Zn : Zinc ; pH : potentiel hydrogène.*

Le compost enrichi au *Trichoderma harzianum* (CETH) contient plusieurs champignons saprophytes imparfaits du sol. Il est efficace lorsqu'il est utilisé avant l'installation des champignons pathogènes (**Tableau 3**) confirmant ainsi les bonnes teneurs en éléments fertilisants obtenus.

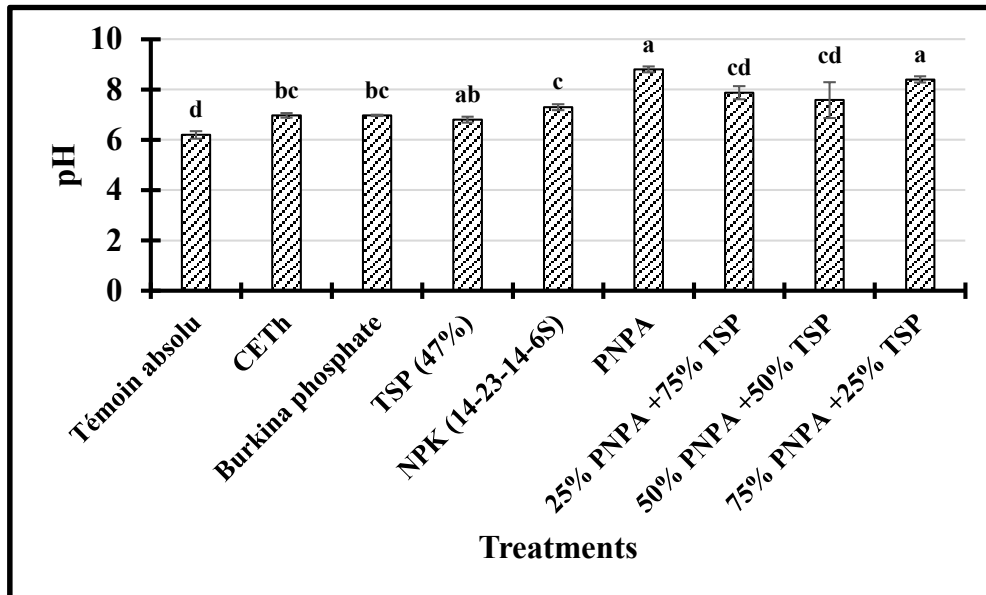
**Tableau 3 :** *Caractéristiques chimiques du compost enrichi au Trichoderma harzianum*

Teneur en éléments minéraux						
pH	C/N	C (g.kg <sup>-1</sup> )	MO (%)	N (g.kg <sup>-1</sup> )	P (g.kg <sup>-1</sup> )	K (g.kg <sup>-1</sup> )
7,9	11	11,59	19,98	1,08	10,44	11,42

### 3-2. Potentiel à Hydrogène (pH) des sols analysé

L'apport des différentes sources de phosphore, particulièrement le phosphate naturel partiellement acidulé (PNPA) a permis d'améliorer significativement le pH du sol sans le rendre acide comme toutes attentes (**Figure 1**). L'analyse de la variance (ANOVA à un facteur) a révélé une différence très hautement significative (p < 0,0001) entre le pH des différents traitements appliqués. Par rapport au témoin absolu et au CETH,

l'élévation du pH s'est révélée plus prononcée dans les sols amendés exclusivement avec du phosphate naturel partiellement acidulé (PNPA), atteignant une valeur de 8,8. Cette alcalinisation excessive peut induire des carences en micronutriments. En revanche, la combinaison PNPA–TSP (50/50) a permis de stabiliser le pH à 8,4, offrant un compromis favorable qui limite les risques de déséquilibres nutritionnels tout en maintenant une amélioration de la fertilité du sol.

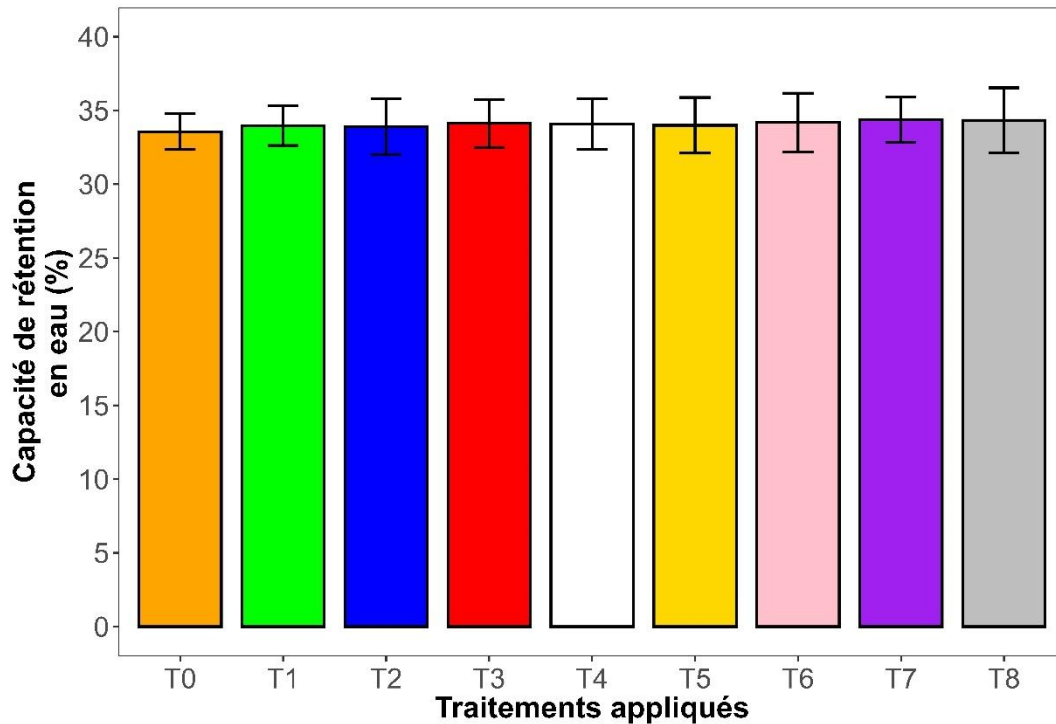


**Figure 1** : Effet des traitements sur le pH du sol

*Légende* : CETH : compost enrichi au *Trichoderma harzianum* ; TSP : triple super phosphate ; PNPA : phosphate naturel partiellement acidulé ; les barres représentent les moyennes +/- de l'erreur standard de la moyenne ; les lettres différentes indiquent une différence significative ( $p < 0,05$ ) entre les traitements pendant la période d'expérimentation.

### 3-3. Capacité de rétention en eau (CRE) en fonction des traitements appliqués

L'humidité équivalente augmente (**Figure 2**) avec l'ajout des engrais phosphatés encore plus visible avec le phosphate naturel partiellement acidulé (PNPA). La capacité de rétention en eau été significativement améliorée par les traitements. Elle varie de 33,56% (T0) à 34,36% (T7). Les sols différents sols amendés avec la combinaison de 50% PNPA + 50% TSP présentent une bonne rétention en eau, ce qui favorise une meilleure disponibilité de l'eau pour les plantes.



**Figure 2 :** *Variation de la capacité de rétention en eau en fonction des traitements appliqués*

**3-4. Conductivité électrique (CE) en fonction des traitements appliqués**

Tout comme la CRE, la conductivité électrique a significativement augmenté, reflétant une meilleure disponibilité en nutriments (**Figure 3**). L'analyse montre que la CE augmente aussi en fonction du type de fertilisants et de doses appliquées confirmant ainsi, l'existence d'une différence hautement significative entre les traitements. Aussi, tous les traitements appliqués à l'exception du témoin absolu ont une valeur de CE supérieure à 4 dS.m<sup>-1</sup>. Les résultats montrent que la conductivité électrique la plus élevée (5,46 ± 0,13 dS.m<sup>-1</sup>) est obtenue avec le traitement associant 50 % de phosphate naturel partiellement acidulé et 50 % de triple superphosphate, tandis que la plus faible valeur (1,88 ± 0,11 dS.m<sup>-1</sup>) correspond au témoin. Une conductivité électrique supérieure ou égale à 5 est généralement associée à une meilleure disponibilité des éléments minéraux pour les plantes, ce qui confirme l'efficacité agronomique de la combinaison PNPA—TSP dans l'amélioration de la fertilité des sols étudiés.

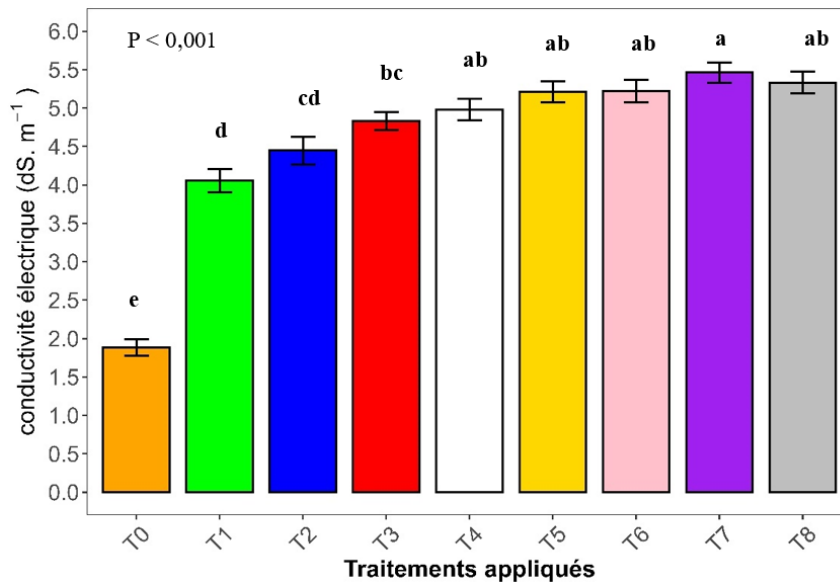


Figure 3 : Variation de la conductivité électrique en fonction des traitements appliqués

### 3-5. Phosphore assimilable (P<sub>Bray1</sub>) et l'azote total

Le phosphore assimilable (*Figure 4*) varie de 9,29 à 269,39 mg.kg<sup>-1</sup> avec une différence hautement significative en les traitements. La teneur la plus élevée est obtenue avec le traitement T7 (50% PNPA + 50% TSP) tandis, que la plus faible est observée avec le traitement témoin sans fertilisant (T0). Les autres traitements ont des teneurs en P<sub>Bray1</sub> extrêmement faibles par rapport à la norme. La teneur moyenne en azote total (*Figure 4*) varie de 347,5 à 552,5 mg.kg<sup>-1</sup>. La teneur la plus importante a été observée avec le triple superphosphate (T3).

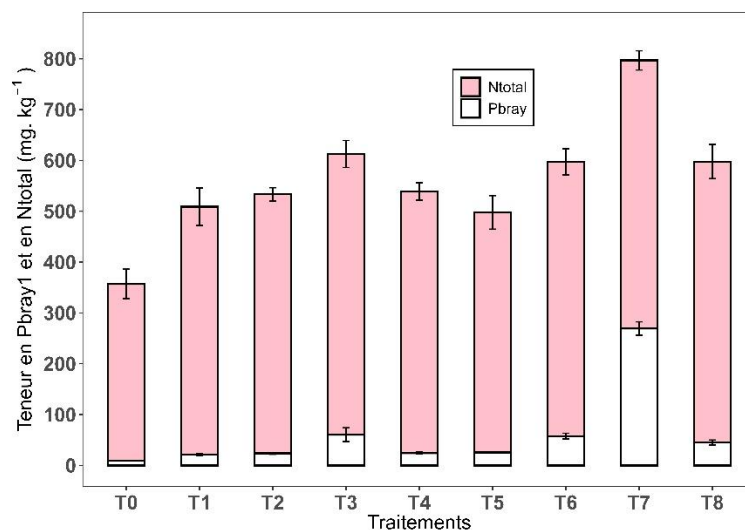


Figure 4 : Évolution de la teneur en  $N_{total}$  et  $P_{Bray1}$  en fonction des traitements appliqués

### 3-6. Texture et carbone organique des sols

Les résultats de l'influence des traitements fertilisants sur la texture et le carbone organique des sols analysés sont consignés dans le *Tableau 4*. L'analyse de ce tableau montre que tous les traitements ont influencé la texture et le carbone organique du sol. En effet, le phosphate naturel partiellement acidulé seul est le plus efficace ( $0,92 \pm 0,02\%$ ) pour enrichir le sol en matière organique du sol, tandis que le traitement

témoin ( $0,63 \pm 0,02\%$ ) se révèle être le moins performant, ce qui confirme l'effet bénéfique des amendements. Concernant le taux d'argile, traitement combinant 75% PNPA + 25% TSP présente la plus grande valeur ( $23,88 \pm 0,71$ ) et la plus petite ( $11,04 \pm 0,45$ ) est observée avec traitement combinant 50% PNPA + 50% TSP. Le traitement combinant 25% PNPA + 75% TSP est le plus riche en limon ( $27,2 \pm 0,64$ ) et celui combinant 75% PNPA + 25% TSP est le plus faible ( $13,44 \pm 0,85$ ). En fin, la combinaison de 50% PNPA + 50% TSP est le plus riche en sable ( $69,07 \pm 0,55$ ), tandis que le traitement 25% PNPA + 75% TSP est le plus faible ( $57,78 \pm 0,35$ ). Les résultats obtenus confirment que les combinaisons de phosphate naturel partiellement acidulé (PNPA) et de triple superphosphate (TSP) surpassent les traitements individuels en termes d'efficacité agronomique. Le ratio équilibré 50/50 apparaît comme la formule la plus performante, favorisant une amélioration simultanée de la fertilité chimique et de la structure physique du sol. Cette synergie entre PNPA et TSP illustre l'intérêt d'une approche intégrée, capable de valoriser les ressources locales tout en garantissant une durabilité accrue des systèmes de production agricole.

**Tableau 4 : Influence des traitements fertilisants sur la texture et la teneur en carbone organique des sols**

Traitements	C_organique	Argile	Limon	Sable
%				
Témoin absolu	$0,63^d \pm 0,02$	$15,09^b \pm 0,52$	$22,47^c \pm 0,18$	$62,68^d \pm 0,43$
CETH	$0,88^{ab} \pm 0,02$	$13,47^{bc} \pm 1,57$	$20,01^{cd} \pm 0,71$	$66,52^b \pm 0,93$
Burkina phosphate	$0,79^c \pm 0,01$	$15,18^b \pm 1,22$	$20,48^{cd} \pm 0,81$	$64,34^c \pm 0,44$
TSP	$0,74^c \pm 0,04$	$14,14^{bc} \pm 0,45$	$21,28^{cd} \pm 0,71$	$64,59^c \pm 0,28$
NPK (14-23-14-6S)	$0,83^{bc} \pm 0,04$	$13,56^{bc} \pm 0,63$	$25,18^b \pm 0,76$	$61,26^d \pm 0,36$
PNPA	$0,92^a \pm 0,02$	$13,38^{bc} \pm 0,22$	$19,26^d \pm 0,76$	$67,36^b \pm 0,64$
25% PNPA + 75% TSP	$0,82^{bc} \pm 0,02$	$15,02^b \pm 0,96$	$27,2^a \pm 0,64$	$57,78^e \pm 0,35$
50% PNPA + 50% TSP	$0,77^c \pm 0,01$	$11,04^c \pm 0,45$	$19,89^{cd} \pm 0,65$	$69,07^a \pm 0,55$
75% PNPA + 25% TSP	$0,78^c \pm 0,02$	$23,88^a \pm 0,71$	$13,44^e \pm 0,85$	$62,68^d \pm 0,43$
Cv (%)	5	11,3	6,6	1,6
Probabilité	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Signification	***	***	***	***

*Légende : CETH : Compost Enrichi au Trichoderma harzianum ; TSP : triple superphosphate ; PNPA : phosphate naturel partiellement acidulé ; Cv : coefficient de variation ; \*\*\* : très hautement significatif ; dans une même colonne, les valeurs affectées d'une même lettre ne diffèrent pas significativement au seuil de 5 % selon le test de Newman Keuls.*

#### 4. Discussion

Les résultats obtenus dans cette étude confirment que l'application du phosphate naturel partiellement acidulé (PNPA), notamment en combinaison avec le triple superphosphate (TSP), améliore significativement les propriétés physico-chimiques du sol ferrugineux tropical lessivé. Les valeurs de pH observées dans cette étude varient de 6,2 (témoin absolu) à 8,8 (PNPA), ce qui montre que les traitements ont un impact significatif sur la réaction chimique du sol. Le sol témoin est modérément acide, ce qui peut réduire la disponibilité du phosphore et limiter l'activité biologique. Ce niveau de pH est typique des sols ferrallitiques ou lixivés en zone tropicale. Les valeurs de pH obtenues avec le compost enrichi en *Trichoderma harzianum* (CETH = 6,97), le triple superphosphate (TSP = 6,8) et le NPK (7,3) indiquent que ces amendements exercent un effet tampon modéré, contribuant à améliorer les conditions chimiques du sol sans engendrer de déséquilibre [25]. L'application du phosphate naturel partiellement acidulé (PNPA) provoque une alcalinisation excessive (pH = 8,8), ce qui peut entraîner des carences induites en micronutriments (Fe, Zn, Mn) et perturber l'équilibre biologique du sol [26]. Sa combinaison 75% PNPA + 25% TSP (pH = 8,4) est légèrement atténué mais toujours alcalin.

Par contre les combinaisons 50% PNPA + 50% TSP (pH = 7,6) et 25% PNPA + 75% TSP (pH = 7,87) permettent de moduler l'effet alcalinisant, maintenant le pH dans une zone optimale pour la majorité des cultures. Le traitement 50% PNPA + 50% TSP affiche la meilleure capacité de rétention en eau (34,36 %), suivi de près par 75% PNPA + 25% TSP (34,34 %), ce qui suggère une synergie entre le phosphate naturel partiellement acidulé (PNPA) et le triple superphosphate (TSP). En effet, plusieurs recherches ont mis en évidence une amélioration des propriétés physico-chimiques du sol, notamment une meilleure disponibilité du phosphore et une augmentation de la capacité de rétention en eau. Ces effets sont attribués à la solubilité accrue et aux interactions positives entre le PNPA et le TSP [7, 18]. Les traitements à base de phosphate ont des capacités de rétention en eau faibles, bien qu'ils soient supérieurs au témoin absolu (T0). Les travaux de Bikienga [27, 28] ont souligné que les phosphates naturels du Burkina Faso (BP), bien qu'abondants, nécessitent des traitements (acidulation, calcination) pour être efficaces. Cela explique les résultats obtenus avec le phosphate naturel seul (33,89 %), comparé aux combinaisons PNPA-TSP. Le témoin absolu, quant à lui, présente la plus faible capacité de rétention (33,56 %), ce qui confirme l'effet bénéfique des amendements phosphatés sur la rétention en eau du sol. Ces résultats confirment que les combinaisons PNPA-TSP sont plus efficaces que les traitements individuels pour améliorer la rétention en eau [29]. Les valeurs de la conductivité électrique (CE) observées varient de 1,883 dS.m<sup>-1</sup> (T0) à 5,463 dS.m<sup>-1</sup> (75% PNPA + 25% TSP), ce qui montre une large gamme de réponses selon les traitements. En effet, les traitements combinant le PNPA et le TSP présentent les CE les plus élevées, avec un pic à 5,463 dS.m<sup>-1</sup> pour le traitement 75% PNPA + 25% TSP. Cela suggère une synergie entre le phosphate naturel partiellement acidulé (PNPA) et le superphosphate triple (TSP), favorisant une meilleure libération d'ions nutritifs. Des recherches [1, 30] affirment que l'ajout de matière organique améliore la solubilité des phosphates naturels, cela pourrait expliquer les bonnes performances du PNPA, surtout en mélange avec le TSP.

Le traitement T5 (PNPA) seul (5,211 dS.m<sup>-1</sup>) affiche une CE comparable à celle du TSP (4,827 dS.m<sup>-1</sup>), ce qui est remarquable compte tenu de sa faible solubilité théorique. Cela pourrait s'expliquer par des interactions biologiques ou physico-chimiques dans le sol [31]. Le témoin absolu (1,883 dS.m<sup>-1</sup>) illustre la pauvreté du sol sans apport nutritif, confirmant l'intérêt des amendements phosphatés [6]. Les résultats montrent une augmentation significative du taux de carbone organique avec les tous les traitements, en particulier avec phosphate naturel partiellement acidulé (PNPA = 0,92%), qui surpasse tous les autres. Cette amélioration peut être attribuée à sa capacité à stimuler l'activité microbienne du sol. Le témoin absolu (0,63%), sans apport, présente la plus faible teneur, confirmant que les amendements sont essentiels pour enrichir le sol [30]. Aussi, les combinaisons PNPA-TSP (notamment 25%-75% et 50%-50%) montrent des résultats intermédiaires, suggérant que la synergie entre amendements organiques et minéraux peut être bénéfique, mais dépend fortement du ratio utilisé [8, 32]. Le traitement 75 % PNPA + 25 % TSP (23,88 %) améliore la teneur en argile, tandis que 50 % PNPA + 50 % TSP (11,04 %) montre la plus faible valeur, suggérant un risque accru d'érosion [33]. Ces variations suggèrent que les traitements influencent non seulement la chimie du sol, mais aussi sa texture, possiblement par des effets indirects sur l'agrégation des particules ou la répartition granulométrique [34, 35]. Le traitement combinant 25% PNPA + 75% TSP se distingue par une teneur maximale en limon (27,2%), ce qui est favorable à la fertilité et à la capacité de rétention d'eau. Le traitement 75% PNPA + 25% TSP, en revanche, présente la valeur la plus faible (13,44%), ce qui pourrait limiter la disponibilité en nutriments et la structure du sol. Le ratio PNPA/TSP influence fortement la granulométrie, le limon étant le plus sensible aux variations [27, 36]. Le traitement 50% PNPA + 50% TSP affiche la plus forte teneur en sable (69,07%), ce qui peut favoriser le drainage, mais réduire la rétention d'eau et la fertilité. Le traitement 25 % PNPA + 75 % TSP (57,78 %) favorise la rétention hydrique, la teneur en sable étant inversement corrélée à celles du limon et de l'argile [37, 38].

## 5. Conclusion

Cette étude a mis en évidence l'effet du phosphate naturel partiellement acidulé (PNPA) sur diverses propriétés physico-chimiques du sol. L'application du PNPA, seule ou en combinaison croissante avec le TSP, entraîne une augmentation significative du pH, la valeur la plus faible ayant été observée avec le témoin (T0) en fin d'expérimentation. Concernant la conductivité électrique, les engrais phosphatés ont accru la salinité du sol en raison de leur solubilisation rapide, avec un maximum de  $5,46 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$  pour le traitement 50 % PNPA + 50 % TSP. La capacité de rétention en eau (CRE) n'a pas montré de différences significatives entre les traitements, bien que le PNPA seul (T5) ait induit une hausse de 1,28 % par rapport au témoin. L'étude de la CEC a confirmé l'intérêt du Burkina phosphate sous forme partiellement acidulée, avec une amélioration hautement significative ( $p < 0,001$ ) selon les combinaisons PNPA-TSP. En conclusion, la comparaison des différentes sources, notamment le PNPA, avec le témoin absolu, confirme l'amélioration des propriétés chimiques et physiques du sol, avec un effet particulièrement marqué pour le traitement 50 % PNPA + 50 % TSP. Cette technologie fertilisante, accessible et durable, constitue une solution prometteuse pour accroître la productivité agricole dans les zones à faible fertilité du Burkina Faso. Elle représente également une alternative économiquement viable aux engrais minéraux importés, tout en valorisant les ressources locales. Des recherches complémentaires en conditions de champ restent nécessaires pour consolider ces résultats.

### **Conflits d'intérêts**

*Les auteurs déclarent qu'ils n'ont aucun conflit d'intérêts.*

### **Contributions des auteurs**

*Ce travail a été réalisé en collaboration avec tous les auteurs. Les auteurs AO, GYKZ, WPFK et JS ont conçu l'étude, rédigé le protocole expérimental et réalisé la collecte des données de terrain. Les auteurs FS, SBS et JS ont fait les traitements statistiques et interprété les résultats de l'étude. Tous les auteurs ont lu et approuvé le manuscrit final.*

### **Remerciements**

*Les auteurs de cet article remercient Monsieur Hama DIALLO pour son précieux appui depuis les travaux de mise en place de l'essai jusqu'à la récolte. Aussi, à Japan International Research Center for Agricultural Sciences (JIRCAS) pour le soutien financier dans la réalisation de cette étude.*

## References

- [1] - S. JACQUES, B. MOUSSA, K. WEND-PANGA FLORENT RUFIN, S. SOGO BASSIROU and L. JEAN BOUKARI, *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 19 (3) (2025) 1302 - 1311. DOI: <https://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v19i3.35>
- [2] - A. B. KOUYATE, A. IBRAHIM, I. SERME and S. G. DEMBÉLÉ, *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 14 (9) (2020) 3285 - 3296. DOI: <https://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v14i9.25>
- [3] - R. N. HODOMIHOU, E. K. AGBOSSOU, G. L. AMADJI and H. B. NACRAO, *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 5 (6) (2011) 2278 - 2290. DOI: <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v5i6.9>
- [4] - M. B. POUYA, M. BONZI, Z. GNANKAMBARY, K. TRAORÉ, J. S. OUÉDRAOGO, A. N. SOMÉ and M. P. SÉDOGO, *Cahiers agricultures*, 22 (4) (2013) 282 - 292
- [5] - J. SAWADOGO, P. COULIBALY, B. TRAORE, M. S. D. BASSOLE, A. KABORE and J. B. LEGMA, *Afrique SCIENCE*, 19 (4) (2021) 189 - 202
- [6] - B. TRAORE, Effets du phosphate naturel calciné sur les rendements du sorgho et du niébé et sur les caractéristiques d'un sol ferrugineux tropical lessivé dans la zone soudano Sahélienne du Burkina Faso, Institut de développement rural, Thèse de Doctorat Unique, Université Nazi Boni de Bobo-Dioulasso, Doctorat Unique, 137 p.
- [7] - B. TRAORÉ, M. TRAORÉ, P. J. D. A. COULIBALY, J. SAWADOGO, S. S. PAPA and H. B. NACRO, *ARCHIVES OF AGRONOMY AND SOIL SCIENCE*, 71 (1) (2025). DOI: <https://doi.org/10.1080/03650340.2025.2496491>
- [8] - M. K. ABEKOE and H. TIESSEN, *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 52 (1) (1998) 45 - 54. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1009745529753>
- [9] - S. NAKAMURA, T. IMAI, K. TORIYAMA, S. TOBITA, R. MATSUNAGA, M. FUKUDA and F. NAGUMO, *Japan. J. Soil. Sci. Plant Nutr.*, 86 (2015) 535 - 539. DOI: <https://www.tandfonline.com/>
- [10] - J. SAWADOGO, P. J. D. A. COULIBALY, M. BEOGO, C. A. SAVADOGO and J. B. LEGMA, *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 35 (2) (2022) 249 - 259. DOI: <https://ijias.issr-journals.org/>
- [11] - P. BAZONGO, K. TRAORE, B. KIEMTORE, I. A. N. DA, A. COULIBALY and O. TRAORE, *International Journal of Biological and Chemical Sciences.*, 17 (5) (2023) 2025 - 2036. DOI: <https://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v17i5.20>
- [12] - S. IWASAKI, K. IKAZAKI, A. BOUGMA and F. NAGUMO, *Frontiers in Soil Science*, 1 (1) (2022) 709507. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsoil.2021.709507>
- [13] - M. FUKUDA, D. M. SOMA, S. IWASAKI, S. NAKAMURA, T. KANDA, K. OUATTARA and F. NAGUMO, *Plos one.*, 16 (4) (2021) e0250240
- [14] - I. NIGNAN, J. OUEDRAOGO, S. NAKAMURA, I. SERME and K. COULIBALY, *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 17 (6) (2023) 2312 - 2324. DOI: <https://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v17i6.14>
- [15] - B. IBRAHIM, Caractérisation des saisons de pluies au Burkina Faso dans un contexte de changement climatique et évaluation des impacts hydrologiques sur le bassin du Nakanbé, Doctorat, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI, 246 p.
- [16] - FAO, World reference base for soil resources 2006 A framework for international classification, correlation and communication. In: Encyclopedia of soil science. Third ed. World Soil Resources Reports, Rome, Italie, (2006)
- [17] - J. SAWADOGO, R. F. W.-P. KABORE, A. OUIYA, C. A. SAVADOGO, M. BOUGOUMA and J. B. LEGMA, *Afrique SCIENCE*, 25 (4) (2024) 15 - 24. DOI: <http://www.afriquescience.net>
- [18] - B. TRAORE, T. MAMOUDOU, B. ANDRÉ and N. HASSAN BISMARCK, *Revue Africaine d'Environnement et d'Agriculture*, 6 (4) (2023) 120 - 129. DOI: <https://dx.doi.org/10.4314/rafe.v6i4.13>
- [19] - S. JACQUES, K. HOURIA FARIDA MOON, T. MAMOUDOU, S. SOGO BASSIROU, S. FOUSSENI and C. ADAMA,

- Afrique SCIENCE*, 27 (1) (2025) 66 - 78 DOI: <http://www.afriquescience.net>
- [20] - S. NAKAMURA, T. KANDA, T. IMAI, J. SAWADOGO and F. NAGUMO, *Soil Science and Plant Nutrition*, 65 (3) (2019) 267 - 273. DOI: <https://doi.org/10.1080/00380768.2019.1598236>
- [21] - F. ZAPATA and R. N. ROY, Use of phosphate rocks for sustainable agriculture. (2004): 92-5-105030-9, 0532-0488, (13), Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin, (xx + 148 pp.), Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), p, 9251050309
- [22] - A. BRAITHWAITE and D. ROGERS, *Fertilizer research*, 12 (1) (1987) 85 - 98. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01049422>
- [23] - F. FOOD and AGRICULTURAL MATERIALS INSPECTION CENTER. Testing Methods for Fertilizers, Saitama japan : Incorporated Administrative Agency, Food and Agricultural Materials Inspection Center, (2021) 755 p.
- [24] - R. H. BRAY and L. T. KURTZ, *Soil science*, 59 (1) (1945) 39 - 46. DOI: 10.1097/00010694-194501000-00006
- [25] - D. L. ACHAT, M. R. BAKKER, L. AUGUSTO, E. SAUR, L. DOUSSERON and C. MOREL, *Biogeochemistry*, 92 (3) (2009) 183 - 200. DOI: 10.1007/s10533-008-9283-7
- [26] - L. BLAKE, A. E. JOHNSTON, P. R. POULTON and K. W. T. GOULDING, *Plant and Soil*, 254 (2) (2003) 245 - 261. DOI: 10.1023/a:1025544817872
- [27] - I. M. BIKIENGA, Les phosphates naturels du Burkina Faso: Caractérisation, efficacité agronomique, intérêt économique, Burkina Faso: Editions Techniques et Professionnelles, (2011) 290 p., 236586001X
- [28] - B. ISSA MARTIN, T. TALADIDIA and O. SILAS, Étude de faisabilité relative à la production d'engrais au Burkina Faso à partir des phosphates naturels de Kodjari, Burkina Faso : Ministère de l'Agriculture et de la Sécurité Alimentaire, (2014) 171 p.
- [29] - D. L. ACHAT, M. R. BAKKER, L. AUGUSTO and C. MOREL, *Geoderma*, 211 (2013) 18 - 27. DOI: 10.1016/j.geoderma.2013.07.003
- [30] - S. JACQUES, N. SATOSHI, S. SOGO BASSIROU, N. EMILIE MIREILLE WEND-DENDA, S. FOUSSENI and F. NAGUMO, *Afrique SCIENCE*, 27 (2) (2025) 12 - 25. DOI: <http://www.afriquescience.net>
- [31] - A. J. A. KOTAIX, Y. F. KOUASSI, E. G. M. ASSI, L. D. M.-P. IZZRIE, K. H. KOUADIO, K. E. KASSIN, K. COULIBALY and L. A. KOKO, *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 16 (5) (2022) 2413 - 2423
- [32] - H. RICHARD N., A. EULOGE K., A. GUILLAUME L. and N. HASSAN B., *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 5 (6) (2011) 2278 - 2290. DOI: <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v5i6.9>
- [33] - A. BAGAYOGO, J. SAWADOGO, M. KONATE, M. SIE, S. NAKAMURA, F. NAGUMO and M. SAWADOGO, *Agricultural Sciences*, 15 (4) (2024) 423 - 438. DOI: <https://www.scirp.org/journal/as>
- [34] - C. ALTOMARE, W. NORVELL, T. BJÖRKMAN and G. HARMAN, *Applied and Environmental Microbiology*, 65 (7) (1999) 2926 - 2933. DOI: <https://doi.org/10.1128/AEM.65.7.2926-2933.1999>
- [35] - L. K. AYLIFFE, H. H. VEEH and A. R. CHIVAS, *Earth and Planetary Science Letters*, 108 (1-3) (1992) 119 - 129. DOI: [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(92\)90064-3](https://doi.org/10.1016/0012-821X(92)90064-3)
- [36] - Y. I. A. BAMBARA, Efficacité agronomique de deux formes de phosphate naturel sur la production du sorgho (*Sorghum Bicolor* (L.) Moench) et les paramètres physico-chimiques du sol en zone Nord-soudanienne du Burkina Faso, Institut Panafricain pour le Développement, Mémoire de Master II, 56 p.
- [37] - D. J. COSGROVE, *Australian Journal of Biological Sciences*, 23 (6) (1970) 1207-&. DOI: 10.1071/bi9701207
- [38] - T. NELSON, *Poultry Science*, 46 (4) (1967) 862 - 871. DOI: 10.3382/ps.0460862