

Influence de différentes sources de phosphore sur la production du niébé [*Vigna unguiculata* (L) walp.] et sur les propriétés chimiques du sol au Burkina Faso

**Jacques SAWADOGO^{1,4*}, Satoshi NAKAMURA², Sogo Bassirou SANON¹,
Emilie Mireille Wend-denda NANA³, Fousseni SOMA⁴ et Fujio NAGUMO²**

¹ *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*

² *Japan International Research Center for Agricultural Sciences (JIRCAS), Crop, Tsukuba, Ibaraki 305-8686, Livestock, and Environment Division, Japan*

³ *Université Saint Thomas d'Aquin (USTA), Faculté des Sciences et Technologies, Département de Chimie, 06 BP 10212 Ouagadougou 06, Burkina Faso*

⁴ *Université Norbert ZONGO, Laboratoire de Chimie Analytique, de Physique Spatiale et Énergétique (L@CAPSE), Avenue Maurice Yaméogo, Koudougou BP 376, Burkina Faso*

(Reçu le 15 Juillet 2025 ; Accepté le 19 Août 2025)

* Correspondance, courriel : jacques.sawadogo@inera.bf

Résumé

L'étude a pour objectif de tester l'influence de différentes sources de phosphore sur la productivité du sol. Pour atteindre cet objectif, une expérimentation a été mise en place sous serre, en vase de végétation, comprenant treize (13) traitements constitués de : témoin absolu (T0), Burkina phosphate (BP), triple super phosphate (TSP), phosphate naturel partiellement acidulé (PNPA), phosphate naturel calciné (PNC), ainsi que diverses combinaisons de ces sources en proportions variées, suivant un dispositif en blocs complètement randomisé. Chaque traitement a été répété quatre (04) fois. Plusieurs paramètres ont été déterminés, notamment le rendement en grain, la biomasse aérienne et racinaire, ainsi que la nodulation. Les résultats ont montré que l'application du PNPA a influencé positivement les rendements, contrairement au PNC qui a eu un effet limité sur la production du niébé. Ces résultats ont également indiqué que l'application du PNPA a augmenté les rendements en grains de 18 % et 32 %, respectivement par rapport au témoin (T0) et au BP (T1), tandis que le PNC a entraîné une baisse des rendements en grains de 21 % et 2 % par rapport au témoin (T0) et au BP (T1). De plus, les combinaisons (PNPA + TSP) ont permis une augmentation significative des rendements. Concernant les propriétés chimiques du sol, tous les traitements ont contribué à leur amélioration, avec une efficacité notable du traitement combinant le PNPA et le TSP. Par ailleurs, les résultats obtenus avec le PNPA se sont révélés similaires, voire comparables, à ceux obtenus avec le TSP.

Mots-clés : *rendement grain, niébé, propriétés chimiques, phosphate calciné, phosphate acidulé, Burkina Faso.*

Abstract

Effect of different phosphorus sources on cowpea [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.] production and soil chemical properties in Burkina Faso

This study was conducted to assess the impact of various phosphorus sources on soil productivity under controlled conditions. To address this objective, a controlled pot experiment was established under greenhouse conditions, involving thirteen (13) treatments: an absolute control (T0), Burkina phosphate rock (BPR), triple superphosphate (TSP), partially acidulated phosphate rock (PAPR), calcined Burkina phosphate rock (CBPR), and multiple combinations of these phosphorus sources at varying ratios. The experimental setup was arranged in a completely randomized block design to ensure statistical robustness. Findings further revealed that the application of partially acidulated phosphate rock (PAPR) enhanced grain yield by 18 % and 32 % relative to the control (T0) and Burkina phosphate rock (BPR, T1), respectively. Conversely, calcined Burkina phosphate rock (CBPR) resulted in a decline in grain yield by 21 % and 2 % when compared to the control and BPR treatments. Furthermore, the combined application of partially acidulated phosphate rock (PAPR) and triple superphosphate (TSP) significantly enhanced grain yield. In terms of soil chemical properties, all treatments led to improvements, with the PAPR + TSP combination exhibiting the most pronounced effect. In addition, the performance of PAPR was found to be similar and in certain instances, comparable to that of triple superphosphate (TSP).

Keywords : *grain yield, cowpea, soil chemical properties, calcined phosphate, acidulated phosphate, Burkina Faso.*

1. Introduction

Le Burkina Faso est un pays dont l'économie repose sur le secteur agricole [1]. Selon Barry, ce secteur est le principal employeur du pays, regroupant 82 % de la population active [2]. Il contribue à hauteur de 35 % au PIB national et génère 70 % des recettes d'exportation [3]. Les cultures vivrières non céréalières sont dominées par le niébé [4]. Le niébé à œil noir est une des principales légumineuses alimentaires mondiales. La production s'élève à 6,4 millions de tonnes tous les ans sur 12,7 millions d'hectares environ [3]. Au Burkina Faso, troisième 3^{ème} producteur en Afrique subsaharienne après le Nigeria et le Niger, la culture de cette légumineuse se pratique généralement en association avec les céréales et de plus en plus en culture pure. Le niébé, occupant une place très importante dans les politiques agricoles du Burkina Faso, présente de nombreux avantages tels que l'amélioration de la fertilité du sol, un cycle court, et une forte valeur nutritive [5]. À l'instar des autres pays d'Afrique subsaharienne, la production agricole du Burkina Faso est restreinte par la faible présence du phosphore dans le sol. Ce qui fait que même l'application d'autres éléments minéraux n'entraîne pas un meilleur accroissement de rendement des cultures. Un apport de phosphate viendra non seulement augmenter la productivité, mais aussi améliorer le niveau de cet élément dans les sols afin d'éviter davantage la baisse de la fertilité des sols [6]. Heureusement nos sols répondent assez bien à une fertilisation minérale incluant le phosphore, mais en raison du coût élevé des engrais les producteurs le font avec timidité. Cependant, depuis plusieurs années les réserves de phosphate dont dispose le Burkina Faso font l'objet d'exploitation et de vulgarisation pour réduire le prix des engrais. En effet, selon le gouvernement du Burkina Faso, il existe 100 millions de tonnes de PR dans la région de Kodjari au Burkina Faso [7, 8], qui pourraient servir de source alternative d'engrais P [9]. Cependant, il s'avère que ces phosphates naturels (PN) sont peu réactifs à cause de leur faible solubilité, leur faible teneur en P₂O₅ (26-36 %) et leur faible mobilité rendant leur utilisation directe peu efficiente [10]. Dans l'optique d'améliorer l'efficacité de ses phosphates naturels, des travaux de recherches ont contribué à développer des techniques alternatives telles que l'acidulation partielle et la calcination [11]. A cet effet, certains auteurs ont montré

que l'acidulation partielle était une solution à la faible réactivité du PN du Burkina Faso [12 - 15]. Nonobstant, l'acidulation du PN produit le composant phosphate mono calcium de phosphate, de petites quantités de phosphate bicalcique et une apatite résiduelle en fonction du degré d'acidulation [16]. Par ailleurs, la calcination du PN améliore également la disponibilité du phosphore dans le sol au profit des cultures [17 - 20]. L'étude a été conduite en formulant l'hypothèse qu'une gestion intégrée des PN sous forme acidulée ou calcinée permettrait d'améliorer la production et les propriétés chimiques du sol. Dans cette étude, il s'est agi de tester sous serre, l'influence de différentes formes de phosphate (PNA et PNC) sur les paramètres de rendement du niébé et sur les propriétés chimiques du sol pour leur valorisation future.

2. Matériel et méthodes

2-1. Matériel

2-1-1. Description du site

L'essai en vase de végétation a été mené sous l'abri dans l'enceinte du centre de recherches Environnementales, Agricoles et de Formation (CREAF) de Kamboinsé sis à Ouagadougou (12°27'21 N, 1°32'54 W avec une altitude de 296 m). Les sols dans la zone de Kamboinsé sont de type ferrugineux tropicaux lessivés [21, 22].

2-1-2. Matériel végétal

La variété de niébé K VX 442-3-25SH a été utilisée comme matériel végétal et elle a été acquise auprès de l'Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles (INERA-CREAF). Cette variété de niébé a un cycle de 60 jours.

2-2. Méthodes

2-2-1. Prélèvement et préparation des échantillons de sol

Les échantillons de sol ont été prélevés dans l'horizon de surface (0-20 cm) sur une parcelle au sein de la station de recherche sur laquelle aucune culture n'avait été réalisée. Cinq placettes de 5 m * 5 m (25 m²) ont été délimités le long de ce transect.

2-2-2. Essai en pot sous serre

Pour la mise en place de l'essai, des pots en plastiques (diamètre supérieur : 23 cm, diamètre inférieur : 15,3 cm et 21,4 cm de profondeur soit un volume moyen de 6246,7 cm³) ont été utilisés. La quantité de terre fine ayant servi pour le remplissage des pots est de sept (07) kg.

2-2-3. Fertilisants utilisés

Les sources de phosphore : Burkina phosphate naturel (BP), phosphate naturel calciné (PNC), le phosphore naturel partiellement acidifié (PNPA) et le Triple Super Phosphate (TSP) ont été utilisés en une seule dose deux semaines après le semis. Les quantités utilisées étaient 81,3 P₂O₅ kg/ha ; 111 P₂O₅ kg/ha ; 106,2 P₂O₅ kg/ha ; et 117 P₂O₅kg/ha respectivement. Les fertilisants simples à savoir l'urée (46% N) et le KCl (60 %) ont été apportés comme fumure de fond pour combler les besoins respectifs en N, et K.

2-2-4. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental mis en œuvre était de type Fisher complètement randomisé. Treize (13) traitements (représenté par 3 pots) avec quatre répétitions pour la culture de niébé a été mis en place. Au total on dénombre cent-cinquante-six (156) pots. En effet, à l'aide d'une balance électronique, sept (07) kg de terre fine ont été mis dans chaque pot, puis humectés à la capacité de rétention en eau au champ (200 mL). Le semis est intervenu 24 heures après à raison de trois (03) graines par pot. Les différents traitements formulés tenant compte des différents facteurs sont consignés dans le **Tableau 1** ont été mis en place.

2-2-5. Variables collectées

Le poids de 100 grains (PCG), la biomasse totale, le rendement grain du niébé et le nombre de nodules ont été mesurés. L'indice de récolte (IDR) a été calculé à l'aide de la **Formule 1** [7] :

$$\text{IDR (\%)} = \frac{\text{Rendement grain}}{\text{biomasse totale}} \times 100 \quad (1)$$

L'efficacité agronomique relative de l'engrais phosphaté (EAR, g de grain/g de P) a été calculée selon la **Formule 2** [23, 24] :

$$\text{Efficacité Agronomique Relative (g.g}^{-1}\text{)} = \frac{X_p - X_0}{F} \quad (2)$$

avec, X_p : rendement du traitement ayant reçu le phosphore (P) et X_0 : rendement du traitement témoin et F est la teneur de phosphore (P) soluble dans l'eau appliquée [25, 26].

2-2-6. Prélèvement, préparation des échantillons et analyses des sols

Des échantillons composites de sol ont été collectés et envoyés au Laboratoire pour évaluer les propriétés chimiques, en suivant des méthodes élaborées [27]. En effet, après avoir été séchés à 40 degrés Celsius pendant quatre jours dans une étuve de la marque SHIMADZU et du type STAC S-50 M, les échantillons de sols prélevés ont été broyés avec un appareil mécanique TM-25S, tamisés à 2 mm pour les analyses [23]. La détermination du carbone organique a été faite suivant la méthode de Walkley-Black [28]. À partir du pourcentage de carbone (C), on détermine le taux de matière organique selon la formule $MO = C (\%) \times 1,724$ [29]. Après une minéralisation des échantillons par la méthode Kjeldahl, les éléments azote et phosphore totaux ont été dosés directement à l'autoanalyseur et le potassium total au spectrophotomètre à flamme [25]. L'extraction du phosphore assimilable a été faite selon la méthode Bray I [30, 31]. Il s'agit d'extraire la quantité de phosphore associée au calcium ainsi qu'à l'aluminium et au fer en utilisant une solution mixte de fluorure d'ammonium et d'acide chlorhydrique. Le potassium disponible a été extrait en utilisant une solution d'acide chlorhydrique et d'acide oxalique selon la méthode décrite par Walinga et Taylor dont la méthode repose sur la comparaison des radiations émises par les atomes de potassium avec celles des solutions standards [32, 33]. La détermination du rapport carbone-azote (C/N) a été effectuée à partir des résultats d'analyse du carbone organique et de l'azote total. Le pH en eau et le pH en KCl ont été mesurés respectivement dans une solution d'eau distillée à l'aide d'un pH-mètre électronique HANNA à électrode de verre [34, 35].

2-3. Analyses statistiques

Les données ont été analysées avec le logiciel GenStat release 12.1. Les analyses de variance (ANOVA) ont été réalisées et le test de Student-Newman Keuls au seuil de 5 % a permis la séparation des moyennes lorsque les différences étaient significatives.

Tableaux 1 : Récapitulatif des quantités de fertilisants (g/pot), de nutriments N, P et K (g.ha⁻¹) apportés par traitement

Traitements	Compositions	Quantités/pot (g.ha ⁻¹)						Doses de nutriments/pot (g.ha ⁻¹)		
		BP	PNC	PNPA	TSP	Urée	KCl (60 %)	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
T0	Témoin sans fertilisant	0	0	0	0	0	-	0	0	0
T1	Burkina phosphate (BP)	6,0	-	-	-	0,97	0,750	0,448	0,736	0,448
T2	Triple super phosphate (TSP)	-	-	-	3,75	0,97	0,750	0,448	0,736	0,448
T3	Phosphate naturel acidulé (PNPA)	-	-	3,40	-	0,97	0,682	0,448	0,736	0,448
T4	Phosphate naturel acidulé (PNC)	-	3,55	-	-	0,97	0,172	0,448	0,736	0,448
T5	75 % PNA + 25 % TSP	-	-	2,55	0,94	0,97	0,699	0,448	0,736	0,448
T6	50 % PNA + 50 % TSP	-	-	1,70	1,87	0,97	0,887	0,448	0,736	0,448
T7	25 % PNA + 75 % TSP	-	-	0,85	2,81	0,97	0,733	0,448	0,736	0,448
T8	75 % PNC + 25 % TSP	-	2,66	-	0,94	0,97	0,317	0,448	0,736	0,448
T9	50 % PNC + 50 % TSP	-	1,77	-	1,87	0,97	0,461	0,448	0,736	0,448
T10	25 % PNC + 75 % TSP	-	0,89	-	2,81	0,97	0,606	0,448	0,736	0,448
T11	75 % PNC + 25 % PNPA	-	2,66	0,85	-	0,97	0,300	0,448	0,736	0,448
T12	25 % PNC + 75 % PNPA	-	0,89	2,55	-	0,97	0,598	0,448	0,736	0,448

3. Résultats

3-1. Caractéristiques physico-chimiques des engrais phosphatés

Les résultats de la caractérisation chimique du phosphate naturel partiellement acidulé (PNPA) et le phosphate naturel calciné (PNC) sont consignés dans le **Tableau 2**.

Tableau 2 : Caractérisations physico-chimiques des engrais phosphatés

	N	P	P/eau	P/citrate	P _{assimilable}	K	Ca	Mg	Zn	pH
	(%)	(%)	(%)	(%)	(mg/kg)	(%)	(g/Kg)	(g/Kg)	(mg/kg)	eau
PNC	0,07	20,74	11,78	88,78	163	12,74	15,92	1,056	4,78	11,02
PNPA	0,041	21,66	28,76	68,46	76,07	1,202	17,67	1,55	5,04	4,04

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

3-2. Effet de la fertilisation phosphatée sur les paramètres de rendement

Les résultats de l'effet des traitements sur le poids des gousses, le poids des 100 grains, le nombre de nodules et l'indice de vigueur végétatif du niébé sont consignés dans le **Tableau 3**. Ces résultats montrent qu'il existe une différence significative entre les différents traitements selon l'analyse de variance au seuil de 5 % ($P < 0,05$) à l'exception du poids des gousses. Le poids des gousses de niébé ayant reçu le traitement T2 (TSP) est de 26 % plus élevé suivi de celui du traitement T3 (PNPA) avec 23 % par rapport au témoin. Le traitement T8 (75 % PNC + 25 % TSP) présente le plus faible poids moyen de gousses. Les résultats sur le nombre de nodules du niébé (**Tableau 3**) font ressortir deux groupes statistiquement très différents ($P < 0,01$) en fonction des traitements. En effet, le traitement T7 (525 % PNPA + 75 % TSP) a donné le plus important nombre de nodules par rapport aux autres traitements suivis du groupe constitué par les traitements T5 et T6 et enfin des traitements T2, T3 et T4. Les proportions d'augmentation sont de 55,2% pour T7 ; 8% pour T5 ; 4,2 % pour T6 par rapport au témoin. Le traitement ayant donné le plus faible nombre de nodules est T8

(75 % PNC+25 % TSP). Quant au poids des 100 grains (**Tableau 3**), ce sont les traitements T5 et T12 qui ont été favorables à la formation des grains les plus robustes et le poids le plus faible provient du traitement T4 (PNC). Pour l'indice de vigueur végétatif, les plus élevés ont été obtenus avec le traitement T7 (25 % PNPA+75 % TSP) et T10 (25 % PNC + 75 % TSP) et suivis du traitement T2 (TSP) avec des indices respectifs de 80 %, 80 % et 78 %.

Tableau 3 : Effet des traitements sur les paramètres de rendement et l'indice de vigueur végétatif

Traitements	Poids gousse (g)	PCG (g)	Nbre de nodules
T0 : Témoin sans fertilisant	60,9 ^b ± 6,03	17,33 ± 0,30	192 ^{ab} ± 33,98
T1 : Burkina phosphate (BP)	52,9 ^b ± 5,51	15,76 ± 0,54	152,0 ^{ab} ± 42,51
T2 : Triple super phosphate (TSP)	75,87 ^{ab} ± 3,78	16,74 ± 0,82	198,0 ^{ab} ± 24,33
T3 : Phosphate naturel acidulé (PNPA)	75,13 ^{ab} ± 5,62	16,06 ± 1,36	157,3 ^{ab} ± 76,05
T4 : Phosphate naturel calciné (PNC)	51,07 ^b ± 7,55	15,57 ± 0,38	156,3 ^{ab} ± 23,78
T5 : 75% PNPA+25% TSP	67,2 ^b ± 13,91	17,64 ± 0,28	207,3 ^{ab} ± 58,16
T6 : 50% PNPA+50 % TSP	82,23 ^{ab} ± 3,74	17,24 ± 0,95	200,0 ^{ab} ± 68,41
T7 : 25% PNPA + 75% TSP	121,1 ^a ± 9,27	17,17 ± 0,42	298,0 ^a ± 60,06
T8 : 75% PNC+25% TSP	50,97 ^b ± 12,30	16,05 ± 1,35	137,0 ^{ab} ± 17,62
T9 : 50% PNC+50% TSP	82,73 ^b ± 10,11	16,37 ± 0,31	211,7 ^{ab} ± 62,41
T10 : 25% PNC+75% TSP	74,17 ^{ab} ± 23,46	16,88 ± 0,67	187,0 ^{ab} ± 6,35
T11 : 75% PNC+25% PNPA	64,97 ^b ± 6,28	17,44 ± 0,22	173,7 ^{ab} ± 21,85
T12 : 25% PNC+75% PNPA.	77 ^b ± 17,93	17,53 ± 0,44	273,7 ^a ± 75,82
Cv (%)	16,9	7,8	4,56
Probabilité	0,0015	0,503	0,00580
Significativité	*	NS	*

*Légende : PCG : poids de 100 grains ; Nbre : nombre ; IVV : indice de vigueur végétative ; NS = non significatif ; * = significatif ; Cv (%) = coefficient de variation. Dans une même colonne, les moyennes suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %.*

3-3. Rendement grain en fonction des traitements appliqués

Les résultats couvrant une large gamme de traitements phosphatés pour déterminer leur effet sur le rendement grain du niébé sous serre sont présentés sur la **Figure 1**. L'analyse de cette figure montre que pour la fertilisation P, les traitements ont augmenté de manière significative ($p < 0,05$) le rendement grain, en particulier le traitement combinant 25 % PNPA + 75 % TSP avec une valeur de $99 \pm 8 \text{ g.pot}^{-1}$ soit une augmentation de 152,8 % par rapport au traitement sans fertilisant (T0) et 138,6 % par rapport au Burkina phosphate (T1). Tandis que le plus faible rendement grain est enregistrée avec le phosphate naturel calciné ($41 \pm 6 \text{ g. pot}^{-1}$). Les résultats ont également révélé que, comparativement aux autres fertilisants phosphorés à formule unique (TSP et PNPA), l'apport de la formule unique de phosphate naturel calciné a eu une influence très faible sur la production du niébé. Mais, la combinaison du phosphate naturel calciné avec le triple super phosphate (TSP) et le phosphate naturel partiellement acidulé (PNPA) a conduit à une légère augmentation du rendement grain du niébé. En effet, en application unique, le PNPA qui s'est révélé être plus efficace que le PNC qui a eu une faible influence sur la production du niébé. Dans l'ensemble, les rendements grains des traitements qui ont reçu du phosphate à formulation unique étaient de l'ordre de $\text{PNPA} > \text{TSP} > \text{BP} > \text{PNC}$ (**Figure 1**).

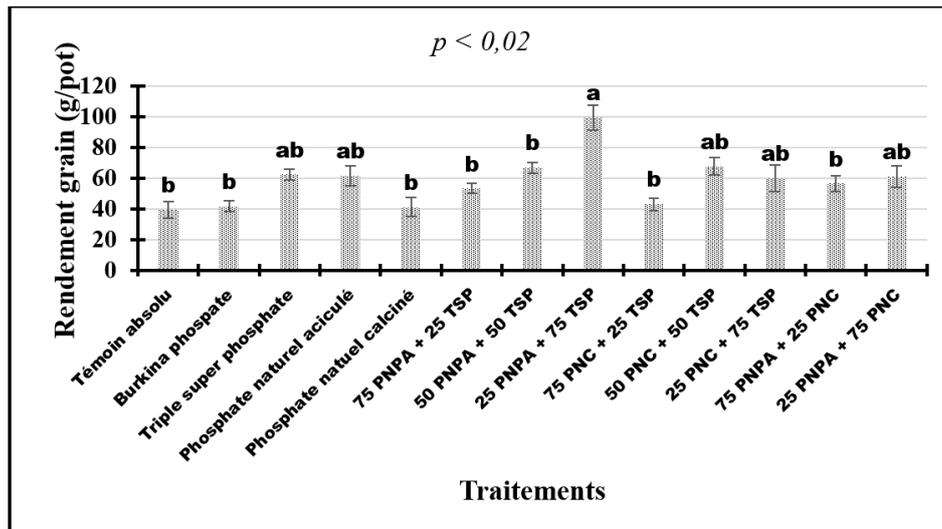


Figure 1 : Rendement grain du niébé en fonction des traitements appliqués

Légende : PNPA : phosphate naturel partiellement acidulé ; PNC : phosphate naturel calciné ; TSP : triple super phosphate ; BP : Burkina phosphate ; les lettres différentes indiquent une différence significative ($p < 0,05$) entre les traitements pendant la période d'expérimentation

3-4. Effet de la fertilisation sur la biomasse totale, l'indice de récolte

Le **Tableau 4** présente les résultats obtenus sur les composantes de rendement et le rendement grain. Les résultats de biomasse totale (aérienne et souterraine) des plantes de niébé montrent deux groupes statistiquement différents en fonction des traitements. L'analyse de tableau montre que les traitements T7 (25 % PNPA + 75 % TSP) et T9 (50 % PNC + 50 % TSP) ont plus influencé sur la production de la biomasse totale avec des valeurs moyennes de 208 ± 6 g/pot et 154 ± 9 g.pot⁻¹ respectivement. La plus faible biomasse totale a été obtenue avec le traitement T8 (75 %PNC+ 25 %TSP) soit 96 ± 6 g.pot⁻¹. En ce qui concerne l'indice de récolte (**Tableau 4**), il atteint sa valeur la plus élevée avec le traitement T6 (50 % PNPA + 50 % TSP). Le traitement T1 (BP) présente, quant à lui, l'indice de récolte le plus faible.

Tableau 4 : Effet des traitements sur la biomasse totale et l'indice de récolte

Traitements	Biomasse totale (g.pot ⁻¹)	IRD (%)
T0 : Témoin absolu	107 ^b ± 6	37 ^{ab} ± 0,024
T1 : Burkina phosphate (BP)	111 ^b ± 4	38 ^b ± 0,014
T2 : Triple super phosphate (TSP)	129 ^b ± 3	48 ^{ab} ± 0,037
T3 : Phosphate naturel partiellement acidulé (PNPA)	133 ^b ± 4	46 ^{ab} ± 0,018
T4 : Phosphate naturel calciné (PNC)	104 ^b ± 6	39 ^b ± 0,013
T5 : 75 % PNPA+25 % TSP	118 ^b ± 4	45 ^{ab} ± 0,014
T6 : 50 % PNPA+50 % TSP	117 ^b ± 1	57 ^a ± 0,036
T7 : 25 % PNPA + 75 % TSP	208 ^a ± 6	48 ^{ab} ± 0,013
T8 : 75 % PNC+25 % TSP	86 ^b ± 6	44 ^{ab} ± 0,053
T9 : 50 % PNC+50 % TSP	154 ^b ± 9	44 ^{ab} ± 0,043
T10 : 25 % PNC+75 % TSP	143 ^b ± 5	40 ^b ± 0,065
T11 : 75 % PNC+25 % PNPA	129 ^b ± 5	44 ^{ab} ± 0,016
T12 : 25 % PNC+75 % PNPA	130 ^b ± 4	46 ^{ab} ± 0,025
CV(%)	23,9	3,1
Probabilité	0,014	0,036
Significativité	*	*

Légende : * : significatif ; CV (%) = coefficient de variation. IDR : indice de récolte ; dans une même colonne, les valeurs affectées d'une même lettre ne diffèrent pas significativement au seuil de 5 %.

3-5. Efficacité agronomique relative des traitements

Les résultats de l'efficacité agronomique relative (EAR) sont présentés dans la **Figure 2**. En effet, l'EAR pourrait être utilisée pour caractériser les effets des nutriments. Parmi ces traitements, il existe une différence significative ($p < 0,05$) dans l'efficacité agronomique du P apporté durant l'expérimentation sous serre. L'EAR moyenne des traitements phosphatés variait de 14, 15 à 224,7 $\text{g.P}^{-1}\text{g}^{-1}$ dont la plus grande valeur est obtenue avec le phosphate naturel partiellement acidulé tandis que la plus faible est obtenue avec le traitement combinant 75 % PNC + 25 % TSP. L'analyse de la **Figure 2** montre une augmentation significative des EAR des traitements TSP (34,8 %) et PNPA (823 %) et une réduction de 37 % pour le PNC par rapport au traitement témoin sans fertilisant.

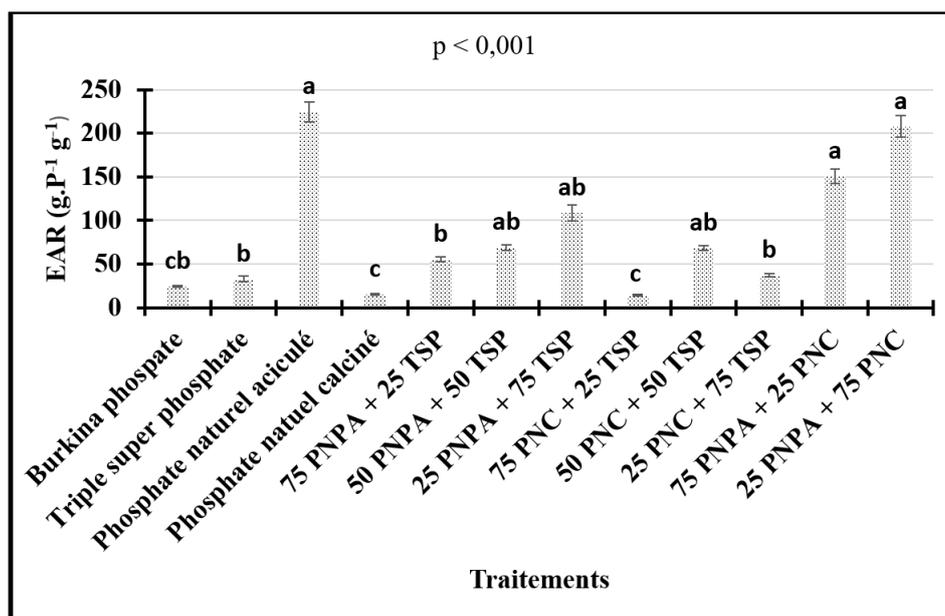


Figure 2 : Efficacité agronomique relative

Légende : EAR : efficacité agronomique relative ; les lettres différentes indiquent une différence significative ($p < 0,05$) entre les traitements pendant la période d'expérimentation

3-6. Effet des traitements sur les propriétés chimiques du sol

L'effet des traitements sur les propriétés chimiques des sols sous culture de niébé est consigné dans le **Tableau 5**. Ces résultats montrent qu'il existe une différence hautement significative entre les différents traitements pour le pH_{eau} du sol selon l'analyse de variance (ANOVA) au seuil de 5 % ($p < 0,05$). De façon globale, une basicité du sol est observée dans tous les des traitements à l'exception du témoin avant labour. Le **Tableau 5** présente les résultats des teneurs en carbone, azote, potassium disponible, potassium total, phosphore assimilable et en phosphore total du sol sous culture de niébé. Ces résultats révèlent des différences significatives et selon l'analyse de variance au seuil de 5 % ($P < 0,05$) permettant de regrouper les traitements. La teneur en carbone du sol sous culture de niébé révèle que les traitements se répartissent en quatre groupes statistiquement distincts, incluant des groupes intermédiaires. La teneur la plus élevée est obtenue avec les traitements T4 (PNC) et T7 (25 %PNPA et 75 %PNC) et la plus faible teneur est observée avec le traitement combinant 25 % PNC+75 % PNPA. Il ressort de l'analyse (**Tableau 5**) qu'il existe cinq (05) groupes statistiquement différents pour la teneur en azote dans tous les traitements. Les teneurs les plus élevées ont été observées au niveau des traitements T4 (PNC). Le traitement T4 a permis d'avoir une teneur

en azote plus importante que celle du témoin avec 7,93 %. L'analyse du **Tableau 5** montre qu'il existe deux (02) groupes statistiquement différents pour le rapport de C/N pour tous les traitements. En effet, le traitement T2 présente un rapport plus élevé (9,6 %) par rapport au traitement témoin. L'évolution de la teneur en potassium assimilable par traitement (**Tableau 5**) révèle une différence significative entre les traitements avec deux (02) groupes. L'analyse des résultats révèle une légère baisse des teneurs au niveau tous les traitements, ce qui est normal compte tenu des absorptions effectuées par les plantes. Néanmoins la teneur la plus élevée de potassium assimilable est observée avec le traitement T3 (PNPA) avec un taux de 13,1 % d'augmentation par rapport au témoin. La teneur la plus faible est obtenue avec le traitement T5 (75 % PNPA + 25 % TSP). Les résultats de la teneur en potassium total (K total) du sol (**Tableau V**) révèlent des différences significatives entre les traitements avec trois (03) groupes. Les traitements T5 (75 % PNPA + 25 % TSP) et T9 (50 % PNC + 50 % TSP) ont provoqué une augmentation respective de la teneur en potassium total de 11,74% et 10,5% par rapport au témoin non fertilisé. L'analyse (**Tableau 5**) présente aussi des teneurs en phosphore assimilable et phosphore total du sol avec quatre groupes statistiquement différents. Les traitements ont entraîné une augmentation de la teneur en phosphore assimilable par rapport au témoin particulièrement les traitements T4, T5 et T10. Les traitements T4 (PNC), T5 (75 % PNPA + 25% TSP) et T10 (25 % PNC + 75 % PNPA) ont amélioré la teneur en phosphore assimilable du sol sous culture de niébé à des teneurs variées avec respectivement 37,82 %, 43,1 et 40,6 %. En ce qui concerne le phosphore total (**Tableau 5**), on note une légère augmentation de sa teneur dans le sol. Le traitement T9 (502,2 mg.kg⁻¹) a enregistré la teneur la plus élevée, suivi par le traitement T4 (500,8 mg.kg⁻¹), tandis que la teneur la plus faible a été observée avec le traitement témoin (T0) sans fertilisant.

Tableau 5 : Paramètres physico-chimiques du sol avant et en fin de campagne

Traitements	C (%)	C/N	K Dispo (mg/kg)	K Total (mg/kg)	MO (%)	N (%)	PBray1 (mg/kg)	P Total (mg/kg)	pH
T0''	0,53 ^d ± 0,023	26,5 ^a ± 1,15	358,7 ^a ± 68,55	943 ^d ± 49,51	0,91 ^a ± 0,04	0,02 ^e ± 0,0	2,59 ^d ± 0,69	158 ^e ± 22,8	7,2 ^e ± 0,2
T0	0,835 ^{bc} ± 0,01	10,5 ^b ± 0,04	222 ^b ± 2,85	1107 ^c ± 25,75	1,44 ^{bc} ± 0,01	0,08 ^{bcd} ± 0,0	30,72 ^{ab} ± 0,13	343,2 ^d ± 58,29	8,28 ^b ± 0,04
T1	0,816 ^{bc} ± 0,01	11,16 ^b ± 0,06	204,7 ^b ± 1,42	1123 ^{bc} ± 17,00	1,40 ^{bc} ± 0,01	0,08 ^{bcd} ± 0,001	38,51 ^c ± 0,44	401,6 ^{abc} ± 1,18	8,40 ^a ± 0,01
T2	0,813 ^{bc} ± 0,05	11,51 ^b ± 0,33	214,6 ^b ± 7,12	1194 ^{bc} ± 26,38	1,40 ^{bc} ± 0,08	0,07 ^d ± 0,005	31 ^c ± 0,87	412,8 ^{acd} ± 2,66	8,28 ^b ± 0,04
T3	0,814 ^{bc} ± 0,02	10,97 ^b ± 0,06	251,6 ^b ± 19,94	1169 ^{ab} ± 17,33	1,40 ^{bc} ± 0,04	0,08 ^{bcd} ± 0,003	30,32 ^a ± 2,93	392,8 ^{bcd} ± 4,20	8,22 ^b ± 0,01
T4	0,929 ^b ± 0,01	10,56 ^b ± 0,08	212,1 ^b ± 5,70	1181 ^{bc} ± 17,27	1,60 ^b ± 0,01	0,09 ^b ± 0,003	42,34 ^a ± 0,41	500,8 ^a ± 13,98	8,05 ^c ± 0,00
T5	0,878 ^{bc} ± 0,03	11,15 ^b ± 0,15	145,5 ^b ± 21,36	1237 ^{abc} ± 16,07	1,51 ^{bc} ± 0,04	0,08 ^{bcd} ± 0,003	43,95 ^a ± 0,98	465,4 ^{abc} ± 5,45	8,07 ^c ± 0,01
T6	0,911 ^b ± 0,01	11,14 ^b ± 0,14	172,7 ^b ± 8,54	1182 ^{bc} ± 34,18	1,57 ^b ± 0,01	0,08 ^{bcd} ± 0,002	39,27 ^{ab} ± 2,93	452,1 ^{abc} ± 19,79	8,09 ^c ± 0,02
T7	0,933 ^b ± 0,01	11,35 ^b ± 0,04	180,1 ^b ± 1,42	1182 ^{bc} ± 50,99	1,60 ^b ± 0,02	0,08 ^{bc} ± 0,001	44,84 ^a ± 0,84	479,1 ^{ab} ± 11,76	7,97 ^c ± 0,03
T8	0,798 ^{bc} ± 0,04	11,3 ^b ± 0,08	172,7 ^b ± 17,09	1153 ^{bc} ± 0,37	1,37 ^{bc} ± 0,07	0,07 ^{cd} ± 0,004	40,07 ^{ab} ± 1,31	496,2 ^b ± 13,72	8,10 ^c ± 0,04
T9	1,047 ^a ± 0,05	10,95 ^b ± 0,18	175,1 ^b ± 1,42	1223 ^{abc} ± 60,73	1,80 ^a ± 0,08	0,09 ^a ± 0,003	40,57 ^{ab} ± 1,26	502,2 ^a ± 7,57	7,85 ^d ± 0,07
T10	0,835 ^{bc} ± 0,05	11,23 ^b ± 0,07	192,4 ^b ± 5,70	1166 ^{bc} ± 24,67	1,42 ^{bc} ± 0,09	0,08 ^{bcd} ± 0,005	43,2 ^a ± 3,33	459,2 ^{abc} ± 34,85	8,03 ^c ± 0,01
T11	0,848 ^{bc} ± 0,02	10,64 ^b ± 0,07	160,3 ^b ± 1,42	1152 ^{bc} ± 33,67	1,46 ^{bc} ± 0,03	0,08 ^{bcd} ± 0,002	41,69 ^{ab} ± 1,49	494 ^a ± 4,24	8,00 ^c ± 0,02
T12	0,75 ^c ± 0,010	11,21 ^b ± 0,06	162,8 ^b ± 5,70	1329 ^a ± 0,23	1,29 ^c ± 0,02	0,07 ^{cd} ± 0,001	34,67 ^{ab} ± 1,49	372,3 ^{cd} ± 14,65	7,96 ^c ± 0,04
CV(%)	6	4,8	17,9	4,7	6	6,4	7,9	8,7	0,7
Probabilité	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Signification	***	***	***	***	***	***	***	***	***

Légende : C : carbone ; C/N : rapport carbone-azote ; Kdispo : potassium disponible ; K total : potassium total ; pH : potentiel hydrogène ; MO : matière organique, N : azote ; PBray1 : phosphore assimilable ; Ptotal : phosphore total ; *** = Très hautement significatif ; CV (%) = coefficient de variation. T0 = témoin ; T1 = BP ; T2 = TSP ; T3 = PNPA ; T4 = PNC ; T5 = 75 % PNPA + 25 % TSP ; T6 = 50 % PNPA + 50 % TSP ; T7 = 25 % PNPA + 75 % TSP ; T8 = 75 % PNC + 25 % TSP ; T9 = 50 % PNC + 50 % TSP ; T10 = 25 % PNC + 75 % TSP ; T11 = 75 % PNC + 25 % PNPA ; T12 = 25 % PNC + 75 % PNPA. Dans une même colonne, les valeurs affectées d'une même lettre ne diffèrent pas significativement au seuil de 5 % selon le test de Student Newman Keuls.

4. Discussion

4-1. Effet des traitements sur la production de niébé

L'étude a révélé que l'ensemble des traitements a significativement amélioré les rendements du niébé, à l'exception du traitement T4 (PNC). En effet, l'application du phosphate naturel calciné en formulation unique a induit une réduction du rendement grain de niébé de 21 % par rapport au témoin non fertilisé, et de 3 % par rapport au traitement au phosphate du Burkina (BP). La baisse des rendements observée sous le traitement T4 (PNC) suggère fortement que ce traitement a exercé un effet inhibiteur sur la croissance des plants, impactant ainsi négativement le rendement. Ces résultats corroborent les observations de Nakamura et Chien, dont les études sur le phosphate naturel calciné ont montré que son application excessive peut facilement causer des dommages aux plantes, probablement en raison de la présence de substances phytotoxiques dans ces phosphates calcinés [36, 37]. Ces résultats, qui mettent en évidence la faible efficacité du phosphate naturel calciné, concordent avec les travaux de Traoré et *al.*, lesquels ont montré que le phosphate naturel calciné, à l'instar du TSP, fournit aux plantes du phosphore assimilable avec une libération progressive du phosphore au fil du temps [19]. Contrairement aux nôtres, les études de [38] au Brésil ont rapporté que le PN brésilien calciné était 66 à 72 % aussi efficace que le triple superphosphate (TSP) pour le riz paddy sur sol argileux. Dans cette logique, Fukuda à travers une étude sur le riz dans différentes conditions de sol a démontré que l'effet du PNC et PNA sur le rendement du riz était régi par des facteurs des sols [18]. La faible réponse observée avec le phosphate naturel calciné du Burkina semble dépendre de la nature du sol sur lequel il est appliqué et varie en fonction des cultures. En comparaison avec le phosphate du Burkina, seul le phosphate naturel acidulé (PNPA) a démontré une meilleure performance, avec une augmentation du rendement de 32 %. Les rendements résultant du phosphore acidulé et calciné en formulation unique sont faibles par rapport à ceux résultant de leur combinaison avec le TSP. Ce qui confirme l'effet du temps sur la solubilisation du PNA et du PNC. Les rendements élevés au niveau des différentes combinaisons avec le PNPA montrent que tout le long du cycle, le traitement appliqué continue d'agir sur la plante. Cela est dû au fait que la libération du P dans le PNPA et le PNC est graduelle par rapport aux sources de phosphore soluble où le P est directement disponible et peut être facilement utilisé par les cultures [39, 40]. Plusieurs auteurs ont rapporté des effets positifs d'application de ces PN partiellement acidulés sur les cultures, notamment le mil [41], le sorgho [42], le niébé et le maïs [43]. Quant à la combinaison des deux engrais (PNPA et PNC) entre eux, leurs performances se sont révélées au niveau de la vigueur des plants (*Tableau 5*) et la qualité des grains.

4-2. Effet des traitements sur les propriétés chimiques du sol

L'analyse des échantillons de sol sous culture de niébé a révélé une augmentation à tendance basique générale de l'acidité du sol pour l'ensemble des traitements appliqués. Cette basicité du pH avec l'application des engrais phosphatés serait probablement due aux réactions chimiques dans le sol [44]. En effet, en contact avec l'eau les PN libèrent des ions (Ca^{2+} et Mg^{2+}) qui réagissent avec les acides présents dans le sol neutralisant ainsi leur acidité. L'action du PNC lui est plus accentuée du fait de son enrichissement en carbonates (magnésium, potassium, calcium) qui apportent des cations basiques. Nos résultats sont en accord avec ceux de certains auteurs [45 - 47] qui ont rapporté que l'apport de phosphate naturel augmente le taux de calcium et de magnésium échangeable dans la solution du sol. Les résultats d'analyse des échantillons de sol ont montré également que tous les traitements ont contribué de façon générale, à l'amélioration (significative) des teneurs en azote total, potassium total, potassium disponible, phosphore total et phosphore assimilable comparativement au témoin. Une augmentation des teneurs en phosphore total a été observée dans tous les traitements par rapport au témoin, conformément à l'effet attendu. Cette augmentation est plus prononcée au niveau des traitements contenant le PNC (T4, T8, T9, T10, T11 et T12). Ce dernier étant moins

soluble, sa minéralisation est lente, donnant une possibilité au phosphore d'être fixé sur les particules du sol ou d'être immobilisé par le calcium, ce qui engendre cette augmentation de teneur de phosphate total dans le sol. Nos résultats viennent confirmer ceux de Lompo [14] ; Sawadogo [48]; Traoré et al. [49] selon lesquels les sources de phosphore les moins solubles sont celles qui améliorent l'enrichissement du sol en phosphore. Une augmentation du calcium dans la solution du sol avec l'application du PNC a été observée, ce qui corrobore les résultats de [50]. 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 [6, 51]. Quant à la disponibilité du phosphore assimilable pour les plantes, tous les traitements se sont révélés être de bonnes sources de phosphore par rapport au témoin (**Tableau 5**). Une corrélation positive entre le nombre de nodules et le rendement grain du niébé a également été obtenu. En effet, le phosphore ayant un rôle crucial dans la formation, le développement et l'activité des nodules, son taux acceptable dans le sol a donc contribué à l'augmentation du nombre de nodules et de la fixation d'azote atmosphérique d'où l'amélioration des rendements et les valeurs d'azote total obtenues. Nos résultats sont en accord avec ceux de N'gbesso [52], qui ont montré l'existence d'une corrélation significative et positive entre le nombre de nodules par plant avec le poids des nodules affectant les rendements du niébé [53]. La combinaison du PNPA et du TSP (T5 : 75 % PNPA + 25 % TSP ; T6 : 50 % PNPA + 50 TSP ; T7 : 25 % PNPA + 75 % TSP) a contribué à améliorer la libération du phosphore assimilable pour les plantes ainsi que les teneurs de carbone, rapport C/N et du potassium. En plus, la combinaison du PNC et du TSP, a affecté la libération de phosphore assimilable de l'un et de l'autre. En effet, la combinaison du PNPA avec le TSP ayant eu l'effet contraire, cela montre qu'en plus de sa minéralisation lente, l'interaction du PNC avec le TSP a favorisé certaines réactions de fixation du P diminuant ainsi sa forme assimilable. Du fait de l'enrichissement du PNC en carbonates, l'on soupçonne la présence d'éléments limitants (N ; K) réduisant l'absorption du P. Nos résultats sont en accord à ceux de [47]. En conclusion, durant toute l'expérimentation, le traitement T7 (25 % PNA + 75 % TSP) s'est démarqué positivement avec les plus grandes valeurs dans la majorité des paramètres ayant été pris en considération, prouvant ainsi son efficacité.

5. Conclusion

L'objectif de cette étude était d'évaluer l'efficacité agronomique de différentes sources de phosphore sur la production du niébé ainsi que sur les propriétés chimiques du sol. Il ressort de cette étude que le phosphate naturel acidulé (PNPA, traitement T3) a eu un effet significatif ($p < 0,001$) sur les paramètres de croissance ainsi que sur le rendement grain du niébé, comparativement aux autres traitements. En effet, le traitement T3 a enregistré le rendement le plus élevé, soit 62 g/pot, représentant une augmentation de 32 % du rendement en grains de niébé par rapport au phosphate du Burkina (BP). En revanche, le phosphate naturel calciné (PNC) a induit une diminution de 21 % du rendement par rapport au BP. En ce qui concerne les propriétés chimiques du sol, l'ensemble des traitements a globalement contribué à leur amélioration, avec une efficacité particulièrement prononcée pour les traitements combinant le phosphate naturel acidulé (PNPA) et le superphosphate triple (TSP). Par ailleurs, le phosphate naturel calciné (PNC) s'est révélé être une meilleure source d'enrichissement progressif du sol en phosphore (P), caractérisée par une libération lente. Au vu des résultats obtenus avec les différentes sources de phosphore, le phosphate naturel partiellement acidulé (PNPA) pourrait être recommandé pour améliorer la productivité du niébé ainsi que les propriétés chimiques du sol.

Remerciements

Les auteurs traduisent également leur gratitude au centre de recherches environnementales, agricoles et de formation (CREAF) du Burkina Faso d'avoir facilité la mise en place de l'essai et la collecte des données. A Japan International Research Center for Agricultural Sciences (JIRCAS) pour le financement de cette étude.

Références

- [1] - P. A. E. D. SOMBIÉ, M. COMPAORÉ, A. Y. COULIBALY, J. T. OUÉDRAOGO, J.-B. D. L. S. TIGNÉGRÉ et M. KIENDRÉBÉOGO, *Foods*, 7 (9) (2018) 143
- [2] - S. BARRY, *Revue d'Economie Théorique et Appliquée*, 6 (2) (2016) 221 - 238
- [3] - FAO, Soils, where food begins. Outcome document of the Global Symposium on soils for nutrition 26-29 July 2022. Rome, Italy : FAO, (2023) 44
- [4] - DIRECTION GÉNÉRALE DES ÉTUDES ET DES STATISTIQUES SECTORIELLES - MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE ET DES AMÉNAGEMENTS HYDRO-AGRICOLES. Annuaire des statistiques agricoles 2020, *Ouagadougou Burkina Faso*, (2020) 437
- [5] - J. SAWADOGO, W. N. A. E. SIMPORÉ, S. B. SANON, U. S. ZABSONRÉ, F. SOMA, E. M. W.-d. NANA, *Afrique SCIENCE*, 26 (6) (2025) 65 - 76
- [6] - A. B. KOUYATE, A. IBRAHIM, I. SERME et S. G. DEMBÉLÉ, *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 14 (9) (2020) 3285 - 3296
- [7] - S. NAKAMURA, M. FUKUDA, F. NAGUMO et S. TOBITA, *Japan Agricultural Research Quarterly : JARQ*, 47 (4) (2013) 353 - 363
- [8] - D. BISWAS, G. NARAYANASAMY, S. DATTA, G. SINGH, M. BEGUM, D. MAITI, A. MISHRA et B. BASAK, *Communications in soil science and plant analysis*, 40 (13-14) (2009) 2285 - 2307
- [9] - M. BONZI, F. LOMPO, N. OUANDAOGO et P. SÉDOGO, *Innovations as Key to the Green Revolution in Africa : Exploring the Scientific Facts*, 1 (1) (2011) 381 - 390
- [10] - S. H. CHIEN, G. CARMONA, J. HENAO et L. PROCHNOW, *Communications in soil science and plant analysis*, 34 (13-14) (2003) 1825 - 1835
- [11] - I. NIGNAN, J. OUÉDRAOGO, S. NAKAMURA, I. SERME et K. COULIBALY, *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 17 (6) (2023) 2312 - 2324
- [12] - V. HIEN, S. YOUL, O. TRAORÉ, K. SANOU et D. KABORÉ, Rapport de synthèse des activités du volet expérimentation du projet engrais vivriers 1986–1991: Résultats agronomiques et évaluations économiques des formules d'engrais à moindre coût pour les céréales, (1992) 184
- [13] - F. LOMPO, Effets induits des modes de gestion de la fertilité sur les états du phosphore et la solubilisation des phosphates naturels dans deux sols acides du Burkina Faso, *Doctorat d'état es-Sciences Naturelles*, Université de Cocody, (2009) 254
- [14] - F. LOMPO, Contribution à la valorisation des phosphates naturels du Burkina Faso: études des effets de l'interaction phosphates naturels-matières organiques, *Thèse de Doctorat d'Etat*, Université Nationale de Côte d'Ivoire, (2014) 263
- [15] - E. COMPAORÉ, J.-Y. GRIMAL, J.-L. MOREL et J.-C. FARDEAU, *Cahiers Agricultures*, 6 (4) (1997) 251 - 255
- [16] - S. N. CHIEN, L. I. PROCHNOW et R. MIKKELSEN, *RAE*, 75 (50) (2010) 25
- [17] - S. NAKAMURA, T. IMAI, K. TORIYAMA, S. TOBITA, R. MATSUNAGA, M. FUKUDA et F. NAGUMO, *Japan J Soil Sci Plant Nutr*, 86 (2015) 535 - 539
- [18] - M. FUKUDA, D. M. SOMA, S. IWASAKI, S. NAKAMURA, T. KANDA, K. OUATTARA et F. NAGUMO, *Plos one*, 16 (4) (2021) e0250240

- [19] - 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, *Doctorat Unique*, Thèse de Doctorat Unique, Université Nazi Boni de Bobo-Dioulasso, (2024) 137
- [20] - B. TRAORÉ, M. TRAORÉ, P. J. d. A. COULIBALY, J. SAWADOGO, S. S. PAPA et H. B. NACRO, *Archives of agronomy and soil science*, 71 (1) (2025)
- [21] - Z. GNANKAMBARY, U. STEDT, G. NYBERG, V. HIEN et A. MALMER, *Soil Biology & Biochemistry*, 40 (2008) 350 - 359
- [22] - P. BAZONGO, K. TRAORE, B. KIEMTORE, I. A. N. DA, A. COULIBALY et O. TRAORE, *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 17 (5) (2023) 2025 - 2036
- [23] - J. SAWADOGO, P.J.D.A. COULIBALY et J. B. LEGMA, *Afrique SCIENCE*, 21 (2) (2022) 1 - 12
- [24] - W. JIANG, X. LIU, X. WANG, L. YANG et Y. YIN, *Sustainability*, 11 (4799) (2019) 1 - 14
- [25] - B. TRAORE, T. MAMOUDOU, B. ANDRÉ et N. HASSAN BISMARCK, *Revue Africaine d'Environnement et d'Agriculture*, 6 (4) (2023) 120 - 129
- [26] - K. T. YEO, L. FONDIO, K. L. KOUAKOU, M. F. D. P. N'GBESSO, M.-P. A. ATSE et N. D. COULIBALY, *Afrique SCIENCE*, 20 (6) (2022) 1 - 13
- [27] - J. SAWADOGO, R. F. W.-P. KABORE, A. OUIYA, C. A. SAVADOGO, M. BOUGOUMA et J. B. LEGMA, *Afrique SCIENCE*, 25 (4) (2024) 15 - 24
- [28] - A. WALKLEY et I. A. BLACK, *Soil Science*, 37 (1934) 29 - 38
- [29] - J. SAWADOGO, P. J. D. A. COULIBALY, F. J. BAMBARA, A. C. SAVADOGO, E. COMPAORE et J. B. LEGMA, *Afrique Science*, 17 (6) (2020) 44 - 57
- [30] - A. IZZAH, M. ADIBAH et W. WAN ASRINA, *Transactions of the Malaysian Society of Plant Physiology*, 28 (1) (2021) 112 - 113
- [31] - R. H. BRAY et L. T. KURTZ, *Soil science*, 59 (1) (1945) 39 - 46
- [32] - J. H. TAYLOR et J. M. WEISBERG, *Astrophysical Journal, Part 1 (ISSN 0004-637X)*, Research supported by NSF, Vol. 345, (1989) 434 - 450
- [33] - I. WALINGA, J. VAN DER LEE, V. J. HOUBA, W. VAN VARK et I. NOVOZAMSKY, *Wageningen Agricultural University*, 1 (1) (2013) 197 - 200
- [34] - AFNOR, Détermination du pH : *In AFNOR ISO 103 90, Qualité des sols*, (1981)
- [35] - B. B. SOMDA, B. OUATTARA, I. SERME, M. B. POUYA, F. LOMPO, S. J. B. TAONDA et P. M. SEDOGO, *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 11 (2) (2017) 670 - 683
- [36] - S. NAKAMURA, T. KANDA, T. IMAI, J. SAWADOGO et F. NAGUMO, *Soil Science and Plant Nutrition*, 65 (3) (2019) 267 - 273
- [37] - S. H. CHIEN, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 50 (16) (2019) 2065 - 2073
- [38] - E. FRANCISCO, S. H. CHIEN, L. I. PROCHNOW, E. R. AUSTIN, M. C.M. d. TOLEDO et R. TAYLOR, *Agronomy Journal*, 100 (3) (2008) 819 - 829
- [39] - E. NDELEKO-BARASA, M. MUCHERU-MUNA et K. NGETICH, *Heliyon*, 7 (11) (2021) e08332
- [40] - F. SABA, Etude des effets de l'utilisation combinée du biochar et de la fertilisation microdose sur les propriétés agro-pédologiques des zones ouest et centre-nord du Burkina Faso, *Doctorat Unique*, Université de Liege (Belgium), (2023) 184
- [41] - A. BATIONO, C. CHRISTIANSON et W. BAETHGEN, *Agronomy Journal*, 82 (2) (1990) 290 - 295
- [42] - M. K. ABEKOE et H. TIESSEN, *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 52 (1998) 45 - 54
- [43] - E. COMPAORE, J. C. FARDEAU et J. L. MOREL, *Innovations as Key to the Green Revolution in Africa*, 1 (1) (2011) 591 - 596

- [44] - F. LOMPO, A. BATIONO, M. P. SEDOGO, V. B. BADO, V. HIEN et B. OUATTARA, Role of Local Agro-minerals in Mineral Fertilizer Recommendations for Crops: Examples of Some West Africa Phosphate Rocks Bationo Andre, Ngaradoum Djimasbé, Youl Sansan, Lompo Francois, Fening Joseph Opoku. Cham : *Springer International Publishing*, (2018) 157 - 180
- [45] - C. SZILAS, J. SEMOKA et O. BORGGAARD, *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 78 (2007) 225 - 237
- [46] - A. BAGAYOGO, J. SAWADOGO, M. KONATE, M. SIE, S. NAKAMURA, F. NAGUMO et M. SAWADOGO, *Agricultural Sciences*, 15 (4) (2024) 423 - 438
- [47] - J. SAWADOGO, P. J. D. A. COULIBALY, B. TRAORE, M. S. D. BASSOLE, C. A. SAVADOGO et J. B. LEGMA, *Journal of Applied Biosciences*, 168 (1) (2021) 17375 - 17390
- [48] - J. SAWADOGO, P. COULIBALY, B. TRAORE, M. S. D. BASSOLE, A. KABORE et J. B. LEGMA, *Afrique SCIENCE*, 19 (4) (2021) 189 - 202
- [49] - O. TRAORÉ, S. SINAJ, E. FROSSARD et J. M. VAN DE KERKHOVE, *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 55 (1999) 123 - 131
- [50] - M. EL OUARDI, L. SAADI, M. WAQIF, H. CHEHOUANI, I. MRANI, M. ANOUA et A. NOUBHANI, *Physical & chemical news*, 54 (1) (2010) 68 - 75
- [51] - P. J. D. A. COULIBALY, J. SAWADOGO, Y. A. I. BAMBARA, W. C. A. OUÉDRAOGO, J. B. LEGMA et E. COMPAORÉ, *Current Agriculture Research Journal*, 9 (1) (2021) 43 - 53
- [52] - F. D. P. M. N'GBESSO, L. FONDIO, B. E. K. DIBI, H. A. DJIDJI et C. KOUAME, *Journal of Applied Biosciences*, 63 (1) (2013) 4754 - 4762
- [53] - P. F. WHITE, H. J. NESBITT, C. ROS, V. SENG et B. LOR, *Soil Science and Plant Nutrition*, 45 (1) (1999) 51 - 63