

# Réponse du mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) à l'inoculation mycorhizienne en fonction de la distance d'apport d'engrais phosphatés

## Efficacité d'utilisation du P sous une inoculation mycorhizienne

Iliassou NIGNAN<sup>1,2\*</sup>, Jean OUEDRAOGO<sup>2</sup>, Idriss SERME<sup>2</sup>, Kalifa COULIBALY<sup>1</sup>

### Résumé

Il est urgent de développer des stratégies d'apport des engrais phosphatés en réponse à la faible efficacité d'utilisation du phosphore due fait de sa faible mobilité dans le sol. Ainsi, une étude a été conduite à la station de l'INERA de Saria en 2022 et 2023 afin d'évaluer l'effet des interactions entre l'inoculation mycorhizienne et la distance d'apport des engrais phosphatés sur les paramètres de croissance du mil et l'efficacité d'utilisation du phosphore. Les engrais utilisés ont été le TSP (Triple-Superphosphate) et le CBKCa (Burkina-Phosphate-Calciné-enrichi en Calcium). Ainsi, un dispositif en split-split-plot avec trois répétitions a été installé. Les parcelles principales étaient constituées des parcelles inoculées et non inoculées. Les sources de P (TSP et Burkina-Phosphate-Calciné-enrichi en Calcium) ont été appliquées sur les parcelles secondaires. Les parcelles tertiaires étaient constituées de deux distances d'apport des engrais (d5=5cm et d10=10cm du collet des plantes). Ils ont été appliqués à la dose de 23kgP<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.ha<sup>-1</sup>, en combinaison avec N-K-S-B, respectivement 37-14-6-1 kg.ha<sup>-1</sup>. En plus des paramètres de croissance et du rendement, l'efficacité d'utilisation du phosphore par le mil a été évaluée. Les résultats ont montré que quelle que soit la distance d'application des engrais, l'apport de l'inoculum a entraîné une augmentation significative de la hauteur (8,29cm) (p = 0,014) et du diamètre au collet (212,87mm) (p = 0,027) en 2023. Indépendamment des distances, l'inoculation a amélioré significativement les indices d'efficacité d'utilisation du P par le mil. En présence de l'inoculum, d5 a permis d'enregistrer la valeur moyenne du rendement en grain le plus élevé avec 1599kg.ha<sup>-1</sup>. Le traitement d5 en présence de l'inoculum a entraîné une augmentation de 39,84% du rendement en grain par rapport au traitement d5 en absence d'inoculum. Comparativement à d10, cette augmentation est estimée à 35,65% et 55,91% respectivement en présence et en absence d'inoculum. Ces résultats montrent l'importance des mycorhizes dans le processus de mise à disposition du P aux cultures.

**Mots-clés :** Mil, mycorhizes, utilisation du Phosphore TSP et CBKCa, Burkina Faso.

### Abstract

#### Response of millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) to mycorrhizal inoculation as a function of phosphate fertilizer application distance

It is urgent to develop strategies for applying phosphate fertilizers in response to the low efficiency of phosphorus use due to its low mobility in the soil. Thus, a study was conducted at the INERA Saria station in 2022 and 2023 in order to evaluate the effect of interactions between mycorrhizal inoculation and the distance from which phosphate fertilizers are applied on millet growth parameters and phosphorus use efficiency. The fertilizers used were TSP (Triple-Superphosphate) and CBKCa (Burkina-Phosphate-Calcinated-enriched with Calcium). Thus, a split-split-plot design with three repetitions was installed. The main plots consisted of inoculated and non-inoculated plots. P sources (TSP and Burkina-Calcined Phosphate-enriched with Calcium) were applied to secondary plots. The tertiary plots consisted of two fertilizer application distances (d5=5cm and d10=10cm from the plant collar). They were applied at a dose of 23kgP<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.ha<sup>-1</sup>, in combination with N-K-S-B, respectively 37-14-6-1 kg.ha<sup>-1</sup>. In addition to growth parameters and yield, the efficiency of phosphorus use by millet was evaluated. The results showed that whatever the distance of fertilizer application, the addition of inoculum resulted in a significant increase in height (8.29cm) (p = 0.014) and diameter at the collar (212.87mm) (p = 0.027) in 2023. Independently of the distances, inoculation significantly improved the indices of P use efficiency by millet. In the presence of the inoculum, d5 made it possible to record the average value of the highest grain yield with 1599kg.ha<sup>-1</sup>. Treatment d5 in the presence of inoculum led to an increase of 39.84% in grain yield compared to treatment d5 in the absence of inoculum. Compared to d10, this increase is estimated at 35.65% and 55.91% respectively in the presence and absence of inoculum. These results show the importance of mycorrhizae in the process of providing P to crops.

**Keywords:** Millet, mycorrhizae, use of Phosphorus TSP and CBKCa, Burkina Faso.

<sup>1</sup>Laboratoire d'étude et de recherche sur la fertilité du sol (LERF), Institut du Développement Rural (IDR), Université Nazi BONI (UNB, BP 1091, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso

<sup>2</sup>Institut de l'Environnement et de Recherche Agricole (INERA), BP 476 Ouagadougou 01, Burkina Faso

\*Auteur correspondant ; inignan0@gmail.com ; Tel. (00226) 71567970

### INTRODUCTION

Le phosphore (P) est un macronutriment peu disponible, essentiel à la croissance et au rendement des cultures. Son absorption via le système racinaire se fait à partir principalement de la solution du sol et il joue un rôle central

dans la physiologie des plantes. En effet, le phosphore déclenche la formation des grains tandis que sa déficience affecte le poids de mille grains (Dikir et Abayechaw, 2022). Toutefois, la carence en phosphore est un problème répandu dans les sols acides, et peut devenir un obstacle majeur à la croissance des cultures et la réalisation des rendements

acceptables (George *et al.*, 2016). En effet, selon Holford (1997), la disponibilité pour les plantes du P apporté est faible puisqu'on considère qu'environ 80 % de cet élément apporté est immobilisé et devient donc indisponible, au moins à court terme, pour les plantes à cause de l'adsorption, de la précipitation ou de la conversion sous forme organique.

Dans la zone subsaharienne, avec majoritairement des sols acides, cette faible disponibilité du phosphore se manifeste par une complexation du P apporté par l'aluminium et ou le fer (Haefele *et al.*, 2014). En plus, plusieurs études ont été publiées pour mettre en garde contre une éventuelle crise des réserves de P (Syers *et al.*, 2011; Reijnders, 2014). Face à cette situation, une application d'engrais phosphaté dans une stratégie de gestion durable de la fertilité de sols et de l'eau est actuellement nécessaire afin de fournir suffisamment de P disponible pour les plantes. Dans cette optique que Nignan *et al.* (2023), ont indiqué que l'utilisation la plus efficace des engrais phosphatés est généralement obtenue lorsque le P est placé en bande dans un petit volume de sol près de la semence. En effet, l'étude de ces auteurs a montré que quelle que soit la solubilité des engrais phosphatés, leur efficacité est atteinte que lorsque ces engrais sont apportés en bande à 5 cm du collet de la plante. En plus, il est de plus en plus admis que l'inoculation mycorhizienne joue un rôle important dans l'absorption du P par les plantes. En effet, les champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA) forment une symbiose bénéfique avec les racines, en augmentant la surface racinaire aidant les racines à explorer de plus grands volumes de sol et contribuent à un plus grand apport de nutriments (Khaliq *et al.*, 2022). De plus, l'amélioration de l'absorption des éléments minéraux (le phosphore et l'azote), de la nutrition et de la croissance des plantes associées aux mycorhizes ont été largement étudiées (Djatta *et al.*, 2014; Haro *et al.*, 2015; Haro *et al.*, 2017). Par exemple, Haro *et al.* (2017) ont démontré que la croissance et la production des plantes sont améliorées par la symbiose mycorhizienne même lorsque ces plantes poussent sur des sols relativement pauvres en éléments minéraux. Or, il est bien établi que le mil est une mycotrope (Haro *et al.*, 2013). Ainsi, en milieu tropical, où les sols sont relativement pauvres en certains éléments nutritifs notamment le P (Zougrana *et al.*, 2022), avec un fort pouvoir fixateur (Haefele *et al.*, 2014), la présence des mycorhizes s'avère donc un atout indispensable. L'étude a pour objectif d'évaluer l'effet des interactions entre l'inoculation mycorhizienne et l'apport d'engrais phosphatés sur les paramètres de croissance du mil et l'efficacité d'utilisation du P.

## 2. MATERIEL ET METHODES

### 2.1. Description du site

L'étude a été conduite sur un sol ferrugineux tropical peu lessivé (CPCS, 1967), dénommé lixisol (IUSS Working Group WRB, 2014), à la station de recherche de Saria (province du Boulkiemdé) dans la zone Nord soudanienne du Burkina Faso (Figure 1). La station est située à 309 m d'altitude ; 12°15'57" de latitude Nord et 2°08'47" de longitude Ouest. Les caractéristiques chimiques de l'horizon 0-20 cm (Tableau 1) indiquent un sol acide (pH eau = 3,64), avec une faible teneur en MO (0,45 %), ce qui explique la

faiblesse de la capacité d'échange cationique (CEC). La teneur en phosphore assimilable était de 10,47 mg.kg<sup>-1</sup>. Le sol est classé comme étant moyen en P selon Mallarino *et al.* (2016) suivant Bray I pour les champs agricoles. Le sol a été mis en jachère depuis 2018 jusqu'à la mise en place de l'essai en 2022. Les pluies enregistrées durant les périodes de culture allant du 16 juillet (semis) au 30 octobre 2022 (récolte) et du 26 juillet (semis) au 7 novembre 2023 (récolte) sur le site expérimental à la station de recherche de l'INERA-Saria sont présentées dans la figure 1. En 2022, de la date des semis à celle de la récolte, 33 événements pluvieux ont été enregistrés pour un cumul pluviométrique de 586,3 mm (Figure 2A). Les données de 2023 indiquent que 378,5 mm de pluie ont été enregistrés en 40 jours de pluies (Figure 2B) avec seulement un événement pluvieux supérieurs à 50 mm. Le mois d'Août, correspondant à la période allant du 15<sup>ème</sup> JAS au 45<sup>ème</sup> JAS, a été le plus pluvieux avec un cumul pluviométrique de 312,2 mm tombées en 17 jours de pluies.

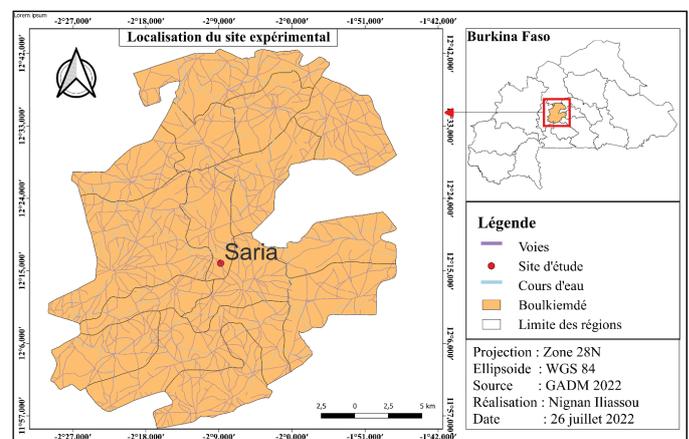


Figure 1 : Localisation du site d'expérimentation

Tableau 1. Caractéristiques physico-chimiques du sol (0-20 cm) de la station de Saria

Caractéristiques Physico-chimiques	Teneurs
<b>Texture (%)</b>	
Sable grossier	18
Sable fin	28
Limon grossier	31
Limon fin	9
Argile	14
<b>Carbone total (mg.kg<sup>-1</sup>)</b>	0,605
<b>Azote total (g.kg<sup>-1</sup>)</b>	0,042
<b>Cation (c mol.kg<sup>-1</sup>)</b>	
Ca <sup>++</sup>	1,250
Mg <sup>++</sup>	0,370
K <sup>+</sup>	0,127
Na <sup>+</sup>	0,030
Somme des bases (S)	1,777
Capacité d'échange cationique	3,017
Saturation (S/T x 100) (%)	65,000
<b>pHeau</b>	3,637
<b>Phosphore total (mg.kg<sup>-1</sup>)</b>	67,375
<b>Phosphore assimilable (mg.kg<sup>-1</sup>)</b>	10,47

**2.2. Matériel végétal**

La variété IKMP 5 du mil (*Pennisetum glaucum*) (L.) R. Br., a été obtenu auprès de l'INERA (Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles, Ouagadougou, Burkina Faso) (INERA/ICRISAT, 1987). Cette variété avec un rendement moyen de 1,7 t.ha<sup>-1</sup> a été utilisée au cours de la campagne de 2021-2022 et de 2022-2023. Elle est résistante au striga et tolérante à la sécheresse. Son cycle semis-maturité dure 110 jours.

**2.3. Inoculum**

En 2022 et 2023, une inoculation a été effectuée. Le matériel fongique était composé d'un inoculum mixte local efficient de champignons mycorrhiziens arbusculaires (CMA) isolé de la rhizosphère du niébé cultivé au Burkina Faso [*Scutellospora sp.*, *Gigaspora sp.*, *Glomus sp.* (*Yac 2 mix*)] (Haro, 2016). Il a été obtenu auprès du Laboratoire de Microbiologie, INERA/DPF. En 2023, le même essai sur l'inoculum a été reconduit sur la même parcelle.

**2.4. Fertilisants**

Pour les tests, les engrais minéraux utilisés sont présentés dans le tableau 2. Les apports d'azote (N) ont été faits sous forme d'urée au 15<sup>e</sup> et 45<sup>e</sup> jours après semis (JAS) dans tous les traitements. Le potassium (K), le bore (B) ainsi que le soufre (S) ont été apportés sous forme de KCl (60 % K<sub>2</sub>O), de Borax (14 % B) et de Sulfate de zinc (18 % S) au 15<sup>e</sup> JAS (Tableau 2). Concernant le phosphore, deux sources à savoir le CBKCa et le TSP ont été utilisées dans cette étude. Le CBKCa a été préparé en utilisant le Burkina Phosphate (BP) en deux étapes selon la procédure décrite par Nakamura *et al.* (2019). Le triple super phosphate (TSP) a été utilisé comme contrôle positif.

**Tableau 2.** Quantité des matières fertilisantes et dosage des éléments nutritifs utilisés

Matière fertilisante	Quantités matière (kg/ha)	Éléments fertilisants	Taux (%)	Dosage (Unité fertilisant)
TSP	50	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	46	23
CBKCa	128	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	18	23
Urée	80	N	46	37
KCl	23	K <sub>2</sub> O	60	14
Borax	7	B	14,5	6
Sulfate de zinc	33	S	18	1

**2.5. Conduite de l'expérimentation**

Les semis ont été précédés d'une préparation du sol effectuée en trois étapes suivant les pratiques conventionnelles. La préparation du sol a consisté à débarrasser le sol de la végétation naturelle à l'aide de coupe-coupe, et à l'ameublir à partir d'un labour plat. Ensuite, un nivellement a été réalisé à l'aide d'une herse. Les apports de fertilisants ont été précédés d'une opération de démariage, qui a permis de réduire le nombre de plantes à 2 par poquet. Trois sarclages ont été effectués pour limiter la concurrence entre le mil et les mauvaises herbes. Concernant les mycorhizes, l'inoculation

a lieu au moment des semis. Elle a consisté à mettre dans chaque poquet de semi une quantité de 10 g d'inoculum. Les parcelles témoins absolu n'ont pas reçu d'inoculum.

**2.6. Dispositif expérimental**

L'essai a été conduit en 2022 et 2023 pendant la saison de pluies. Un dispositif de type split-split-plot avec trois répétitions a été installé. En plus du témoin absolu sans apport d'engrais phosphaté non inoculé (T0) et du témoin sans apport d'engrais phosphaté inoculé (T1), huit (08) traitements ont été appliqués en combinant trois facteurs. Ce sont : un premier facteur à deux (02) modalités (les parcelles inoculées et celles non inoculées), un second facteur à deux (02) modalités constituées par les sources d'engrais phosphaté (CBKCa et TSP) et un troisième facteur à deux (02) niveaux qui sont les différentes distances (cm) d'apport des engrais phosphatés (5 et 10 cm du collet de la plante). Les parcelles élémentaires étaient distantes de 0,5 m et les blocs séparés entre eux par une allée de 1 m. Les dimensions de chaque parcelle élémentaire étaient de 4 m x 4 m soit une superficie de 16 m<sup>2</sup>. Les dimensions du dispositif expérimental étaient de 14 m sur 57 m, soit une superficie totale de 798 m<sup>2</sup>.

Les différents traitements sont les suivants :

T0 : témoin absolu sans source de phosphore non inoculé

T1 : témoin sans source de phosphore inoculé

T2 : non inoculé + CBKCa + d5

T3 : non inoculé + TSP + d5

T4 : inoculé + CBKCa + d5

T5 : inoculé + TSP + d5

T6 : non inoculé + CBKCa + d10

T7 : non inoculé + TSP + d10

T8 : inoculé + CBKCa + d10

T9 : inoculé + TSP + d10

Avec d5 et d10 correspondant à la distance de 5 et 10 cm entre le collet de la plante et le point d'apport des engrais phosphatés respectivement.

**2.7. Paramètres mesurés**

**Paramètres de croissance**

Pour la mesure de l'ensemble des paramètres de croissance, cinq (05) plantes par parcelle élémentaire ont été identifiées. Les mesures ont été effectuées à deux périodes différentes : au 35<sup>ème</sup> et au 98<sup>ème</sup> jours après le semis. La hauteur moyenne allant du collet au sommet de la feuille chapeau a été mesurée à l'aide d'un mètre ruban. Concernant le diamètre au collet, il a été mesuré à l'aide d'un pied à coulisse. Le taux de croissance relative en hauteur (TCRh) et celui du diamètre au collet (TCRd) ont été calculés selon la formule utilisée par Haro *et al.* (2020).

TCRh = (Hf - Hi) / Hi avec Hi : hauteur initiale au 35<sup>e</sup> JAS et

Hf : hauteur finale au 98° JAS.

$TCRd = (Df - Di) / Di$ , avec Di : Diamètre au collet initial au 35° JAS et Df : Diamètre au collet final au 98° JAS.

### Paramètres de production

L'évaluation du rendement a été faite en délimitant d'abord une superficie de 8,96 m<sup>2</sup> dans chaque parcelle élémentaire à la récolte. Ensuite, les épis et les tiges ont été coupés et disposés au soleil dans une aire de séchage. Puis, les épis ont été battus, vannés et pesés pour avoir le poids grains. Enfin, les rendements en grains et en pailles ont été déterminés suivant la formule suivante :

$$\text{Rendement (RDG) kg. ha}^{-1} = \frac{\text{Poids grains ou Biomasse (kg)}}{8,96 \text{ m}^2} * 10000 \text{ m}^2$$

### Evaluation de l'effet de l'interaction entre l'inoculation et les distances d'apport de P sur le rendement.

L'effet de l'interaction sur le rendement en grain a été calculé en utilisant la formule de Ouédraogo *et al.* (2007).

$$\Delta Rdt_{IND(i)} = Ai + Bj + Eij \quad (\text{Eq1})$$

Ici  $\Delta Rdt_{IND(i)}$  est l'effet de l'inoculation du sol et des distances entre les points d'application des engrais phosphatés et le collet des plantes sur le rendement ; Ai, est l'effet des distances entre les points d'application des engrais phosphatés et le collet des plantes ; Bj est l'effet de l'inoculation et Eij est l'interaction entre l'inoculation et les différents points d'application.

La contribution des différentes distances entre les points d'application des engrais phosphatés et le collet des plants au rendement en grains (Ai) est calculée comme la différence entre le rendement dans les échantillons des parcelles au point d'apport (i)  $Rdt_{d(i)}$  et dans les parcelles témoin sans apport d'engrais phosphaté (i)  $Rdt_{(0)}$ .  $Ai = Rdt_{Nd(i)} - Rdt_{NN(to)}$  (Eq2)

La contribution de l'inoculation au rendement (Bj) est calculée comme étant la différence entre le rendement dans les parcelles inoculées ( $Rdt_{IN}$ ) et celui des parcelles non inoculées ( $Rdt_{NN}$ )  $Bj = Rdt_{INTo} - Rdt_{NN(to)}$  (Eq 3)

$\Delta Rdt_{IND(i)}$  a été calculé comme étant la différence entre le rendement dans les échantillons des parcelles inoculées ayant reçu l'engrais phosphaté à la distance (i) ( $Rdt_{IND(i)}$ ) et le rendement des parcelles non inoculées et n'ayant pas reçu d'engrais phosphaté ( $Rdt_{NN(to)}$ ).

$$\Delta Rdt_{IND(i)} = Rdt_{IND(i)} - Rdt_{NN(to)} \quad (\text{Eq 4})$$

$$\text{De l'Eq 1 on déduit que } Eij = \Delta Rdt_{IND(i)} - (Ai + Bj) \quad (\text{Eq 5})$$

Ainsi, en remplaçant  $\Delta Rdt_{IND(i)}$ , Ai, Bj, par leurs valeurs respectives des Eq 2, 3 et 4 dans Eq 5, on obtient les effets d'interaction (Eij).

$$Eij = (Rdt_{IND(i)} - Rdt_{NN(i)}) - (Rdt_{INTo} - Rdt_{NN(to)}) \quad (\text{Eq 6})$$

### Évaluation de l'efficacité d'utilisation du P

L'efficacité d'utilisation du P a été déterminée à l'aide des indices référés dans le Tableau 3 suivant les formules de Dobermann (2007). L'efficacité d'utilisation du P a été évaluée à travers des indices agronomiques tels que l'efficacité physiologique du phosphore (PEP), l'efficacité agronomique du P (AEP), l'efficacité interne d'utilisation du P (EIP) et le taux de recouvrement apparent de l'application du P (REP).

### 2.8. Analyses statistiques

Les données collectées ont été soumises à une analyse de variance (ANOVA) avec le logiciel GenStat version 12.1. Une séparation des moyennes a été faite lorsque les différences étaient significatives à l'aide du test de Newman-Keuls ( $p < 0,05$ ).

### 3. RESULTATS

#### 3.1. Effet de l'inoculation, de la source de P, des points d'application sur les paramètres de croissance du mil

Le tableau 4 présente les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) des effets des trois facteurs (Inoculation, Source de P et distance entre les points d'application des engrais phosphatés et le collet des plants) et de leurs interactions sur les paramètres de croissance mesurés en 2022 et 2023. A l'exception du taux de croissance relative du diamètre au collet et celui de la hauteur, les plantes des parcelles inoculées ont enregistré les valeurs moyennes les plus élevées en hauteur et en diamètre au collet ; et ce, quelle que soit l'année de production et la période de mesure.

**Tableau 4.** Variation des paramètres de croissance en fonction des facteurs et de leur interaction

Facteurs	Traitements	Diamètre 1 (mm)		Diamètre 2 (mm)		TCRd (%)		Hauteur 1 (cm)		Hauteur 2 (cm)		TCRh (%)	
		2022	2023	2022	2023	2022	2023	2022	2023	2022	2023	2022	2023
Inoculation	Inoculées	3,42	8,29 <sup>a</sup>	10,44	10,27 <sup>a</sup>	205	30	13,75	64,94 <sup>a</sup>	128,50	212,87 <sup>a</sup>	834	342
	Non inoculées	3,18	6,26 <sup>b</sup>	9,44	7,58 <sup>b</sup>	196	17	11,75	51,10 <sup>b</sup>	118,22	163,45 <sup>b</sup>	906	318
	Probabilité	0,290	0,014	0,574	0,029	0,130	0,206	0,520	0,028	0,831	0,027	0,154	0,758
	Signification	NS	S	NS	S	NS	NS	NS	S	NS	S	NS	NS
Source	CBKCa	3,96	7,49	10,52	9,29	187	25	13,29	60,75	127,99	184,84	863	200
	TSP	3,54	7,06	10,33	8,56	202	22	11,21	55,30	114,73	196,41	923	250
	Probabilité	0,654	0,575	0,737	0,531	0,691	0,779	0,368	0,023	0,321	0,541	0,071	0,252
	Signification	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Points d'apports	d10	3,65	6,46 <sup>b</sup>	10,18	7,70 <sup>b</sup>	195	24	11,52	51,82 <sup>b</sup>	118,27	170,38 <sup>b</sup>	927	229
	d5	3,85	8,09 <sup>a</sup>	10,67	10,14 <sup>a</sup>	194	23	12,98	64,23 <sup>a</sup>	124,44	190,87 <sup>a</sup>	859	221
	Probabilité	0,405	0,019	0,387	0,023	0,928	0,890	0,229	0,047	0,267	0,023	0,987	0,850
	Signification	NS	S	NS	S	NS	NS	S	NS	S	NS	NS	
Interaction	Source*Inoculation	0,680	0,704	0,713	0,809	0,479	0,874	0,490	0,512	0,746	0,641	0,987	0,921
Interaction	Inoculation*Points d'apport	0,414	0,171	0,694	0,370	0,553	0,749	0,168	0,825	0,608	0,876	0,499	0,351

Jours après semis (JAS) ; Diamètre 1 et 2 : diamètre mesuré respectivement à 35 et 98 JAS ; Hauteur 1 et 2 : hauteur mesurée respectivement à 35 et 98 JAS ; TCRd : taux de croissance relative du diamètre au collet et TCRh celui de la hauteur ; NS : non significatif, d0, d5 et d10 correspondent respectivement à la série de distance de 0, 5 et 10 cm entre le point d'apport des engrais phosphaté et le collet de la plante.

Concernant la source de P et la distance entre le point d'apport des différentes sources de P et le collet de la plante, le même constat a été observé avec le CBKCa et le traitement d10 (apport d'engrais phosphaté à 10 cm du collet des plants). En 2022, les résultats d'analyse de variance (ANOVA) ont indiqué qu'aucun facteur n'a eu d'effet significatif au seuil de 5 % sur l'ensemble des paramètres de croissance du mil quelle que soit la période de mesure. En 2023, concernant la source de P, l'analyse de variance n'a relevée aucune différence statistiquement significative entre les traitements quelle que soit la période de mesure. Par contre, pour ce qui est de l'inoculation et de la distance entre le point d'apport des différentes sources de P et le collet de la plante, l'ANOVA a indiqué un effet statistiquement significatif entre les traitements pour chaque période de mesure. En ce qui concerne l'interaction entre les facteurs, indépendamment de l'année de production, l'analyse de variance n'a révélé aucun effet significatif ( $p > 0,05$ ) sur l'ensemble des paramètres de croissance.

**3.2. Effet des facteurs sur les rendements en grain et paille du mil**

Les variations du rendement en fonction de la source de P, de la distance entre le point d'apport des engrais phosphatés et le collet des plantes, de l'inoculation ainsi que de leurs interactions sont consignées dans les tableaux 5 et 7 par année de production.

En 2022, concernant les sources de P, les résultats d'analyses de variance (ANOVA) ont montré qu'il n'existe aucune différence significative ( $p > 0,05$ ) entre les valeurs moyennes des rendements en grains et en pailles (Tableau 5). Lorsqu'on considère la distance entre le point d'apport des engrais phosphatés et le collet des plantes du mil, l'ANOVA n'a relevé aucune différence significative observée entre les valeurs moyennes des rendements en grains et en pailles. Aussi, au niveau de l'inoculation, aucune différence significative n'a été relevée entre les traitements en ce qui concerne le rendement en pailles. Par contre, pour ce qui est du rendement en grains, une différence significative a été observée entre les parcelles inoculées (742,22 kg.ha<sup>-1</sup>) et celles non inoculées (604,04 kg.ha<sup>-1</sup>). Aucun effet d'interaction n'a été observé entre les différents facteurs étudiés.

**Tableau 5.** Variation des rendements en fonction des facteurs en 2022 et 2023

Facteurs	Traitements	Rendement grain (kg.ha <sup>-1</sup> )		Rendement paille (kg.ha <sup>-1</sup> )	
		2022	2023	2022	2023
Source	CBKCa	697,87	1057	1042,63	2204
	TSP	724,99	1091	1163,36	2172
	Probabilité	0,427	0,557	0,167	0,762
	Signification	NS	NS	NS	NS
Inoculation	Inoculées	742,22 <sup>a</sup>	1314 <sup>a</sup>	1184,86	2659 <sup>a</sup>
	Non inoculées	604,64 <sup>b</sup>	834 <sup>b</sup>	1021,13	1718 <sup>b</sup>
	Probabilité	0,018	< 0,001	0,145	< 0,001
	Signification	S	THS	NS	THS
Points d'apports	d10	647,09	-	1048,07	-
	d5	699,78	-	1157,92	-
	Probabilité	0,154	-	0,185	-
	Signification	NS	-	NS	-
Interaction	Source* Inoculation	0,876	0,876	0,112	0,500
	Inoculation*Points d'apports	0,214	-	0,382	-

S : significatif, NS : non significatif, d5 et d10 correspondent respectivement la distance de 5 et 10 cm du collet des plants du mil.

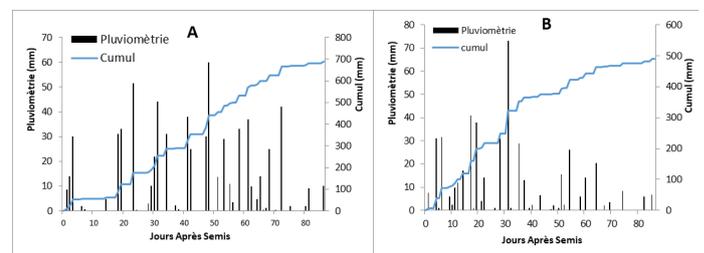
En 2023, les différentes sources de P n'ont pas influencé statistiquement les rendements en grains et en pailles aussi bien pour le rendement en grains que pour celui en pailles (Tableau 5). Quant au facteur inoculation, les parcelles inoculées ont permis d'enregistrer les valeurs de rendement en grain (1314 kg.ha<sup>-1</sup>) et en paille (2659 kg.ha<sup>-1</sup>) les plus élevées comparativement aux parcelles témoins. L'ANOVA a indiqué une différence très hautement significative aussi bien pour le rendement en grains ( $p < 0,001$ ) que pour le rendement en pailles ( $p < 0,001$ ). Par ailleurs, aucun effet d'interaction entre ce facteur et les différentes sources de P n'a été observé. La comparaison des parcelles inoculées et non inoculées a montré que le rendement en grains a varié de 962 kg.ha<sup>-1</sup> (d10) à 1599 kg.ha<sup>-1</sup> (d5) en présence de l'inoculation, et de 705 kg.ha<sup>-1</sup> (d10) à 1029 kg.ha<sup>-1</sup> (d5) en absence de l'inoculation (Tableau 6). Le rendement en grains

le plus élevé a été obtenu sur le traitement d5 en présence de l'inoculation et diffère statistiquement des autres traitements. Il est suivi du traitement d10 en présence de l'inoculation et d5 en absence de l'inoculation. Le traitement d10 en absence de l'inoculation a enregistré la valeur moyenne du rendement en grains la plus faible. Pour ce qui est du rendement en pailles, la comparaison a indiqué qu'indépendamment de l'inoculation, le traitement d5 (2633 kg.ha<sup>-1</sup>) a obtenu la valeur la plus élevée comparativement au traitement d10 (1744 kg.ha<sup>-1</sup>) avec un taux d'accroissement de près de 51 % (Tableau 6). L'ANOVA a montré que les différentes modalités de la distance entre le point d'application des engrais phosphatés et le collet des plantes ont influencé le rendement en paille du mil. L'évaluation de l'interaction entre l'inoculation et les distances entre le point d'apport des engrais phosphatés et le collet des plantes sur le rendement de la culture du mil a montré qu'il y a une interaction positive entre l'inoculation et le traitement d5 et, entre l'inoculation et le traitement d10 (Figure 2). Par ailleurs, cette interaction est plus marquée au niveau du traitement d5 que celui de d10.

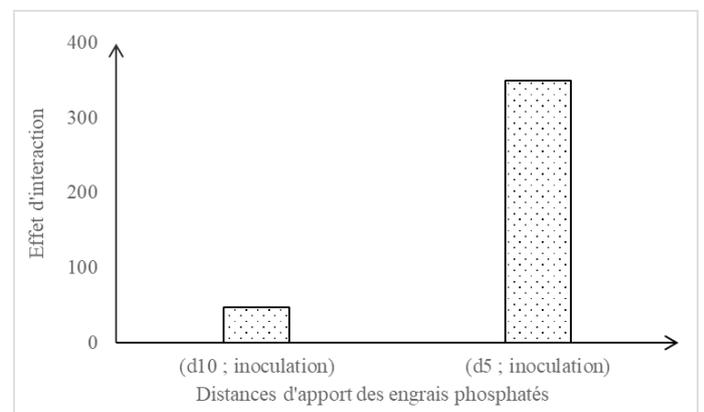
**Tableau 6 :** Rendements en fonction de l'inoculation et de la distance d'application des engrais phosphatés de 2023

Facteurs	Traitements	Rendement grain (kg.ha <sup>-1</sup> )		Rendement paille (kg.ha <sup>-1</sup> )
		Inoculées	Non inoculées	-
Points d'apports	d10	1029 <sup>b</sup>	705 <sup>c</sup>	1744 <sup>b</sup>
	d5	1599 <sup>a</sup>	962 <sup>b</sup>	2633 <sup>a</sup>
	Probabilité	0,014		< 0,001
	Signification	S		THS

S : significatif, THS : très hautement significatif, d5 et d10 correspondent respectivement à la série de distance de 5 et 10 cm entre le point d'apport des engrais phosphatés et le collet de la plante.



**Figure 2.** Caractéristiques pluviométriques des campagnes agricoles 2022 (A) et 2023 (B) de Saria (Burkina Faso)



d5 et d10 correspondent respectivement à la série de distance de 5 et 10 cm entre le point d'apport des engrais phosphatés et le collet de la plante.

**Figure 2.** Interaction entre l'inoculation et les distances entre le point d'apport des engrais phosphatés et le collet de la plante

### 3.3. Effet des facteurs sur l'efficacité d'utilisation du phosphore

Le Tableau 7 présente l'effet des différentes sources de P, de l'inoculation et de la distance entre le point d'apport et le collet des plantes du mil sur l'efficacité d'utilisation du P.

Concernant les différentes sources de P, à l'exception de l'efficacité physiologique (PEP), l'engrais de type TSP a enregistré les valeurs moyennes les plus élevées. Les résultats d'ANOVA ont montré qu'il n'existe aucune différence significative ( $p > 0,05$ ) entre les valeurs moyennes pour l'ensemble des indices.

Pour ce qui est de l'inoculation, les comparaisons faites entre les parcelles non inoculées et les celles inoculées ont permis d'obtenir une meilleure AEP, EIP et REP avec des taux d'accroissements de 52,73 %, de 22,75 % et de 98,52 % respectivement. Pour l'ensemble des paramètres d'efficacité, l'analyse de variance a indiqué une différence statistiquement significative au seuil de probabilité de 5 % excepté la PEP. Lorsqu'on considère les différentes distances entre le point d'application des diverses sources de P et le collet de la plante pour l'ensemble des paramètres d'efficacité d'utilisation du P, aucune différence statistiquement significative n'a été révélée. Aussi, pour l'ensemble des facteurs, aucun effet d'interaction n'a été observé.

**Tableau 7** Variation de l'efficacité d'utilisation du P en fonction des facteurs

Facteurs	Traitements	AEP	EIP	PEP	REP
		Kg.kg <sup>-1</sup>	Kg.kg <sup>-1</sup>	Kg.kg <sup>-1</sup>	Kg.kg <sup>-1</sup>
Source	CBKCa	12,97	27,04	1,11	17,41
	TSP	15,69	31,52	1,07	22,52
	Probabilité	0,271	0,07	0,826	0,555
	Signification	NS	NS	NS	NS
Inoculation	Inoculées	17,32 <sup>a</sup>	32,27 <sup>a</sup>	0,77	26,80 <sup>a</sup>
	Non inoculées	11,34 <sup>b</sup>	26,29 <sup>b</sup>	1,05	13,52 <sup>b</sup>
	Probabilité	0,018	0,018	0,417	0,046
	Signification	S	S	NS	S
Points d'apports	d10	13,19	28,13	1,14	17,16
	d0	15,48	30,43	1,05	22,76
	Probabilité	0,154	0,154	0,212	0,202
	Signification	NS	NS	NS	NS
Interaction	Source*Inoculation	0,876	0,876	0,853	0,781
Interaction	Points d'apports*Inoculation	0,634	0,634	0,468	0,364

S : significatif, NS : non significatif, THS : très hautement significatif, d5 et d10 correspondent respectivement à la série de distance de 5 et 10 cm entre le point d'apport des engrais phosphatés et le collet de la plante. PEP : l'efficacité physiologique, AEP : l'efficacité agronomique, EIP : efficacité interne d'utilisation du P et REP : taux de recouvrement apparent de l'application du P.

## 4. DISCUSSION

L'inoculation et la distance d'apport de P, n'ont pas montré d'effet sur le diamètre et la hauteur du mil en 2022. Cela pourrait s'expliquer par le fait que le sol utilisé, en jachère depuis 2018, était suffisamment fourni en éléments nutritifs facilement accessibles aux racines des plantes qui assurent convenablement la nutrition des cultures. Cette situation pourrait justifier ainsi l'inefficacité de l'inoculation mycorhizienne sur la croissance en hauteur et le diamètre au collet du mil en 2022. Ces résultats sont similaires à

ceux de Haro *et al.* (2016). Ces auteurs ont montré que la plante ne trouvera pas de nécessité d'établir la symbiose avec les mycorhizes si les éléments nutritifs sont disponibles dans le milieu et directement accessibles aux racines de la plante. Également, Bender *et al.* (2019), ont indiqué que la disponibilité du phosphore a tendance à être associée négativement au succès de l'inoculation. Par contre, en 2023, l'inoculation et la distance d'apport de P ont eu un effet significatif sur la hauteur et le diamètre au collet des plantes. Ceci s'expliquerait par une diminution de la teneur du sol en éléments nutritifs facilement accessibles aux racines des plantes du mil. Ainsi, les racines se trouvant dans l'incapacité d'assurer convenablement la nutrition minérale des plants, établissent la symbiose avec les mycorhizes afin d'assurer une nutrition convenable des plants du mil, d'où l'influence de l'inoculation observée. Ces résultats confirment l'idée selon laquelle la réponse des cultures à l'inoculation est tributaire du niveau de phosphore assimilable du sol (Oehl *et al.*, 2017). Ces observations sont en accord avec ceux trouvés par Haro *et al.*, (2017). Ces auteurs ont montré que l'inoculation mycorhizienne stimule la croissance du sorgho (*Sorghum bicolor* L. Moench) et du niébé (*Vigna unguiculata* (L.) Walp).

Les résultats obtenus sur les valeurs moyennes des rendements en grain et en paille en 2022 et 2023 ont montré que l'engrais phosphaté de type CBKCa a enregistré des performances comparables à celles du TSP. Ces observations pourraient s'expliquer par le fait que la technique de solubilisation a permis au Burkina Phosphate de mettre à la disposition des racines des plants de mil du P pour assurer leurs bonnes nutritives. Au Burkina Faso, Nignan *et al.* (2023) ont indiqué qu'au regard des performances similaires du point de vue statistique du CBKCa et du TSP, le CBKCa pourrait constituer une alternative aux engrais chimiques face au problème de carence des sols en P de la zone tropicale d'Afrique de l'Ouest marqué par une abondance d'oxyde et hydroxyde de fer et d'aluminium. En 2022, ni l'inoculation ni le point d'apport des engrais phosphatés n'ont été efficaces sur les valeurs moyennes des rendements en grains et en pailles. Ce résultat pourrait être dû à l'antécédent de la parcelle mise en culture, une jachère de quatre ans. Le sol serait alors suffisamment fourni en éléments nutritifs, au point de disponibiliser quantitativement du P auprès des racines pour assurer une bonne productivité du mil. En 2023, une interaction positive a été observée entre les parcelles inoculées et l'apport des engrais à 5 cm du collet des plants, et entre ces parcelles et le traitement d10. Cependant, cet effet d'interaction est plus marqué au niveau du traitement d5. Ce résultat montre clairement que l'efficacité d'utilisation du P par les cultures est non seulement liée à la présence de l'inoculation, mais également à l'écart entre le point d'application des engrais phosphatés et le collet de la plante de mil. Au Burkina Faso, Haro *et al.* (2020) ont montré que la présence d'inoculum, surtout en situation de déficience en P, une association symbiotique est mise en place afin d'assurer la mise à disposition des racines le P nécessaire pour une meilleure productivité des cultures.

Concernant la source de P, aucune différence significative

n'a été observée entre les traitements. Ainsi, le CBKCa, engrais phosphatés localement produit, a présenté des efficacités similaires statistiquement à celles du TSP. Le même constat a été observé avec les différents écarts du point d'apport des engrais phosphatés, avec le traitement d5 ayant enregistré les valeurs les plus élevées. Quant à l'inoculation, excepté le PEP, un effet significatif des plantes inoculées a été noté comparativement aux plantes non inoculées. Ces résultats impliquent que l'inoculation contribue fortement à l'amélioration de l'efficacité d'utilisation du P par les cultures et la productivité du mil dans les agro-écosystèmes de la zone semi-aride où la carence en P des sols est un facteur limitant. En plus en 2023, les résultats ont montré que l'apport des engrais phosphatés à 5 cm du collet de la plantes en présence de l'inoculum permet d'améliorer le rendement en grain du mil. Ainsi, au regard de la faible disponibilité du P assimilable, trouver des systèmes à même d'accroître l'efficacité d'utilisation du P des engrais phosphatés apportés est d'une importance capitale. Ces résultats corroborent ceux de Pairunan *et al.* (1980) qui ont montré que les plantes colonisées par des mycorhizes augmentent l'efficacité des engrais phosphatés de 30 % par rapport aux plantes non mycorhizées.

## 5. CONCLUSION

L'objectif de l'étude était d'évaluer la réponse du mil à l'inoculation mycorhizienne avec une souche indigène du Burkina Faso suite à une application de deux types d'engrais phosphatés à différents écarts du collet des plantes. De ces résultats, il ressort de façon générale qu'indépendamment de la source de P, l'apport des engrais phosphatés à 5 cm du collet des plantes du mil (d5) est la meilleure stratégie de gestion du P du sol. Une interaction positive importante de cette stratégie d'apport des engrais phosphatés avec les mycorhizes a été observée. En effet, avec d5, une augmentation de rendement en grains du mil de 79,84 % a été observée par rapport au témoin en situation d'inoculation. Il ressort également que les parcelles inoculées permettent une utilisation efficace du P par rapport au témoin non inoculées. Dans les agro-écosystèmes caractérisés par une déficience en P, l'inoculation mycorhizienne combinée à un apport d'engrais phosphaté à 5 cm du collet des plantes permettra d'améliorer l'utilisation du P par le mil. Cela permettra de réduire les risques de pollution liée à l'apport des engrais phosphatés. Ainsi, le CBKCa apporté à 5 cm du collet des cultures en présence d'inoculum peut être promu en remplacement du TSP comme stratégie de gestion de la fertilisation phosphatée et d'intensification agricole. Des recherches complémentaires sur les impacts de la teneur des sols en phosphore et du type de sols sur les performances des inoculant mycorhizien pourraient permettre de mieux comprendre les interactions entre les microorganismes et la composante sol-plante.

## RÉFÉRENCES

Bender S.F., Schlaeppi K., Held A., and Van Der Heijden M.G.A. (2019). Establishment success and crop growth effects of an arbuscular mycorrhizal fungus inoculated into Swiss corn fields. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 273, 13-24. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.12.003>

Dikir W., and Abayechaw D. (2022). Effects of Phosphorus Fertilizer on Agronomic, Grain Yield and Other Physiological Traits of Some Selected Legume Crops. *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare*. <https://doi.org/10.7176/JBAH/12-12-01>

Djatta M., Laminou Manzo O., Macoumba Diouf P. and Diop T. (2014). Effets de l'inoculation mycorhizienne sur le sesame (*Sesamum indicum* L.) en conditions naturelles. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 7(5), 2050. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v7i5.22>

Dobermann A. (2007). *Nutrient use efficiency—Measurement and management*.

Bender S.F., Schlaeppi K., Held A., and Van Der Heijden M.G.A. (2019). Establishment success and crop growth effects of an arbuscular mycorrhizal fungus inoculated into Swiss corn fields. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 273, 13-24. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.12.003>

Dikir W., and Abayechaw D. (2022). Effects of Phosphorus Fertilizer on Agronomic, Grain Yield and Other Physiological Traits of Some Selected Legume Crops. *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare*. <https://doi.org/10.7176/JBAH/12-12-01>

Djatta M., Laminou Manzo O., Macoumba Diouf P. and Diop T. (2014). Effets de l'inoculation mycorhizienne sur le sesame (*Sesamum indicum* L.) en conditions naturelles. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 7(5), 2050. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v7i5.22>

Dobermann A. (2007). *Nutrient use efficiency—Measurement and management*.

Garg, P., & Welch, L. F. (1967). *GI rowth and Phosphorus Uptake by Corn as Influenced by Phosphorus Placement*. 3.

George T.S., Hinsinger P. and Turner B.L. (2016). Phosphorus in soils and plants – facing phosphorus scarcity. *Plant and Soil*, 401(1-2), 1-6. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-2846-9>

Haefele S.M., Nelson A. and Hijmans R.J. (2014). Soil quality and constraints in global rice production. *Geoderma*, 235-236, 250-259. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.07.019>

Reijnders, L. (2014). Phosphorus resources, their depletion and conservation, a review. *Resources, Conservation and Recycling*, 93, 32-49. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.09.006>

Haro H., Kadidia S.B., Fanta B. and Barkissa F. (2017). Effect of native arbuscular mycorrhiza fungi inocula on the growth of Cowpea [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.] in three different agro ecological zones in Burkina Faso. *Journal of Applied Biosciences*, 108(1), 10553. <https://doi.org/10.4314/jab.v108i1.8>

Haro H., Sanon K.B., Le Roux C., Duponnois R. and Traoré A.S. (2017). Improvement of cowpea productivity by rhizobial and mycorrhizal inoculation in Burkina Faso. *Symbiosis*, 74(2), 107-120. <https://doi.org/10.1007/s13199-017-0478-3>

- Haro H., Sanon K., Diop I., Kane A., Dianda M., Houngnandan P., Neyra M. et Traore A. (2013). Réponse à l'inoculation mycorhizienne de quatre variétés de niébé [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.] cultivées au Burkina Faso et au Sénégal. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 6(5), 2097-2112. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v6i5.18>
- Haro H., Sanon K., Krasova-Wade T., Kane A., N'Doye I. and Traore, A. (2015). Réponse à la double inoculation mycorhizienne et rhizobienne du niébé (variété, K VX396-4-5-2D) cultivé au Burkina Faso. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 9(3), 1485. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v9i3.31>
- Haro H., Semde K., Bahadio K. et Sanon K.B. (2020). Effet de l'inoculation mycorhizienne avec des souches des champignons mycorhiziens arbusculaires sur la croissance de *Mucuna pruriens* (L.) DC en condition contrôlée. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 14(3), 1065-1073. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v14i3.32>
- Holford I.C.R. (1997). Soil phosphorus : Its measurement, and its uptake by plants. *Soil Research*, 35(2), 227. <https://doi.org/10.1071/S96047>
- IUSS Working Group WRB. (2014). *World reference base for soil resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. FAO.
- Khaliq A., Perveen S., Alamer K.H., Zia Ul Haq M., Rafique Z., Alsudays I.M., Althobaiti A.T., Saleh M.A., Hussain S. and Attia H. (2022). Arbuscular Mycorrhizal Fungi Symbiosis to Enhance Plant–Soil Interaction. *Sustainability*, 14(13), 7840. <https://doi.org/10.3390/su14137840>
- Mallarino R., Henegar C., Mirasierra M., Manceau M., Schradin C., Vallejo M., Beronja S., Barsh G.S. and Hoekstra H.E. (2016). Developmental mechanisms of stripe patterns in rodents. *Nature*, 539(7630), 518-523. <https://doi.org/10.1038/nature20109>
- Nadeem F., Nawaz A. and Farooq, M. (2019). Crop Rotations, Fallowing, and Associated Environmental Benefits. In F. *Oxford Research Encyclopedia of Environmental Science*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780199389414.013.197>
- Nakamura S., Kanda T., Imai T., Sawadogo J. and Nagumo F. (2019). Solubility and application effects of African low-grade phosphate rock calcinated with potassium carbonate. *Soil Science and Plant Nutrition*, 65(3), 267-273. <https://doi.org/10.1080/00380768.2019.1598236>
- Nignan I., Ouedraogo J., Nakamura S., Serme I., et Coulibaly K. 2023. Effets du mode d'application d'engrais phosphatés (CBKCa et TSP) sur la productivité du mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br) au centre ouest du Burkina Faso. 17(6) : 2312-2324. DOI : <https://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v17i6.14>
- Oehl B., Schaffer L. M. and Bernauer T. (2017). How to measure public demand for policies when there is no appropriate survey data? *Journal of Public Policy*, 37(2), 173-204. <https://doi.org/10.1017/S0143814X16000155>
- Ouédraogo E., Brussaard L. and Stroosnijder L. (2007). Soil fauna and organic amendment interactions affect soil carbon and crop performance in semi-arid West Africa. *Biology and Fertility of Soils*, 44(2), 343-351. <https://doi.org/10.1007/s00374-007-0211-0>
- Pairunan A.K., Robson A.D. and Abbott L.K. (1980). The effectiveness of vesicular-arbuscular mycorrhizas in increasing growth and phosphorus uptake of subterranean clover from phosphorus sources of different solubilities. *New Phytologist*, 84(2), 327-338. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1980.tb04433.x>
- Reijnders, L. (2014). Phosphorus resources, their depletion and conservation, a review. *Resources, Conservation and Recycling*, 93, 32-49. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.09.006>
- ZOUNGRANA A., ZI Y., SANOU A.K., et SAVADOGO W.P. (2022). Comparaison de l'effet de deux champignons mycorhiziens arbusculaires sur la croissance et la productivité du sésame (*Sesamum indicum* L.) au Burkina Faso. <http://indexmedicus.afro.who.int/> Int. J. Biol. Chem. Sci. 16(1): 201-212. DOI : <https://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v16i1.17>
- Syers K., Bekunda M., Cordell D., Corman J., Johnson J., Rosemarin A. and Salcedo, I. (2011). *Phosphorus and food production*. UNEP year book.