



Effet de l'association du Burkina phosphate et de champignons mycorhiziens arbusculaires sur la mycorhization, la croissance et la nutrition du sorgho (*Sorghum bicolor* L.) en serre

BLAGNA Fanta^{1,2*}, SANON B. Kadidia^{2,†}, FOFANA Barkissa^{1,2}, COMPAORE Emmanuel³, OUATTARA S. Aboubakar¹, TRAORE S. Alfred¹.

¹ Université Joseph KI-ZERBO BP : 7021 Ouagadougou 03, Burkina Faso.

² Département Environnement et Forêt, INERA BP : 7047 Ouagadougou 03, Burkina Faso.

³ Département Gestion des Ressources Naturelles et Systèmes de Production, INERA, BP : 7047 Ouagadougou 03, Burkina Faso.

* Auteur correspondant ; E-mail : fantablagna@gmail.com, Tél : (+226) 74860016

Submitted on 21st July 2022. Published online at www.m.elewa.org/journals/ on 30th September 2022
<https://doi.org/10.35759/JABs.177.9>

RÉSUMÉ

Objectif : Évaluer l'effet de l'association Burkina phosphate - champignons mycorhiziens arbusculaires sur la mycorhization, la croissance et la nutrition du sorgho.

Méthodologie et résultats : Une expérimentation a été réalisée en serre avec deux CMA, *Glomus aggregatum* (Ga) et *Rhizophagus irregularis* (Ri) croisés avec trois doses de BP, 0, 50 et 75 mg/kg de substrat dans un dispositif factoriel à deux niveaux. La mycorhization, la croissance et la nutrition des plantes ont été mesurés à 2 et 4 mois après le semis. Les résultats ont montré que la fréquence de mycorhization des plantes inoculées avec Ga augmente avec les doses de BP. Par contre le taux de mycorhization était optimum avec Ri, à la dose 50 mg BP/kg. L'association BP-CMA Ri a induit une augmentation significative de la biomasse végétale par rapport au témoin quel que soit la dose de BP, tandis que l'association BP-CMA Ga n'a entraîné une augmentation significative de la biomasse qu'avec la dose 75 mg BP/kg.

Conclusion et application des résultats : L'association BP-CMA a amélioré la mycorhization et la croissance du sorgho kapelga. L'inoculum Ri a été plus efficace avec la dose optimum de 50 mg/kg de BP. L'inoculum Ga a nécessité des doses plus élevées avec un seuil de 75 mg/kg de BP. Ainsi, l'association BP-CMA rend plus efficace l'utilisation du BP en application direct. Cette technique constitue une voie d'utilisation du Burkina phosphate. Cette biotechnologie pratiquée à grande échelle permettra d'augmenter les rendements des cultures. Cependant ce travail doit se poursuivre en milieu réel pour vérifier l'efficacité de la technique au champ.

Mots clés : Burkina phosphate, champignons mycorhiziens arbusculaires, mycorhization, croissance des plants, sorgho.

Effect of combination of Burkina phosphate and arbuscular mycorrhizal fungi on mycorrhization, growth and nutrition of sorghum (*Sorghum bicolor* L.) in a greenhouse experiment

ABSTRACT

Objective: To evaluate Burkina phosphate - arbuscular mycorrhizal fungi (AMFs) combination effect on mycorrhization, sorghum plant growth and nutrition.

Methodology and results: An experiment was carried out in a greenhouse with two AMFs, *Glomus aggregatum* (Ga) and *Rhizophagus irregularis* (Ri) crossed with three doses of BP, 0, 50 and 75 mg/kg of substrate in a two-level factorial device. Mycorrhization, plant growth and nutrition were measured 2 and 4 months after sowing. The results showed that the frequency of mycorrhization of plants inoculated with Ga increases with the rates of BP. On the other hand, the rate of mycorrhization was optimum with Ri, at 50 mg BP/kg. The BP-AMF Ri association induced a significant increase in plant biomass compared to the control regardless of the dose of BP, while the BP-AMF Ga association only caused a significant increase in biomass with the rate 75 mg BP/kg.

Conclusion and application of results: The BP-AMF combination improved mycorrhization and growth of kapelga sorghum. The Ri inoculum was most effective with the optimum dose of 50 mg/kg BP. Ga inoculum required higher doses with a threshold of 75 mg/kg BP. Thus, the combination of BP and AMF makes the use of BP in direct application more effective. This technique constitutes a way of using Burkina phosphate. This biotechnology practiced on a large scale will increase crop yields. However, this work must be continued in a real environment to verify the effectiveness of the technique in the field.

Key words: Burkina phosphate, arbuscular mycorrhizal fungi, *mycorrhization*, *plants growth*, sorghum.

INTRODUCTION

En Afrique de l'Ouest et en particulier au Burkina Faso, la disponibilité du phosphore (P) du sol assimilable par les plantes est l'un des plus grands facteurs limitants de la production agricole (Compaoré *et al.*, 2003). Mais il est possible d'augmenter le niveau de P disponible du sol en ajoutant des engrais phosphatés soluble eau, des phosphates naturels (PN) ou des fumiers (Fardeau et Frossard, 1991 ; Compaoré *et al.*, 2001). A cause des coûts élevés des engrais minéraux importés, leurs non disponibilité et aux difficultés d'accès aux crédits des agriculteurs burkinabè, il existe un intérêt croissant pour l'utilisation d'engrais phosphatés alternatifs moins chers tels que les PN. Ces PN peuvent être utilisé soit en application directe, soit après une acidulation partielle. Le Burkina Faso, comme plusieurs pays d'Afrique de l'Ouest, dispose

d'importants gisements de Phosphate naturel situé à Kodjari à l'est du pays. L'utilisation de ce phosphate peut améliorer le statut phosphaté des sols à faible coût si le phosphate naturel ajouté est capable de se dissoudre dans le sol et d'être utilisé efficacement par les cultures. Le phosphate naturel de Kodjari communément appelé Burkina phosphate (BP), est généralement considéré comme une roche à faible réactivité chimique, de sorte que ses caractéristiques de libération très lente la rendent peu adaptée à une application directe (Compaoré *et al.*, 1997 ; Nakamura *et al.*, 2013). Par ailleurs, certains microorganismes du sol sont reconnus être très efficaces dans la solubilisation des phosphates insolubles dans le sol et pourraient offrir d'énormes opportunités pour améliorer la solubilité des PN (Park *et al.*, 2010). Ainsi, des travaux

antérieurs ont mis en évidence le rôle des microorganismes dans la mobilisation du P des PN au bénéfice de la plante hôte (Richardson, 2001 ; Babana, 2003 ; Dieme *et al.*, 2008 ; Taktek, 2015). Parmi ces microorganismes, les champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA) jouent un rôle essentiel dans la mise à disposition du P pour les plantes et l'amélioration de leur nutrition phosphatée. Par conséquent, les microorganismes ont été largement utilisés comme inoculants pour augmenter le rendement des cultures en solubilisant le phosphore insoluble dans les sols (Babana, 2003 ; Taktek, 2015). Le sorgho est une plante mycotrophe qui peut vivre en symbiose avec les champignons mycorhiziens

arbusculaires. C'est l'une des cultures les plus répandue au Burkina Faso. Malgré son importance avérée, les rendements restent faibles. L'inoculation du sorgho par des champignons mycorhiziens arbusculaires peut permettre la valorisation des phosphates peu solubles et accroître ainsi les rendements de cette culture. Cependant, peu de travaux ont fait l'objet de l'évaluation de l'effet de l'inoculation des PN avec des champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA) aux cultures céréalières au Burkina Faso. Ainsi, l'objectif de la présente étude est d'évaluer l'effet du Burkina phosphate associé aux CMA sur la mycorhization, la croissance et la nutrition du sorgho.

MATERIEL ET METHODES

Site d'étude : Les travaux ont été menés en serre au Département Environnement et Forêts (DEF) du Centre national de la recherche scientifique et technologique (CNRST) situé au cœur de la ville de Ouagadougou / Burkina Faso. Les coordonnées géographiques sont 12°22,801' N et 01°30,295' O. Ouagadougou appartient à la zone phytogéographique nord-soudanien. Il y règne sur ce site un microclimat particulier induit par une végétation abondante qui est une relique de la Forêt Classée du barrage de Ouagadougou.

Matériel biologique : Le matériel végétal utilisé est une variété de sorgho de couleur blanche avec un cycle de 120 jours. Cette variété est dénommée « Kapelga » en langue locale Mooré. Les semences ont été fournies par le Département Productions Végétales de l'Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles (INERA). Le matériel fongique est constitué de deux (2) souches de champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA), à savoir *Glomus aggregatum* (*G. aggregatum*) et *Rhizophagus irregularis* (*R. irregularis*) fournis par le Laboratoire Commun de Microbiologie (LCM) de Dakar / Sénégal.

Substrat de culture : Le substrat utilisé est un mélange de sable et de sol prélevé dans une

jachère à Gampéla (environ 15 km à l'Est de Ouagadougou) avec les proportions (2/3 de sable pour 1/3 de sol). Ce mélange a été stérilisé à l'autoclave à 121 °C pendant 1 h. Les caractéristiques chimiques du mélange stérilisé sont les suivants : pH_{eau} (6,85), pH_{KCl} (5,77), C (0,39%), OM (0,67%), N (0,034%), C/N (12), P_{total} (50 mg/kg), P_{assimilable} (1,57 mg/kg), K_{total} (652 mg/kg), K_{disponible} (37,75 mg/kg).

Fertilisant : Le phosphate naturel de Kodjari communément appelé Burkina phosphate (BP) a été utilisé à trois doses (0, 50 et 75 mg BP/kg de substrat). Les caractéristiques chimiques du Burkina phosphate sont les suivantes : P_{total} : 11,2% ; CO₃/PO₄ : 23% ; CaO : 33% ; SiO₂ : 27% ; Al₂O₃ : 3,2% ; Fe₂O₃ : 3,7 ; MgO : 0,18% ; solubilité dans l'eau : 0,03%, solubilité dans le citrate : 0,8% (Compaoré *et al.*, 1997).

Mise en place de l'essai : L'expérience a été conduite en serre selon un dispositif expérimental à deux facteurs. Le premier facteur est représenté par l'inoculation avec 3 niveaux de variation qui sont :

- I₀ : témoin sans inoculum ;
- Ri : inoculé avec 10 g de *R. irregularis* par pot ;
- Ga : inoculé avec 10 g de *G. aggregatum* par pot.

Le deuxième facteur est la fertilisation avec le BP à 3 niveaux de variation qui sont :

- BP0 : pas de fertilisation ;
- BP50 : fertilisé avec 50 mg BP/kg de substrat ;
- BP75: fertilisé avec 75 mg BP/kg de substrat ;

Le croisement des deux facteurs donne un total de neuf (09) traitements. Les traitements sont organisés en bloc complet randomisé répété 10 fois. Pour la culture, des pots de 2 litres ont été utilisés dans lesquels ont été introduit 2 kg de substrat stérilisé. Au substrat, il a été ajouté ou non, 100 ou 150 mg de BP par pot à une profondeur d'environ 5 cm. Chaque pot a été inoculé ou non avec 10 g de CMA (*R. irregularis* ou *G. aggregatum*) à cette même profondeur. Les graines de sorgho ont été aseptisées avec de l'alcool (90°) pendant 3 min et rincées (2 à 3 fois à l'eau distillée), puis à l'eau de javel diluée pendant 3 min. Après un rinçage abondant (3 à 5 fois), les graines ont été directement semées en raison de 5 graines par pot. Dix (10) jours après la levée, les plantules ont subi un démariage afin de ne garder qu'un seul plant/pot. Les pots ont été disposés sur des châssis métalliques en serre et l'expérimentation a été conduite pendant 2 mois pour la moitié des plants et 4 mois pour l'autre moitié. Les plants ont été arrosés tous les jours afin de maintenir l'humidité du sol entre 60 et 70% de la capacité au champ.

RESULTATS

Résultat de l'analyse de variance des différentes variables : Les résultats de l'inoculation montrent des différences très hautement significatives entre les traitements pour toutes les variables ($p < 0,001$). Pour le facteur fertilisation, l'analyse révèle des différences significatives pour les variables biomasse racinaire ($p = 0,029$) à 4 mois et très hautement significative pour la fréquence de mycorhization à 2 mois ($p = 0,003$) et non

Évaluation des différents paramètres :

L'évaluation a concerné les paramètres de mycorhization, de croissance et de nutrition. Pour la croissance, la hauteur des plants a été mesurée le 30^{ème} jour après le semis. Après la première mesure, les autres mesures ont été effectués tous les 15 jours jusqu'au 120^{ème} jour après semis. Les biomasses racinaires et aériennes ont été évaluées à 2 et 4 mois après semis. A cet effet, les racines et les parties aériennes ont été récoltées séparément, séchées à l'étuve à 60°C pendant 72 heures puis pesées. Les teneurs en azote (N) et en phosphore (P) ont été déterminées par les méthodes d'analyse de routine après minéralisation des parties aériennes du sorgho récolté après 4 mois de culture. La mycorhization a été mise en évidence 2 et 4 mois après le semis sur des racines fines prélevées et colorées selon la méthode de Phillips et Hayman (1970) suivie de leur observation au microscope au grossissement G X 100. La fréquence et l'intensité de mycorhization ont été estimées en utilisant la méthode de Trouvelot *et al.* (1986).

Traitement de données : Les données collectées ont été analysées statistiquement par le logiciel GenStat version 12.1. Des analyses de variance (ANOVA) ont été effectuées et les moyennes ont été comparées en utilisant le test de Newman-Keuls au seuil de 5%.

significatif pour les autres variables. L'interaction BP*Inoculation a été très hautement significatif sur la fréquence à 2 mois ($p = 0,002$) et la teneur en azote totale ($P = 0,009$) ; significatif sur les biomasses racinaires ($p = 0,036$) et aérienne ($p = 0,016$) à 2 mois après semis et non significatif pour les autres variables. Le tableau 1 présente les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) effectuée sur les différentes variables étudiées.

Tableau 1 : Résultats de l'analyse de variance des facteurs inoculation et fertilisation et de leur interaction sur les paramètres mesurés

Variables Facteurs	F2 (%)	F4 (%)	I2 (%)	I4 (%)	H2 (cm)	H4 (cm)	BR2 (g)	BR4 (g)	BA2 (g)	BA4 (g)	Pt (mg/ kg)	Nt (%)
Inoculation	<0.001***	<0.001***	<0.001***	<0.001***	0.003***	<0.001***	<0.001***	<0.001***	<0.001***	<0.001***	0.005***	<0.001***
BP	0.003***	0.288 NS	0.084 NS	0.489 NS	0.576 NS	0.466 NS	0.597 NS	0.029 *	0.075 NS	0.628 NS	0.341 NS	0.187 NS
Inoculation*BP	0.002***	0.608 NS	0.054 NS	0.251 NS	0.108 NS	0.945 NS	0.036 *	0.116 NS	0.016 *	0.459 NS	0.07 NS	0.009***

*** Très hautement significatif ; * Significatif ; NS : non significatif.

BP : Burkina phosphate, F2 : fréquence de mycorhization à 2 mois; F4 : fréquence de mycorhization à 4 mois; I2 : intensité de mycorhization à 2 mois; I4 : intensité de mycorhization à 4 mois; H2 : hauteur des plants à 2 mois; H4 : hauteur des plants à 4 mois; BR2 : Biomasse racinaire à 2 mois ; BR4 : Biomasse racinaire à 4 mois ; BA2 : Biomasse aérienne à 2 mois ; BA4 : Biomasse aérienne à 4 mois ; Pt : Teneur en phosphore total ; Nt : Teneur en azote total.

Effet de la combinaison BP-inoculation sur la mycorhization :

Les observations microscopiques des racines colorées ont montré que le sorgho kapelga a été colonisé par les deux CMA inoculés. Cependant, aucune mycorhization n'a été observé chez les plants non inoculés (Figure 1). Les taux de mycorhization à 2 et 4 mois après semis sont représentés par la figure 2 (A, B, C et D). En comparant les taux de mycorhization (fréquence et intensité) des deux inocula 2 mois après semis (figure 2 A et B), on constate que l'inoculum Ri a les taux de mycorhization les plus élevés atteignant 92% en fréquence et 35.2% en intensité. Les plants inoculés avec Ga possèdent les plus faibles taux de mycorhization. Pour la variable fréquence (2 mois), la séparation des moyennes au seuil de

5% montre trois groupes (a, b et c). Les plants inoculés avec Ri présente un groupe homogène quel que soit la dose de BP, alors que les plants inoculés avec Ga sont formés par trois groupes avec une augmentation suivant la dose de BP. On note aussi que le taux de mycorhization optimum (fréquence et intensité) avec l'inoculum Ri est atteint avec la dose 50 mg de BP et chute lorsque la dose atteint 75 mg de BP. Contrairement à Ri, le taux de mycorhization avec l'inoculum Ga évolue avec la dose. Les taux de mycorhization des plants inoculés avec Ga ne sont comparables à ceux de Ri qu'en présence de la dose 75 mg de BP. Quatre mois après le semis, le taux de mycorhization des différents traitements n'ont pas montré de différence significative entre eux (figure 2 C et D).

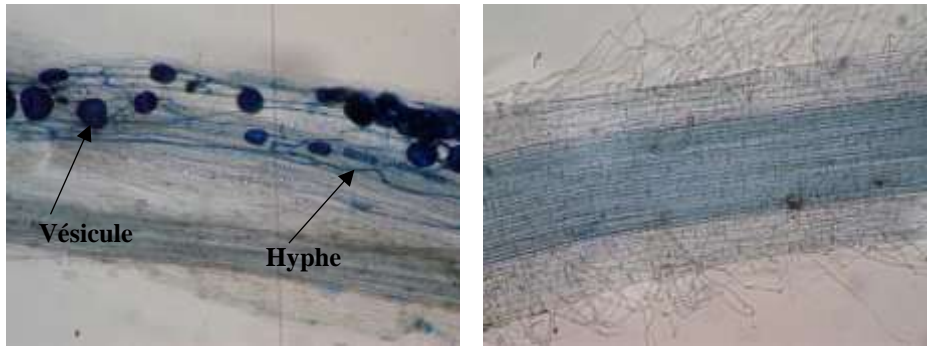


Photo F. BLAGNA

Photo F. BLAGNA

Figure 1 : photos de racines de sorgho mycorhizée présentant des vésicules et des hyphes (gauche) et non mycorhizée (droite) (observées au microscope (G X 100).

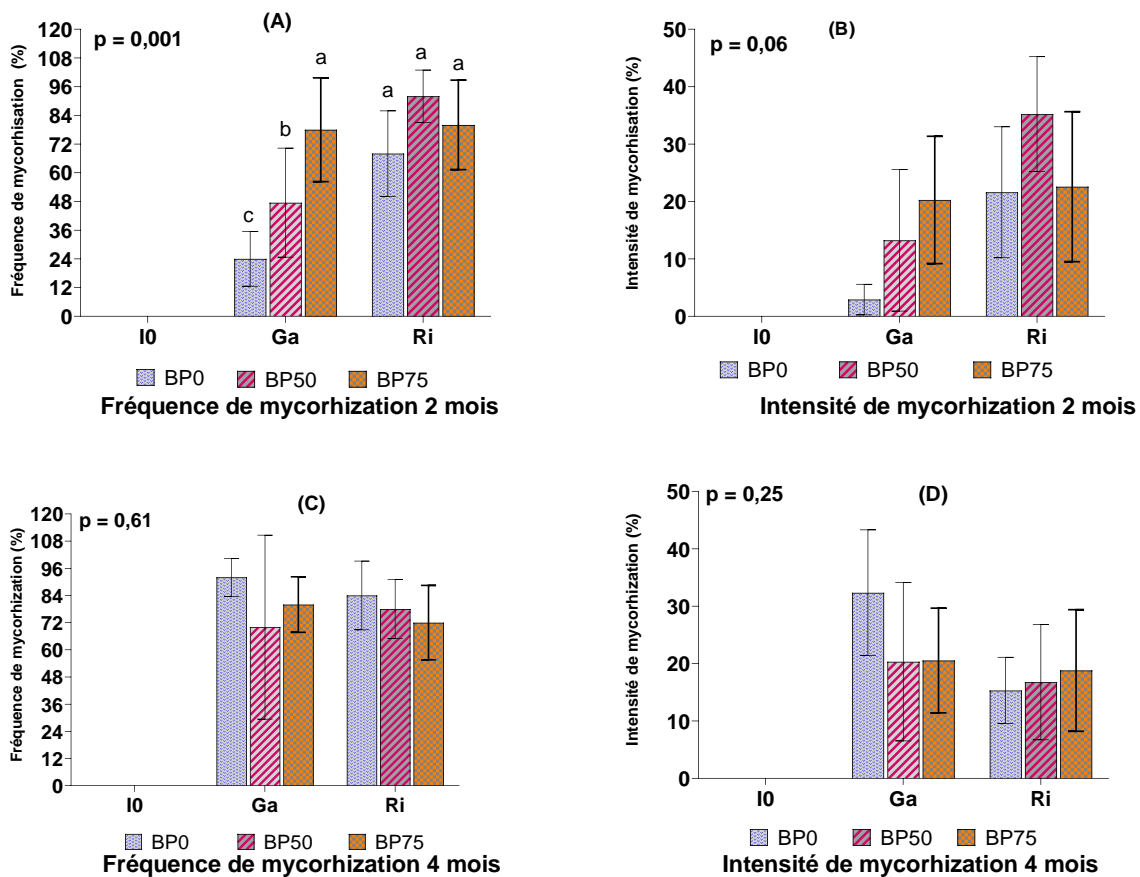


Figure 2 : Fréquences et intensité de mycorhization du sorgho à 2 et 4 mois après semis
Les moyennes suivies par la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de probabilité de 5%.

Effet de la combinaison BP-inoculation sur la croissance des plants : Les résultats n'ont pas montré de différence significative entre les traitements concernant la hauteur des plants respectivement à 2 mois et à 4 mois après semis. Cependant, on note que les deux inocula réagissent différemment aux doses du BP. En effet, la vitesse de croissance des plants inoculés avec Ga augmente avec la dose et atteint une hauteur maximale moyenne de 5,20 cm à la dose 75 mg de BP/kg de substrat

(Figure 3A). A l'inverse, la vitesse de croissance des plants inoculés avec Ri diminue avec la dose. Les hauteurs maximales 5,57 cm (Figure 3A) et 9,73 cm (Figure 3B) sont obtenues avec les plants sans apport de BP (BP0). Ces hauteurs ont diminué respectivement de - 0,55 cm et - 0,19 cm avec l'apport de la dose 50 mg (BP50). La figure 3 (A et B) présente la hauteur des plants respectivement à 2 mois et à 4 mois après semis.

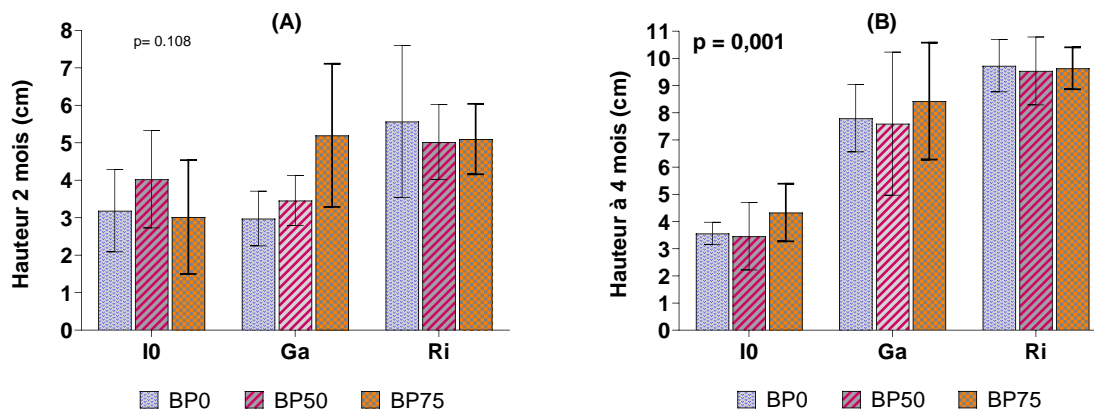


Figure 3 : Hauteur des plants de sorgho à 2 mois (A) et à 4 mois (B) après semis

Effet de la combinaison BP-inoculation sur les biomasses des plants : Au niveau de la biomasse racinaire, 2 mois après semis, les biomasses les plus élevées sont obtenues avec l'inoculum Ri et ne diffèrent pas quel que soit la dose du BP. Les biomasses des plants inoculés avec Ga présente deux groupes. Ces groupes diffèrent en fonction de la dose de BP apporté. En présence des doses zéro et 50 mg de BP, la biomasse ne diffère pas de celles des plants non inoculés. A la dose 75 mg, les biomasses des plants inoculés avec Ga et Ri ne diffèrent pas significativement. A 4 mois après semis, l'ANOVA ne montre pas de différence significative entre les traitements. Au niveau

de la biomasse aérienne, 2 mois après semis, les plus fortes biomasses ont été observées en présence de l'inoculum Ri sans différence selon les doses de BP et les plus faibles en absence d'inoculum sans différence quel que soit la dose. Les biomasses des plants inoculés avec Ga diffèrent suivant la dose de BP apportée. En présence des doses zéro et 50 mg du BP, les biomasses ne diffèrent pas de celles des plants non inoculés. A la dose 75 mg, les biomasses des plants inoculés avec Ga et Ri ne diffèrent pas significativement. Le tableau 2 présente les moyennes des biomasses racinaires et aériennes à 2 et 4 mois après semis.

Tableau 2 : Biomasses racinaires et aériennes des plants à 2 et à 4 mois après le semis

Fertilisation	Inoculation	BR2 (g)	BA2 (g)	BR4 (g)	BA4 (g)
BP0	I0	0.06 ± 0.03 ^d	0.16 ± 0.05 ^b	0.07 ± 0.06	0.22 ± 0.07
	Ga	0.03 ± 0.03 ^d	0.14 ± 0.05 ^b	1.05 ± 0.47	1.63 ± 0.41
	Ri	0.81 ± 0.49 ^a	1.05 ± 0.52 ^a	1 ± 0.16	2.67 ± 0.34
BP50	I0	0.06 ± 0.03 ^d	0.19 ± 0.08 ^b	0.07 ± 0.04	0.24 ± 0.12
	Ga	0.12 ± 0.08 ^d	0.33 ± 0.21 ^b	0.69 ± 0.4	1.49 ± 0.83
	Ri	0.86 ± 0.28 ^a	0.97 ± 0.16 ^a	1.19 ± 0.39	2.63 ± 0.54
BP75	I0	0.06 ± 0.04 ^d	0.14 ± 0.07 ^b	0.09 ± 0.04	0.31 ± 0.14
	Ga	0.45 ± 0.17 ^{bc}	0.76 ± 0.21 ^a	1.20 ± 0.26	2.01 ± 0.66
	Ri	0.64 ± 0.22 ^{ab}	1.01 ± 0.21 ^a	1.48 ± 0.34	2.48 ± 0.28
Probabilité	BP*Inoculation	0.036	0.016	0.116	0.459
Signification		S	S	NS	NS

Pour chaque colonne, les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de probabilité de 5%.

Effet de la combinaison BP- inoculation sur la nutrition phosphatée des plants :

L'analyse de variance de l'interaction des facteurs BP*inoculation n'a pas montré de différence significative entre les différents traitements. Toutefois, l'observation de l'histogramme des teneurs moyennes des traitements montre qu'en absence d'inoculation, la dose 50 mg a entraîné une augmentation de la teneur en P des plants de + 11,92% par rapport à celle des témoins non fertilisé, alors que la dose 75 mg à entrainer une diminution de la teneur en P des plants de - 3,49%. En présence de l'inoculum Ga, la plus

forte teneur en P est observée chez les plants sans apport de BP (BP0). On note une augmentation relative de + 29,74% de la teneur en P de ces plants par rapport à celle des témoins. L'apport des doses 50 et 75 mg de BP ont entraîné respectivement une diminution de -27,66% et -23,9% la teneur en P chez ces plants inoculés avec Ga. En présence de l'inoculum Ri, la teneur en P la plus élevée est obtenue avec la dose 50 mg de BP avec une augmentation de + 6,1% par rapport à celle des plants non fertilisé (BP0). La figure 4 montre la teneur en phosphore total des parties aériennes des plantes.

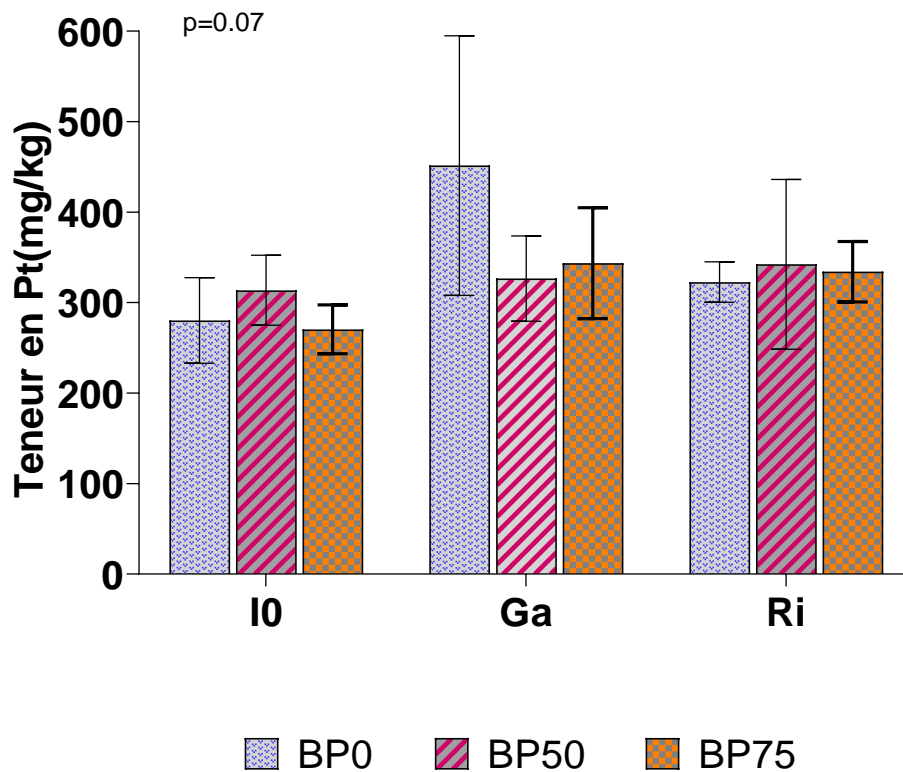


Figure 4 : Teneur en phosphore totale des parties aérienne des plants de sorgho

Effet de la combinaison BP-inoculation sur la nutrition azotée : Les plus faibles teneurs d'azote sont observées chez les plants inoculés quel que soit la dose du BP. Contrairement à la teneur en azote des plants inoculés, les plants non inoculés enregistrent les teneurs les plus

élevées et diffèrent selon la dose du BP. La dose zéro (BP0) possède la plus forte valeur suivie de la dose 75 mg (BP75). La figure 5 présente la teneur en azote totale des parties aériennes.

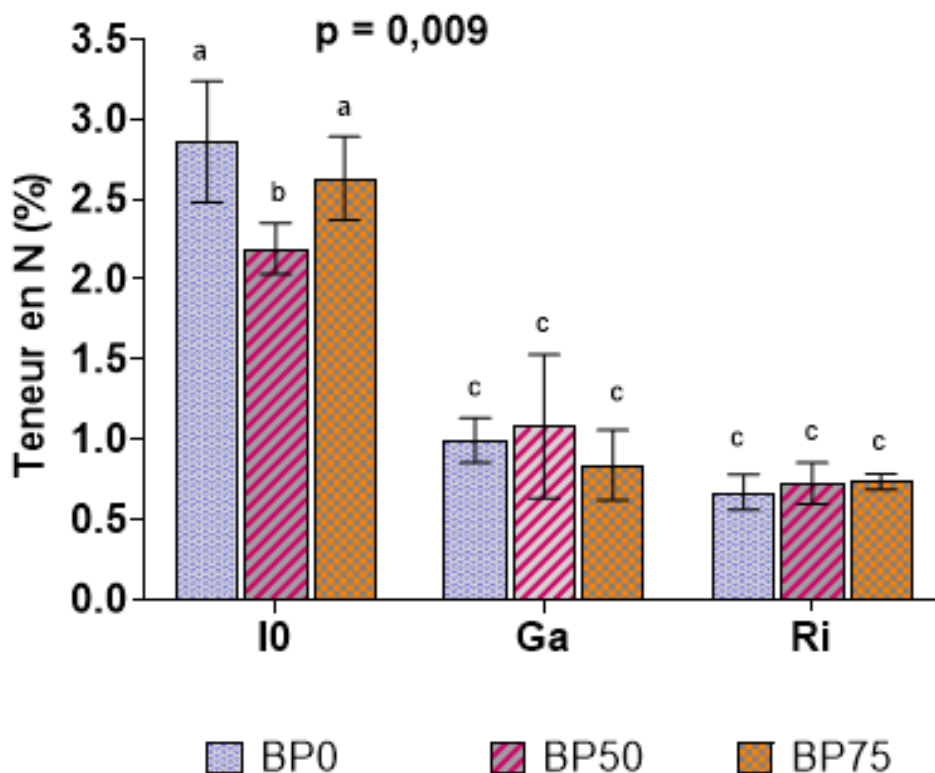


Figure 5 : Teneur en azote des parties aériennes des plants de sorgho

Les moyennes suivies par la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de probabilité de 5%.

DISCUSSION

Effet du Burkina phosphate et de l'inoculation sur la mycorhization du sorgho : Les résultats sur la mycorhization ont montré une bonne colonisation des racines du sorgho induit par l'inoculation des CMA Ri et Ga. Les taux de mycorhization ont atteint des fréquences maximales de 92% pour les deux CMA et des intensités relativement faibles de 35,2% et 32,3% respectivement pour Ri (2 mois) et Ga (4 mois). Aucune mycorhization n'a été observé chez les plants non inoculés. Ces résultats montrent que l'inoculation est un facteur important dans la mycorhization chez le sorgho sur des sols stériles. Les forts taux de mycorhization observés pourraient montrer une dépendance du sorgho kapelga vis-à-vis de la mycorhization. De plus, les résultats ont révélé que le taux de mycorhization maximum des plants inoculés avec Ri est observée à 2

mois après le semis alors que pour les plants inoculés avec Ga, la mycorhization n'est maximale qu'à 4 mois après le semis. Cela mettrait en exergue l'efficacité des deux CMA à différents stades du cycle végétatif du sorgho. Le CMA Ri serait plus efficace pendant la phase de croissance (2 mois) alors que l'efficacité de Ga intervient au moment de la maturation (4 mois). Ceci pourrait également montrer une complémentarité d'action des deux CMA pendant le cycle du sorgho. En outre, l'apport des doses 50 et 75 mg de BP ont impacté significativement la fréquence de mycorhization des plants inoculés avec Ga 2 mois après semis. On pourrait déduire que le CMA Ga contrairement à Ri, nécessiterait un niveau de fertilisation pour stimuler la mycorhization chez les plants. Ce résultat confirme les résultats obtenus par

Adjouhoun *et al.* (2017) qui ont montré que les engrais libérant lentement les nutriments peuvent stimuler les CMA. Les PN étant des engrais à libération lente d'ions phosphore (Hinsinger *et al.*, 2015), on peut déduire que la fertilisation au BP permet de stimuler la mycorhization des plants en présence du CMA Ga. Des auteurs ont rapportés des effets négatifs de la fertilisation au phosphore minérale (Schneider *et al.*, 2017 ; Lang *et al.*, 2018 ; Ben Zineb, 2020). Ben Zineb (2020) a montré par exemple que la fertilisation avec le phosphate naturel de Gafsa et le triple super phosphate (TSP) à raison de 50 kg P ha⁻¹; réduit significativement la fréquence de mycorhization de la luzerne et de la vesce. Les résultats ont aussi révélé que le taux maximum de mycorhization des plants inoculés avec Ri est obtenu avec la dose 50 mg de BP. À la dose 75 mg le taux de mycorhization décroît. On pourrait déduire que 50 mg est la dose optimum du BP convenable aux plants inoculés avec Ri. A l'inverse de Ri, la dose 75 mg pourrait être comme la dose seuil qui permet d'avoir un début de réactivité avec le CMA Ga pour booster la mycorhization des plants.

Effet du Burkina phosphate et de l'inoculation sur la croissance du sorgho : Les hauteurs les plus élevées ont été observées chez les plants inoculés. En présence des différentes doses de BP, les hauteurs moyennes des plants inoculés avec le CMA Ri dépassent celles des plants inoculés avec Ga et des plants témoins. Mais elles ne sont pas statistiquement différentes. Cela montre que la combinaison BP-inoculation n'a pas eu d'effet significatif sur la vitesse de croissance en hauteur des plants. Au niveau des biomasses, les résultats ont montré une production de matière sèche racinaire et aérienne significative chez tous les plants inoculés avec Ri à 2 mois après semis. Cette production significative de biomasses chez ces plants n'est toutefois pas dépendante des doses de BP apportés. Cela signifierait que l'inoculation du CMA Ri ne nécessite pas

forcement de source de fertilisation. De plus, ce résultat traduit une efficacité du CMA Ri dans l'amélioration de la croissance des plants. Cette amélioration de la biomasse pourrait être attribuée au taux de mycorhization observé chez ces plants. Ces résultats sont en accord avec de nombreux travaux qui stipulent que la symbiose mycorhizienne améliorerait la croissance de la plante hôte. En effet, Dabiré *et al.* (2007) ont observé dans du sol stérilisé ou non, un effet positif de l'inoculation mycorhizienne sur le développement de *Sorghum bicolor*. Nowak (2004), a montré qu'en présence de faibles quantités de phosphore la mycorhization permet d'augmenter la croissance des plantes. D'autres auteurs ont rapportés l'efficacité du CMA Ri sur la croissance d'autres espèces végétales. Duponnois *et al.* (2005) ont noté une augmentation de la biomasse des plants de *Acacia holosericea* mycorhizés avec *Glomus intraradices* (devenu *R. irregularis*). Diop *et al.* (2013) ont montré que l'inoculation avec *R. irregularis* améliore la croissance du niébé en culture pure. Contrairement au CMA Ri, la biomasse des plants inoculés avec Ga semble être dépendante de la dose de BP apportée. En effet, avec la dose 50 mg de BP, les biomasses des plants inoculés avec Ga ne diffèrent pas de celles des plants témoins. Par contre à la dose 75 mg, il y'a une augmentation significative des biomasses produites. Cela pourrait traduire une nécessité de la fertilisation pour le CMA Ga et aussi un seuil à atteindre pour avoir un effet sur la croissance des plants. Au regard de l'impact de la dose 75 mg du BP sur la mycorhization et de son effet sur la production des biomasses, cette dose pourrait être considéré comme le seuil de BP à appliquer avec l'inoculum Ga pour stimuler la mycorhization et améliorer la croissance des plants. Ainsi ces résultats montrent que la combinaison du BP avec les CMA a permis d'améliorer la croissance du sorgho kapelga. Cette amélioration pourrait être attribuée à une bonne nutrition phosphatée des plants grâce à

la mycorrhization. En effet selon Ahemad et Kibret (2014), à travers le développement d'hyphes mycorrhiziens les racines mycorrhisées peuvent explorer le substrat de culture pour améliorer la nutrition phosphatée et azotée des plants. Ces micro-organismes favorisent directement la croissance des plantes en facilitant l'acquisition des éléments nutritifs (azote, phosphore et minéraux essentiels) ou en modulant les niveaux des phytohormones, ou indirectement en diminuant les effets inhibiteurs de divers agents pathogènes sur la croissance et le développement des plantes.

Effet du Burkina phosphate et de l'inoculation sur la nutrition minérale du sorgho : La teneur en P des plants fertilisés non inoculés ne diffère pas significativement de celle de témoins non fertilisés et non inoculés. Ces résultats pourraient s'expliquer d'une part par la faible réactivité du BP (Truong *et al.*, 1978) et d'autre part, par le pH du substrat de culture. En effet, selon Lompo *et al.* (1995), Compaoré *et al.*, (1997), la solubilité du BP dans l'eau est de 0.03%. Cette faible solubilité ne facilite pas la libération du P du BP pour alimenter la solution du sol en P assimilable par les plantes et améliorer leur nutrition phosphatée. Au-delà de la faible réactivité du BP, les caractéristiques du sol aussi affecteraient grandement la dissolution des PN et en conséquence leur efficacité agronomique (FAO, 2004). Selon Hedley et Bolan (2003) et FAO (2004), l'utilisation des PN est recommandée selon leur réactivité dans les sols ayant un pH inférieur ou égal à 5,5. Or, les résultats de l'analyse physico-chimique du substrat de culture ont révélé un pH de 6,85 supérieur à 5,5. Ce pH pourrait être une contrainte à la libération du P du BP. Ainsi, la faible solubilité du BP dans l'eau associée au pH presque neutre du substrat de culture explique l'effet non significatif du BP sur la nutrition phosphatée. De plus, les résultats ont révélé que la combinaison du BP avec les deux inocula n'a pas influencé significativement la

teneur en P total des plantes. Ce qui traduirait une incapacité des CMA à mobiliser le P du BP au profit des plants. En effet, selon Smith and Read (2010), la nature du phosphore prélevé par les CMA serait semblable à celui assimilé par la plante. Pour ces auteurs, ces CMA ne disposeraient pas de mécanismes spécifiques qui leur permettent de solubiliser les formes peu solubles de phosphores. Par ailleurs, la plus forte teneur en P a été observée chez les plants inoculés avec Ga sans fertilisation avec une augmentation relative de +29,74% par rapport à celle des témoins non inoculés et non fertilisés. Cela montre que le BP n'est pas la source de P utilisé par les plantes pour améliorer leur nutrition phosphatée. On pourrait déduire que le substrat de culture à travers la matière organique aurait servi de source de P pour améliorer la nutrition phosphatée des plantes et en conséquence améliorée leur croissance. Selon certains auteurs, les CMA à travers leurs hyphes fongiques et leurs capacités à sécréter des enzymes comme les phosphatases peuvent libérer le phosphore à partir de la matière organique (Smith et Read, 1997 ; Joner et Johansen, 2000). L'acide carbonique et les acides organiques produites lors de la décomposition des matières organiques entraînent la libération de phosphate et de calcium dans la solution (Hassimi *et al.*, 2017). Ils peuvent influencer les processus de précipitations et dissolutions du P en jouant comme ligands de cations (Ca, Al, Fe) et par l'acidification du milieu rhizosphérique (Oburger *et al.*, 2011). Pour la nutrition azotée, le taux d'azote significativement bas chez les plants inoculés pourrait s'expliquer par le fait que le BP utilisé comme fertilisant n'apporte pas d'azote aux plants. Le substrat de culture étant pauvre en azote, l'azote résiduel a dû être utilisé par les CMA inoculés pour leur propre métabolisme. En effet, selon Vidal-Ribeil (2015), les hyphes des champignons assimilent l'azote sous forme de nitrites, de nitrates et d'ammonium. À travers le mycélium extra-

cellulaire, le champignon va ensuite transformer et stocker ces molécules sous forme d'arginine. L'arginine est dégradé en ammonium au sein du mycélium intraracinaire puis transféré à la plante par le biais

de l'arbuscule. Ce processus de biosynthèse immobilise l'azote au sein du champignon ce qui peut provoquer une faim d'azote chez les plants mycorhizés.

CONCLUSION ET APPLICATION DES RESULTATS

L'association BP-CMA a amélioré la mycorhization et la croissance du sorgho kapelga. L'inoculum Ri a été plus efficace avec la dose optimum de 50 mg/kg de BP. L'inoculum Ga a nécessité des doses plus élevées avec un seuil de 75 mg / kg de BP. L'étude a aussi mis en évidence une complémentarité des deux CMA qui pourrait optimiser le rendement du sorgho kapelga.

Ainsi, l'association BP- CMA rend plus efficace l'utilisation du BP en application direct. Cette technique constitue une voie d'utilisation du Burkina phosphate Cette biotechnologie pratiquée à grande échelle permettra d'augmenter les rendements des cultures. Cependant ce travail doit se poursuivre en milieu réel pour vérifier l'efficacité de la technique au champ.

REMERCIEMENT

Nous remercions le programme de bourse d'études Mwalimu Nyerere de l'Union Africaine et le Programme de Productivité Agricole en Afrique de L'Ouest (West Africa

Agricultural Productivity Program) (PPAAO/WAAPP) qui ont financé ces travaux.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- Adjanooun A., Baba-Moussa L.S., Dagbénonbakin G., Saïdou A., Toukourou F., 2017. Utilisation des microorganismes du sol pour accroître la productivité agricole : *Manuel de l'apprenant. CNS-Maïs/INRAB/SNRA. 76 p. Dépôt légal N° 9644 du 27 septembre 2017, Bibliothèque Nationale (BN) du Bénin, 3ème trimestre, ISBN : 978-99919-819-1-8*
- Ahemad M., Kibret M., 2014. Mechanisms and applications of plant growth promoting rhizobacteria: Current perspective. *J. King Saud Univ. - Sci. 26, 1–20.*
- Babana A. H., 2003. Mise au point d'un inoculant biologique pour le blé irrigué du Mali. *Thèse de Ph. D, Université Laval, Québec, 254 p.*
- Ben Zineb A., 2020. Valorisation des phosphates naturels pour une agriculture durable : impact agronomique et environnemental. *Thèse de doctorat, Institut National Agronomique de Tunisie, 187p.*
- Compaoré E, Fardeau J-C, Morel J-L, Sedogo M P, 2001. Le phosphore biodisponible des sols : une des clés de l'agriculture durable en Afrique de l'Ouest. *Cahiers Agricultures ; 10: 81 -5*
- Compaoré E., Grimal J-Y., Morel J-L., Fardeau J-C., 1997. Efficacité du phosphate naturel de kodjari (Burkina Faso). *Cahiers Agricultures 1997; 6: 251-5*
- Compaoré E., Frossard E., Sinaj S., Fardeau J. C., Morel J. L., 2003. Influence of land-use management on isotopically exchangeable phosphate in soils from Burkina Faso. *Commun. Soil Sci. Plant Anal. 34 (1 & 2): 201 - 223.*
- Dabiré A.P., Hien V., Kisa M., Bilgo A., Sangaré K.S., Plenchette C., Galiana A., Prin Y., and Duponnois R., (2007). Responses of soil microbial catabolic

- diversity to arbuscular mycorrhizal inoculation and soil disinfection. *Mycorrhiza*, 17: 537-545
- Dieme J. S., Duponnois R., Akpo L. E., 2008. Impact du type de phosphore sur la croissance de plants d'*Acacia holosericea* A. CUNN. EX. G. DON en boisement villageois en région soudano-sahélienne au senegal. *J. Sci. Vol. 8, N° 1 (2008) 7-15*
- Diop I., Kane A., Krasova- Wade T., Sanon B. K., Houngnandan P., Neyra M., Noba K., 2013. Impacts des conditions pédoclimatiques et du mode cultural sur la réponse du niébé à l'inoculation endomycorhizienne avec *Rhizophagus irregularis*. *J. Appl. Biosci.* 69:5465 - 5474, ISSN 1997–5902.
- Duponnois R., Colombet A., Hien V., Thioulouse J., 2005. The Mycorrhizal fungus *Glomus intraradices* and rock phosphate amendment influence plant growth and microbial activity in the rhizosphere of *Acacia holosericea*. *Soil Biology & Biochemistry* 37: 1460-1468.
- FAO, 2004. Utilisation des phosphates naturels pour une agriculture durable. *Bulletin FAO, Engrais et Nutrition Végétale* 13, 176 p.
- Fardeau J-C, Frossard E. 1991. Processus de transformation du P dans les sols de l'Afrique de l'Ouest semi-arides: application au P assimilable. In : *Tiessen H, Frossard E, eds. Phosphorus cycles in terrestrial and aquatic ecosystems Regional workshop 4: Africa SCOPE/ UNEP. March 18-22. Nairobi, Kenya (Africa) : 108-28.*
- Hassimi M. S., Boukeskass A., Adamou I., Mayaki Z. A., Ouhdouch Y., Hafidi M., 2017. Caractérisation des microorganismes thermotrophes impliqués dans la solubilisation du Phosphate Naturel Marocain au cours de la biotransformation anaérobie du gazon. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 11(6): 2764-2777, 2017.
- Hedley MJ., Bolan NS., 2003. Key outputs from reactive phosphate rock research in New Zealand. In Direct application of phosphate rock and related technology: latest developments and practical experiences, Rajan SSS, Chien SH (eds). *Proc. Int. Meeting, Kuala Lumpur, 16-20 July 2001. Muscle Shoals, USA, IFDC. 441 pp.*
- Hinsinger P., Herrmann L., Lesueur D., Robin A., Trap J., Waithaisong K., Plassard C. 2015. Impact of roots, microorganisms, and microfauna on the fate of soil phosphorus in the rhizosphere. *Ann. Plant Rev.* 48, 377-408.
- Joner EJ, Johansen A. 2000. Phosphatase activity of external hyphae of two arbuscular mycorrhizal fungi. *Mycological Research* 104: 81–86.
- Lang M., Christie P., Zhang J., Li X., 2018. Long-term phosphorus application to a maize monoculture influences the soil microbial community and its feedback effects on maize seedling biomass. *Appl. Soil Ecol.* 128, 12–22.
- Lompo F., Sedogo M.P., Hien V., 1995. Impact agronomique du phosphate et de la dolomie du Burkina. *Etudes diverses sur les engrais n° 12: 60-72.*
- Nakamura S., Issaka R. N., Dzomeku I. K., Fukuda M., Buri M.M., Avornyo V., Adjei E. O., Awuni J. et Tobita S., 2013. Effect of Burkina Faso phosphate rock direct application on Ghanaian rice cultivation. *Afr. J. Agric. Res. Vol 8 (17) : 1779 – 1789.*
- Nowak J., 2004. Effects of arbuscular Mycorrhizal Fungi and organic fertilization on growth, flowering, nutrient uptake, photosynthesis and transpiration of geranium (*Pelargonium hortorum* L.H. Bailey 'Tango Orange'). *Symbiosis* 37: 259-266.

- Oburger E., Jones D.L., Wenzel W.W., 2011. Phosphorus saturation and pH differentially regulate the efficiency of organic acid anion-mediated P solubilization mechanisms in soil. *Plant soil* 341, 363–382
- Park J., Bolan N., Mallavarapu M., Naidu R., 2010. 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World 1 – 6 August 2010, Brisbane, Australia. Published on DVD.
- Phillips J.M., Hayman D.S., 1970. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Trans. Br. Mycol. Soc.* 55, 158–161.
- Richardson A. E., 2001. Prospects for using soil microorganisms to improve the acquisition of phosphorus by plants. *Aust. J. Plant Physiol.* 28, 897-906.
- Schneider Ki., Lynch D., Bunemann E., Voroney P., 2017. Vegetative composition, AMF root colonization and biological N fixation distinguish organic and conventional perennial forage systems. *Agron. J* 109, 1697–1706.
- Smith S.E., Read D.J., 1997. Mycorrhizal Symbiosis, 2nd ed. *Academic Press, London.*
- Smith S.E., Read D.J., 2010. Mycorrhizal symbiosis, Third Edit. ed. *Academic press.* Elsevier, New York.
- Taktek S., 2015. Dissolution biologique des phosphates : Interaction bactéries-mycorhizes. *Thèse de Ph. D, Université Laval, Québec, 150 p.*
- Trouvelot A., Kouch J., Gianinazzi-Pearson V., 1986. Les mycorhizes, physiologie et génétique, *INRA, pp.* 217–221.
- Truong B., Pichot J., Beunard P., 1978. Caractérisation et comparaison des phosphates naturels tricalciques d'Afrique de l'Ouest en vue de leur utilisation directe en agriculture. *Agron. Trop.* 33: 136.
- Vidal-Ribeil V., 2015. Étude de la mycorhization de variétés populations de blé en culture pure et en association avec une légumineuse. [Stage] France. *Université d'Angers (UA), FRA. 2015. hal- 02801184.*