

Effet de la fertilisation avec trois souches de champignons mycorhiziens arbusculaires et du phosphate naturel de Tilemsi sur la croissance du maïs (*zea mays* L.)

KONE Souleymane ¹, KANTE Fallaye ¹, DIOP Ibou ²⁻³, NDOYE Fatou ²⁻³, DIEUDHIOU Abdalla Gamby ²⁻³,
KANE Aboubacry ²⁻³, YATTARA Inamoud ¹, SACKO Ousmane ¹

Email : souleymanekone65@yahoo.fr

¹Laboratoire de Microbiologie des Sols (LMS), Faculté des Sciences et Techniques de l'Université des Sciences, des Techniques et des Technologies de Bamako (USTTB)

²Université Cheikh Anta DIOP de Dakar

³Laboratoire Commun de Microbiologie (LCM) IRD/ISRA/UCAD, Dakar

RESUME : Au Mali, les cultures céréalières comme le maïs dépendent fortement de l'apport d'intrants. Dans ce domaine, les engrais phosphatés et azotés jouent un rôle prépondérant dans l'enrichissement des sols en éléments nutritifs nécessaires à la croissance des plantes. Mais le coût élevé de ces engrais et les risques sur l'environnement exigent de plus en plus l'utilisation d'alternatives comme les fertilisants à base de champignons mycorhiziens et de phosphates naturels. Effectivement, les champignons mycorhiziens, quand ils sont utilisés comme inoculum, améliorent la croissance de la plante par un meilleur prélèvement et un transfert d'éléments nutritifs en particulier le phosphore (P). Les champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA) se sont révélés très efficaces pour l'amélioration de la croissance des plantes surtout lorsqu'ils sont couplés au PN.

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'effet de la fertilisation avec des souches de champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA) et du phosphate naturel de Tilemsi (PNT) sur la croissance du maïs.

Une expérience a été conduite en serre au Laboratoire Commun de Microbiologie (LCM), IRD/ISRA/UCAD de Dakar sur le sol de Sangalkam (Sénégal) stérilisé. Les graines de maïs ont été semées dans des pots en raison de 03 graines / pot. Le dispositif adopté était en bloc randomisé. L'expérience a duré 70 jours.

Les résultats ont montré que, 'excepté le traitement IR-27 en présence de 200 mg de PNT où la valeur de l'intensité de mycorhization a été faible (30,88%), tous les autres traitements ont montré des intensités de mycorhization élevées allant de 39,24 à 79,64%. En outre, les trois souches de CMA, *R. irregularis*, *G. mosseae*, *G. aggregatum* ont stimulé significativement, la hauteur et les biomasses des plants de maïs (chiffres) en présence de 100 mg PNT.

Dans nos conditions expérimentales, la fertilisation avec des souches de CMA en présence de phosphore provenant du PNT a permis d'améliorer la croissance du maïs dans la perspective d'une agriculture durable et d'une préservation à long terme de la fertilité des sols et de l'environnement.

La fertilisation à base de champignons endomycorhiziens et de phosphates naturels, pourrait donc être conseillée comme un recours à l'utilisation des engrais chimiques. Il s'avère cependant nécessaire de mener la même expérience au champ (milieu réel) pour confirmer ou infirmer les résultats obtenus.

Mots clés : Champignons mycorhiziens arbusculaires, phosphate naturel, maïs.

I. INTRODUCTION

En Afrique subsaharienne, la pauvreté des sols en éléments nutritifs et la forte croissance démographique compromettent le rendement des cultures et la durabilité de l'agriculture. En effet, près de 80% des sols sont carencés surtout en azote (N) et le phosphore (P) (Bationo *et al*, 1998 ; Bâ

et al, 2001 ; Sacko *et al*, 2012, 2014).

Actuellement, la productivité agricole et notamment céréalière en maïs est grandement dépendante des engrais chimiques.

Dans ces pays, les céréales cultivées contribuent largement à la sécurité alimentaire. A ce titre, le

maïs occupe la 4^{ème} place des apports en calories (8,34%) après le riz (22%), le mil (14%) et le sorgho (14%) et constitue la 7^{ème} production agricole en valeur au Mali pour la période 2005-2009 avec 4,71% de la valeur de la production totale (Criado, 2002 ; FAOSTAT, 2010). La céréale maïs est surtout destinée à l'alimentation humaine, à travers différentes préparations culinaires (tô, couscous, épis frais ou grillés). Son utilisation dans l'alimentation animale (volaille surtout) connaît un essor considérable dans les grands centres urbains tels que Bamako, Ségou et Sikasso. Aussi, les recherches ont permis de démontrer qu'elle produit du bio carburant comme source d'énergie constituant ainsi une option au pétrole (Ekobo, 2006).

Pour réduire la dépendance aux engrais chimiques et les risques de pollution de l'environnement comme la surproduction d'algues dans les rivières et les lacs (Gruhn *et al.*, 2000), l'utilisation de ressources fertilisantes locales comme les phosphates naturels (PN) constituent une option. Il a été rapporté que le phosphate naturel (PN), utilisé en application directe constitue une source potentielle de phosphore moins chère pour les paysans et pourrait être plus rentable en comparaison avec les engrais minéraux phosphatés (Bationo *et al.*, 1997 ; Pieri, 1989). Cependant la faible solubilité des PN, limite la disponibilité du phosphore pour les plantes, (Strullu, 1991 ; cité par Sacko *et al.* 2014). Pour améliorer la solubilité des PN, l'inoculation avec les champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA) est une possibilité (Babana et Antoun, 2003). D'ailleurs, la présence des CMA est un atout indispensable pour que des plantes cultivées puisse maintenir leur productivité (Bâ *et al.*, 2000 ; Al-Karaki *et al.*, 2004 ; Schroeder et Janos, 2004 ; Oehl *et al.*, 2004). Alors, l'inoculation avec des CMA couplée à la

fertilisation phosphatée sous forme de PNT permet d'augmenter la disponibilité de phosphore (P).

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'effet de la fertilisation avec des souches de champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA) et du phosphate naturel de Tilemsi (PNT) sur la croissance du maïs.

II. MATERIEL ET METHODES

1. Le Sol

Le substrat de culture est du sol prélevé à Sangalkam (50 km de Dakar). Ce sol contient 5,40% d'argile, 5,80% de limon, 88,8% de sable, 0,60% de matières organiques, 0,30% de carbone total, 0,02% d'azote total, 14% de ratio C/N, 333,5 ppm de potassium total, 41,4 ppm de phosphore total, 2,1 ppm de phosphore assimilable, 1,03 ppm de calcium total, 0,3 ppm de magnésium total (Diop *et al.*, 2013). Le pH (H₂O) et le pH (KCL) sont respectivement de 6 et de 4,6. Après une double stérilisation à l'autoclave pendant 20 mn à 120° C, le sol a été reparti dans 120 pots en plastique de 2,5 litres à raison de 02 kg/pot.

2. Matériel végétal

Les graines de la variété de maïs utilisée, proviennent de FASOKABA, structure privée de certification et de vente de semences au Mali. Il s'agit de la variété Brico avec un cycle court de 65 à 70 jours et cultivée entre les isohyètes 400 et 600mm. Son rendement moyen est de 2-3 T/ha.

Les champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA)

Les souches de CMA, *Rhizophagus irregularis* (Ri), *Glomus aggregatum* (IR-27) et *Glomus mosseae* (Gm) utilisées comme inocula proviennent de la collection du Laboratoire Commun de Microbiologie (LCM) de Dakar, Sénégal. Les inocula sont constitués d'un

mélange de spores, d'hyphes, de fragments de racine colonisée par le champignon endomycorhizien et de sables de plage.

3. Le phosphate naturel de Tilemsi (PNT)

Le PNT utilisé dans notre expérimentation provient de la vallée de Tilemsi à Bourem au Nord du Mali. C'est un des phosphates les plus tendres et les plus réceptifs d'Afrique de l'Ouest avec près de 30% de P_2O_5 (Truong & al, 1977).

Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental utilisé est un dispositif en blocs complets randomisés à 2 facteurs répétés chacun 8 fois conçus avec des pots plastiques contenant du sol de Sangalkam stérilisé.

L'inoculation avec les champignons mycorhiziens arbusculaires représentaient le premier facteur à 5 niveaux :

- ✓ témoin T0 sans inoculum et sans apport de PNT ;
- ✓ inoculation avec *Rhizophagus irregulare* (Ri) ;
- ✓ inoculation avec *Glomus aggregatum* (RI27) ;
- ✓ inoculation avec *Glomus mosseae* (Gm) ;
- ✓ inoculation avec le Cocktail ou mixte de souches de CMA (Ri + IR-27 + Gm).

La fertilisation avec le phosphate naturel constituait le deuxième facteur à 3 niveaux:

- ✓ 0 mg PN.Kg⁻¹sol ;
- ✓ 100 mg PN.Kg⁻¹sol ;
- ✓ 200 mg PN.Kg⁻¹sol.

L'inoculum de champignon mycorhizien a été apporté aux plants à raison de 20g/pot en même temps que l'apport de P au moment du semis.

Les graines de maïs ont été semées directement à raison de trois (03) graines par pot. Une semaine après le semis, les jeunes plants ont été démariés à raison de deux plants par pot et à 10 jours de croissance, un second démariage a été réalisé pour

ne conserver qu'un plant/pot. L'arrosage des plants se faisait au besoin avec de l'eau de robinet de façon à maintenir l'humidité du sol proche de la capacité au champ (14%, vol/poids). L'expérience a duré 70 jours et a été réalisée en serre au LCM de Dakar au Sénégal.

Tous les 15 jours, la hauteur des plants a été mesurée jusqu'à 60 jours de croissance. La fréquence (F%) et l'intensité (I%) de mycorhization et les biomasses ont été déterminées après 60 jours de croissance. Pour déterminer les paramètres de mycorhization et les biomasses, un échantillonnage de huit plants par traitement a été réalisé à 60 jours de culture. Pour cela, les plants ont été déposés et les parties aérienne et racinaire de chaque plant ont été séparées. Elles ont été ensuite mises dans des enveloppes étiquetées puis séchées à l'étuve à 60°C pendant 15 jours.

Les racines des plants de chaque traitement ont été récupérées, lavées et découpées en fragments de 1 cm. Elles ont été ensuite colorées selon la méthode décrite par Philips & Hayman (1970). La lecture des lames a été effectuée suivant la méthode de Trouvelot *et al.* (1986).

Une analyse de variance (ANOVA) a été faite sur toutes les données relatives à la croissance à l'aide du logiciel R i386 3.2.2 et le test de Tukey Contrasts au seuil de 5% a été utilisé pour la comparaison des moyennes.

III. RESULTATS

1. Mycorhization des plants de maïs

L'analyse statistique (ANOVA) a montré une différence hautement significative ($p \leq 0,001$) entre les différents traitements pour la fréquence et l'intensité de mycorhization (Tableau 1).

- A 60 jours de croissance, quel que soit le traitement, la fréquence de mycorhization a été supérieure ou égale à 90%. L'apport de PNT à la dose 100 mg a amélioré la fréquence de

mycorhization sauf en présence de la souche de CMA au Ri. Cependant la baisse significative de la fréquence notée suite à l'apport de 200 mg de PNT, n'a pas concerné le cocktail (mélange) de CMA. La plus haute fréquence (100%) a été observée avec les traitements, Ri seul et Ri à 200 mg, Gm pris isolement et Gm à 100 mg et IR-27 à 100 mg de PNT.

- Après 60 jours de culture, l'intensité de mycorhization est plus élevée quel que soit le traitement avec les CMA, variant de 39,24% à 79,46%. La valeur de l'intensité de mycorhization est élevée pour tous les traitements, excepté IR-27 en présence de 200 mg de PNT (30,88%). L'apport de 100 mg de PNT a pu améliorer de façon significative, l'intensité de mycorhization du traitement « mélange de champignons » avec 56,83%.

De même, avec la dose 200 mg PNT, la baisse de l'intensité est plus significative et seul le traitement « cocktail de champignon » a amélioré l'intensité avec 44,50 % d'intensité de mycorhization.

2. Croissance des plants de maïs

L'analyse de variance (ANOVA), a permis d'avoir une différence hautement significative ($p \leq 0,001$) entre les différents traitements pour la hauteur et les biomasses (Tableau 2).

- Hauteur

A 60 jours, les résultats ont montré que les trois souches de CMA et leur mélange ont permis d'augmenter la hauteur en fonction du temps. En effet, les différentes valeurs de la hauteur ont augmenté et la plus grande valeur (81,98 cm) notée chez le traitement RI en présence de 100 mg PNT, atteste de cela.

Les doses 100 et 200 mg de PNT ont amélioré la hauteur des tous les traitements inoculés et non inoculés. Néanmoins, les traitements PNT à 100 mg, Ri et le Cocktail de CMA à 200 mg n'ont pas été concernés par cette croissance puisqu'ils n'ont

pas montré de différence significative avec le témoin T0.

- Biomasses

Après 60 jours de croissance, les trois souches de CMA ont permis d'augmenter la biomasse aérienne en présence de 100 mg de PNT. En effet, il a été obtenu 4,40%, 5,63% et 4,97 avec respectivement Ri, IR-27 et Gm. Cependant, la biomasse racinaire n'a été améliorée que pour les traitements IR-27 avec 1,56% et Gm 1,46% en présence de la même dose.

L'apport de la dose 200 mg, a permis d'améliorer seulement la biomasse racinaire de Gm. Chaque valeur représente la moyenne pour 8 plants. Dans une même colonne les valeurs suivies d'une même lettre ne sont pas statistiquement différentes entre elles au seuil de 5% selon le test de Newman et Keuls

Tableau 1 : Fréquence et intensité de mycorhization des plants de maïs, inoculés avec des souches de CMA en présence ou non de PNT à 60 jours de culture

Traitements	F% à 60 jours	I % à 60 jours
Ri	100 e	79,46 j
IR-27	98,5 d	71,27 g
Gm	100 e	74,60 h
Cocktail	90,00 a	39,24 b
Ri + PNT (100 mg)	96,25 c	77,32 i
IR-27 + PNT (100 mg)	100 e	51,64 d
Gm + PNT (100 mg)	100 e	62,01 f
Cocktail + PNT (100 mg)	97,5 d	56,83 e
Ri + PNT (200 mg)	100 e	57,90 e
IR-27 + PNT (200 mg)	93,75 b	30,88 a
Gm + PNT (200 mg)	96,25 c	40,61 b
Cocktail + PNT (200 mg)	93,75 b	44,50 c
Probabilité	0,001	0,001
Signification	HS	HS

Tableau 2 : Hauteur (cm) et biomasses (g) des plants de maïs âgés de 15, 30, 45 et 60 jours, inoculés ou non avec des souches de CMA en présence ou non de PNT

Traitements	Périodes de mesure				Périodes de croissance	
	H (cm)				BA (g)	BR (g)
TO	35,03 acd	45,65 ac	61 ab	64,85 ab	1,47 a	0,70 a
Ri	38,65 bcef	60,82 def	72,07 bc	73,36 ac	4,06 cdf	1,71 d
IR-27	40,76 bcef	62,05 def	70,27 bc	70,62 ac	3,39 bde	1,21 ad
Gm	44,60 def	62,10 def	71,28 bc	69,95 ac	4,41 df	1,17 ad
Cocktail	42,23 cf	58,57 bcef	67,51 ac	68,83 ac	3,15 ade	1,11 ad
PNT (100 mg)	35,76 ace	54,03 ade	61 ab	61,00 ab	2,18 abc	0,86 ab
Ri + PNT (100 mg)	46,52 f	72,11 f	80,86 c	81,98 c	4,40 df	1,58 cd
IR-27 + PNT (100 mg)	44,12 def	66,23 ef	73,38 bc	75,37 bc	5,63 f	1,56 cd
Gm + PNT (100 mg)	45,13 ef	66,75 ef	74,41bc	74,50 ac	4,97 ef	1,46 bcd
Cocktail + PNT (100 mg)	42,08 cf	60,22 cef	66,68 ac	67,43 ac	3,22 ade	1,16 ad
PNT (200 mg)	31,36 ab	42,53 a	52,41 a	59,24 a	2,02 ab	0,98 ac
Ri + PNT (200 mg)	39,11 bcef	57,78 bcef	63,86 ab	64,18 ab	2,86 ad	1,10 ad
IR-27 + PNT (200 mg)	33,38 ac	50,60 acd	62,86 ab	66,91 ac	2,27 abc	0,77 a
Gm + PNT (200 mg)	36,96 acef	55,83 ade	65,50 ab	68,81 ac	3,53 bde	1,20 ad
Cocktail + PNT (200 mg)	28,67 a	43,85 ab	54,16 a	60,12 ab	2,13 ab	0,68 a
Probabilité	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Signification	HS	HS	HS	HS	HS	HS

IV. DISCUSSION

Mycorhization

L'inoculation en serre des plants de maïs avec les souches de *Glomus aggregatum* (IR-27), *Glomus mosseae* (Gm) et *Rhizophagus irregularis* (Ri) et leur mélange en présence ou non de PNT a permis d'obtenir des valeurs de l'intensité de mycorhization allant de 30,88% à 79,46%. Ces valeurs sont significativement plus importantes chez les traitements avec les souches de CMA pris isolément ou en association avec le PNT excepté le traitement IR-27 en présence de 200 mg de PNT (30,88%). En effet, ces traitements ont montré des valeurs de l'intensité de mycorhization élevées allant de 39,24 à 79,46%. Nos résultats sont comparables à ceux de Diop *et al.*, (2013), Alkan *et al.* (2006), Smith *et al.*, (2004), Drew *et al.*, (2003), Graham & Abbott, (2000) ; Jansa *et al.*, (2007) qui ont obtenu des intensités de mycorhization variant de 40 à 65%.

Les souches de CMA IR-27, *R. irregularis* et *G. mosseae* utilisées au cours de cet essai se sont montrées plus efficace à coloniser les racines du maïs. En effet, les valeurs de l'intensité de mycorhization dues à ces souches sont élevées et varient entre 40,61% et 79,46%. Nos résultats sont similaires à ceux trouvés par Jansa *et al.* (2007) avec *G. mosseae*, Alkan *et al.* (2006) avec *R. irregularis*, NDoye *et al.* (2012) avec *G. mosseae* et *G. aggregatum* et Diop *et al.* (2013) avec les 3 souches de CMA, comme dans la présente étude. L'effet de l'inoculation avec *G. mosseae* et *R. irregularis* a été plus significatif que celui de IR-27, comme en témoigne la valeur de 30,88% (faible) pour l'intensité de mycorhization à 200 mg de PNT observée avec ce traitement.

Par ailleurs, il a été rapporté que l'intensité de mycorhization varie d'une espèce à une autre et serait due à la différence d'efficacité observée entre

les souches fongiques, mais aussi à la plante utilisée, aux conditions de croissance du milieu, au niveau de phosphore dans le sol et à bien d'autres facteurs de l'environnement (Boddington & Dodd, 2000 ; Alkan *et al.*, 2006).

Croissance

Notre étude a montré une augmentation des valeurs des paramètres de croissance des plants de maïs (hauteur et biomasses) en présence de fertilisations phosphatée et biologique. Les valeurs obtenues semblent confirmer les niveaux de performances symbiotiques observées avec les différentes souches de CMA utilisées. Les résultats indiquent également que les trois (03) souches de CMA (*R. irregularis*, *G. mosseae*, *G. aggregatum*) ont stimulé significativement seule ou en présence de PNT surtout, la hauteur et les biomasses des plants de maïs par rapport au témoin non inoculé. En effet, une dynamique a été observée dans la croissance du maïs. A 60 jours, les 3 souches de CMA en présence de 100 mg de PNT ont été améliorées significativement les biomasses, excepté la biomasse racinaire de Ri. Après 60 jours de culture, la plus grande valeur de la hauteur est de 81,98 % avec Ri en présence de 100 mg de PNT, tandis que la valeur de la biomasse aérienne est de 5,63% avec IR-27 à 100 mg de PNT et 1,71% avec Ri pour celle de la biomasse racinaire.

L'effet bénéfique noté suite à l'apport de PNT a permis une augmentation de la biomasse aérienne surtout entre 2 et 5%. Ces résultats sont semblables à ceux de Smith *et al.*, (2011) qui ont signalé que le phosphore provenant du PN stimule la croissance des plantes. Ces résultats sont confirmés par ceux de Diop *et al.* (2013) qui ont observé une stimulation significative de la biomasse aérienne des plants de *Vigna unguiculata* suite à l'inoculation avec *R. irregularis*. Nos résultats concernant le développement du maïs sont

renforcés également par ceux de Haro *et al*, (2012) qui ont obtenu une amélioration de la biomasse des plants de *Vigna unguiculata* suite à l'apport de mycorhize.

CONCLUSION

L'inoculation en serre avec des souches de champignons endomycorhiziens (*Rhizophagus irregularis*, *Glomus aggregatum* et *Glomus mosseae*) et de phosphates naturels (phosphate naturel de Tilemsi) a permis d'améliorer la croissance du maïs sur le sol de Sangalkam déficient en phosphore assimilable (2,1ppm de P). Des lors, ces bio-fertilisants en association avec les fertilisants minéraux naturels pourraient être recommandés pour améliorer la nutrition phosphatée de bon nombre de sols de culture en substitution aux engrais chimiques en Afrique subsaharienne et plus particulièrement au Mali.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'Agence Universitaire de la Francophonie (AUF), le Programme de Formation de Formateurs (PFF) pour leur soutien financier et le Laboratoire Commun de Microbiologie (LCM) pour l'accueil dans le cadre des travaux pour la réalisation de ce document.

REFERENCES

[1] Alkan N, Gadkar V, Yarden O, Kapulnik Y., 2006- Analysis of quantitative interactions between two species of arbuscular mycorrhizal fungi, *Glomus mosseae* and *G. intraradices*, by Real-Time PCR. *Applied and Environmental Microbiology* 72(6): 4192–4199.

[2] Babana A. H., 2003- Effect of Tilemsi phosphate rock-solubilizing microorganisms on phosphorus uptake and yield of field-grown wheat (*Triticum aestivum* L) in Mali. *Plant and soil* 0:1-8.

[3] Bationo A, Koala S, Ayuk E., 1998- Fertilité des sols pour la production céréalière en zone

sahélo-soudanienne et valorisation des phosphates naturels. *Cahiers Agricultures* 7: 365-371.

[4] Bationo A., Ayuk E., Ballo D. and Koné M., 1997- Agronomie and économie évaluation of Tilemsi phosphate rock in différent agroecological zones of Mali. *Nutrient Cycling Agrosyst.* 48, 179-189.

[5] Boddington CL, Dodd JC., 2000- The effect of agricultural practices on the development of indigenous arbuscular mycorrhizal fungi. I. Field studies in an Indonesian ultisol. *Plant and Soil* 218: 137–144.

[6] Criado, A., 2002. La pénétration du maïs dans les systèmes de cultures céréalières mil-sorgho de la zone Mali sud : analyse en termes de coût d'opportunité et impact sur la sécurité alimentaire. DESS Economie agricole internationale. Paris, DESS Economie agricole internationale, Université Paris Sud XI: 109p.

[7] Diop I, Kane A, Krasova-Wade T, Sanon B K, Hounnandan P, Neyra M, Noba K., 2013- Impacts des conditions pédoclimatiques et du mode cultural sur la réponse du niébé (*Vigna unguiculata* L.Walp.) à l'inoculation endomycorhizienne avec *Rhizophagus irregularis*. *Journal of Applied Biosciences* 69:5465 – 5474. ISSN 1997–5902

[8] Drew EA, Murray RS, Smith SE, Jakobsen I. 2003- Beyond the rhizosphere: growth and function of arbuscular mycorrhizal external hyphae in sands of varying pore sizes. *Plant and Soil* 251: 105–114.

[9] Ekobo CE., 2006- Biodiversité et Gestion Durable des Ressources Génétiques du maïs au Cameroun. Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural. République du Cameroun. 12 p.

[10] FAO., 2010- L'état de l'insécurité alimentaire dans le monde: Combattre l'insécurité alimentaire lors des crises prolongées. Rome, Italie, 63p.

[11] FAOSTAT., 2010- L'état de l'insécurité alimentaire dans le monde: Combattre l'insécurité

- alimentaire lors des crises prolongées. Rome, Italie,
- [12] Graham J H Abbott L K., 2000- Wheat responses to aggressive and nonaggressive arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant and Soil* 220: 207–218.
- [13] Gruhn P, Goletti F, Yudelman M, 2000- Integrated nutrient management, soil fertility, and sustainable agriculture: current issues and future challenges. Food, Agriculture, and the Environment discussion, paper 32, 31P.
- [14] Haro H., Sanon B.K., Diop I., Kane A., Dianda M., Houngnandan P., Neyra Marc, Traore A. 2012- Réponse à l'inoculation mycorrhizienne de quatre variétés de niébé [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.] cultivées au Burkina Faso et au Sénégal. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 6 (5): 2097-2112.
- [15] Jansa J, Smith FA, Smith SE., 2007- Are there benefits of simultaneous root colonization by different arbuscular mycorrhizal fungi? *New Phytologist*, doi: 10.1111/j.1469-8137.2007.02294.x.
- [16] Ndoye F, Kane A, Mangaptché ELN, Bakhoum N, Sanon A, Diouf D, Sy MO, Baudoin E, Noba K, Prin Y. 2012- Changes in land use system and environmental factors affect arbuscular mycorrhizal fungal density and diversity, and enzyme activities in rhizospheric soils of *Acacia senegal* (L.) Willd. *ISRN Ecology*: 13.156: 1050–1057.
- [17] Phillips J, Hayman D. 1970- Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of the British Mycological Society* 55 (1): 158-161.
- [18] Piéri C., 1989- Fertilité des terres de savanes, bilan de 30 ans de recherche et de développement agricoles au sud du Sahara. Ministère de la coopération et IRAD-IRAT, 444p.
- [19] Sacko O., 2014 - Valorisation du Phosphate Naturel de Tilemsi (PNT) par les Champignons endomycorhiziens. Conférences MSAS – Bamako, 03-08 août 2014.
- [20] Smith SE, Jakobsen I, Grønlund M, Smith FA. 2011. Roles of Arbuscular Mycorrhizas in Plant Phosphorus Nutrition: Interactions between Pathways of Phosphorus Uptake in Arbuscular Mycorrhizal Roots Have Important Implications for Understanding and Manipulating Plant Phosphorus Acquisition, *Plant Physi*
- [21] Smith SE, Read DJ. 2008- Mycorrhizal symbiosis, 3rd edn. Academic Press Inc., London, 3rd eds.
- [22] Smith SE, Smith FA, Jakobsen AI. 2004- Functional diversity in arbuscular mycorrhizal (AM) symbioses: the contribution of the mycorrhizal P uptake pathway is not correlated with mycorrhizal responses in growth or total P uptake. *New Phytologist* 162: 511-524.
- [23] Strullu DG. 1991- *Les Mycorhizes des Arbres et des Plantes Cultivées*. Edition Lavoisier.
- [24] Trouvelot A, Kough JL, Gianinazzi-Pearson V. 1986- Mesure du taux de mycorhization VA d'un système racinaire. Recherche de méthodes d'estimation ayant une signification fonctionnelle. *Mycorrhizae : Physiology genetics*: 1-5.
- [25] Truong B., Pichot J., Beunard P., 1977. Caractérisation et comparaison des phosphates naturels tricalciques d'Afrique de l'Ouest en vue de leur utilisation directe en agriculture, *Agron. Trop.* 33, 136–145.