



Original Paper

<http://ajol.info/index.php/ijbcs>

<http://indexmedicus.afro.who.int>

Le champignon arbusculaire *Glomus aggregatum* améliore la nutrition minérale de *Acacia seyal* soumis au stress salin progressif

Anicet MANGA^{1,2*}, Fatimata NDIAYE² et Tahir A. DIOP²

¹Section Productions Végétales et Agronomie, UFR des Sciences Agronomiques, de l'Aquaculture et des Technologies Alimentaires, Université Gaston Berger, BP 234, Saint Louis, Sénégal.

²Laboratoire de Biotechnologies des Champignons, Département de Biologie Végétale, Faculté des Sciences et Techniques, Université Cheikh Anta Diop, Dakar, Sénégal.

*Auteur correspondant ; E-mail : anicet.manga@ugb.edu.sn; Tel. +221 30 100 42 21

RESUME

La salinité demeure un problème majeur pour la fertilité des sols en particulier dans la zone sahélienne. Cependant, de nombreuses études ont prouvé l'efficacité des champignons mycorhiziens arbusculaires à promouvoir la croissance des végétaux soumis au stress salin. Une expérience a été menée en serre pendant 36 semaines avec pour objectif d'étudier le comportement de jeunes plants d'*Acacia seyal* associés ou non au champignon mycorhizien *Glomus aggregatum* en condition de stress salin. Les mesures de la hauteur des tiges, des poids de matière sèche des parties aériennes et racinaires, des teneurs en N, P, K et du taux de mycorhization ont permis de déterminer les effets de l'association mycorhizienne chez les plants testés. Cette étude a montré la capacité pour *Acacia seyal* à former des associations symbiotiques avec *G. aggregatum* malgré l'application du stress salin. Il a été noté chez les plants mycorhizés une amélioration de la tolérance au stress salin se traduisant par une biomasse sèche et des teneurs en N, P et K significativement plus élevées que chez les plants non mycorhizés. Cette étude offre des perspectives intéressantes pour l'inoculation des plants en pépinière par des champignons performants dans les programmes de reboisement des zones menacées par la salinité.

© 2017 International Formulae Group. All rights reserved.

Mots clés : *Acacia seyal*, *Glomus aggregatum*, salinité, champignons arbusculaires.

The fungus *Glomus aggregatum* improves the mineral nutrition of *Acacia seyal* subjected to progressive saline stress

ABSTRACT

Salinity remains a major problem for soil fertility, especially in the Sahelian zone. However, many studies have shown the efficiency of arbuscular mycorrhizal fungi to promote plant growth subjected to salt stress. An experiment was carried out in a greenhouse for 36 weeks to study the behavior of *Acacia seyal* seedlings associated with *Glomus aggregatum* under salt stress conditions. The effects of mycorrhizal association in the tested seedlings were determined by measurements of shoot height, shoot and root dry weight, N, P, K, content and mycorrhization rate. This study showed the ability for *Acacia seyal* to form symbiotic associations with *G. aggregatum* despite the application of salt stress. In mycorrhized plants, it was

© 2017 International Formulae Group. All rights reserved.

DOI : <https://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v11i5.32>

2986-IJBACS

noted an improvement in salt stress tolerance resulting in significantly higher dry biomass and N, P, K content than in non-mycorrhized plants. This study offers interesting prospects for the inoculation of nursery seedlings by high-performance fungi in reforestation programs for areas threatened by salinity.

© 2017 International Formulae Group. All rights reserved.

Keywords: *Acacia seyal*, *Glomus aggregatum*, salinity, arbuscular fungi.

INTRODUCTION

Acacia seyal (Del.) est une plante légumineuse de la famille des Fabaceae largement répandue dans la zone semi-aride de l'Afrique tropicale, depuis le Sénégal jusqu'en Somalie et à la mer Rouge, et du Sud de la vallée du Nil jusqu'à la Zambie (Jøker, 2000).

Au Sénégal, *A. seyal*, plante à usage multiple est caractérisée par une grande capacité à s'adapter à diverses contraintes environnementales, telles que l'aridité et la salinité. Plante productrice de gomme (gomme talha) les feuilles et les gousses sont utilisées comme fourrage de très bonne qualité pour le bétail et les animaux sauvages (Mohammed, 2011).

L'un des facteurs limitant fortement le développement des végétaux dans certaines zones semi-arides est le processus de salinisation des terres. L'impact de la salinité se traduit pour de nombreuses plantes non adaptées ou peu tolérantes par une baisse de leur potentiel végétatif. Cependant, plusieurs espèces végétales comme *A. seyal* ont la capacité de s'associer à des champignons arbusculaires, qui dans les sols semi-arides, constituent l'association symbiotique la plus fonctionnelle (da Silva et al., 2014). Ces champignons s'associent aux racines des végétaux pour contribuer à améliorer l'utilisation de l'eau et des nutriments (Sene et al., 2013 ; Birhrane et al., 2015), spécialement ceux qui ont une faible mobilité dans le sol, et augmentent la tolérance des plantes aux divers stress biotiques et abiotiques (Cavagnaro, 2008; Smith et Read, 2008 ; Saidou et al., 2009 ; Bada et Fagbola, 2014 ; Porcel et al., 2011 ; Lehmann et al., 2014 ; Augé et al., 2015). Plusieurs auteurs ont montré que l'exploitation du potentiel microbiologique des

sols, en particulier celui des champignons mycorhiziens arbusculaires pourrait permettre de favoriser l'adaptation des plantes aux milieux salins (Al-Karaki, 2000 ; Soumaré et al., 2015 ; Lenoir et al., 2016). De nombreux travaux ont démontré l'efficacité des champignons symbiotiques à améliorer la croissance des végétaux sur des sols salés (Manga et al., 2008 ; Ndiaye et al., 2011).

Une meilleure connaissance des relations spécifiques entre plantes et champignons est nécessaire pour une utilisation adéquate de ces microorganismes telluriques. Dans le cas d'*A. seyal*, sa présence dans certaines zones salées au Sénégal pourrait être liée à la capacité de la plante à tolérer certaines doses de sels combinée à une association avec des champignons arbusculaires. D'où l'intérêt d'étudier le rôle de la mycorhization dans la tolérance de cette plante au stress salin.

L'objectif de cette étude a été d'évaluer l'effet d'un champignon arbusculaire, *Glomus aggregatum* isolé au Sénégal sur le comportement à moyen terme de *A. seyal* soumis à une augmentation progressive de la salinité.

MATERIEL ET METHODES

Substrat de culture et inoculum fongique

Le champignon *Glomus aggregatum* utilisé au cours de cette étude provient de la collection du Laboratoire Commun de Microbiologie IRD/ISRA/UCAD de Dakar. L'inoculum a été produit par l'association de spores de *G. aggregatum* avec de jeunes plants de maïs cultivés en pots. Au bout de trois mois de culture, l'inoculum, constitué d'un mélange de spores et de fragments de racines a été collecté par la méthode de

tamassage humide, décrite par Gerdemann et Nicholson (1963).

Le substrat de culture a été prélevé au niveau de la rhizosphère de *A. seyal*, dans la localité de Bambey à l'entrée du Centre National de Recherche Agronomique de Bambey (14° 42' 30'' N, 16° 29' 32'' O) au Centre-Ouest du Sénégal.

Le sol de Bambey est de type sableux avec 3,86% d'argile, 5,52% de limon et 24,9% de sable grossier. La composition physico-chimique de ce sol est : pH = 5,5 ; capacité d'échange cationique (CEC) = 1,78 Meq/100g; rapport C/N = 10 ; quantité de phosphore assimilable (P₂O₅) = 11,5 ppm.

Traitement et pré germination des graines

Les graines d'*A. seyal* utilisées au cours de ces expériences provenaient d'un lot de graines récoltées à maturité dans la localité de Bambey. Elles ont été traitées par scarification chimique à l'acide sulfurique à 95% pendant 30 minutes puis rincées plusieurs fois à l'eau distillée stérilisée, avant d'être immergées dans de l'eau distillée stérilisée pendant deux heures afin de faciliter leur germination. Elles ont été mises à germer dans des boîtes de Petri contenant de l'eau gélosée à 1% puis placées dans une étuve à 28 °C pendant 48 h à l'obscurité.

Semis et inoculation des plants en pépinière

Les graines pré germées d'*A. seyal* ont été semées dans des gaines de culture en plastique munies d'un dispositif de drainage, de contenance 2,5 kg de sol à raison d'un semis par gaine.

Après une semaine de croissance en serre, l'inoculum a été apporté dans le substrat de culture à proximité du système racinaire des jeunes plants de *A. seyal* afin de favoriser la mycorhization. Pour chaque inoculation, une dose de 20 g d'inoculum a été utilisée sous forme de substrat sableux contenant des fragments de racines et des spores de *G. aggregatum*.

La qualité de cet inoculum a été vérifiée à la loupe avant toute application afin d'évaluer la viabilité des spores.

Dispositif expérimental

Les plantes ont été placées suivant un dispositif expérimental totalement randomisé. Les traitements suivants ont été effectués :

- les témoins non inoculés arrosés uniquement avec de l'eau déminéralisée durant toute l'expérience (T) ;
- les plants non inoculés arrosés avec des taux de salinité croissants (NaCl) ;
- les plants inoculés avec *G. aggregatum* sans addition de NaCl (Ga) ;
- les plants inoculés avec *G. aggregatum* et arrosés avec des taux de salinité croissants (Ga + NaCl).

Un total de quatre traitements a été effectué à raison de 35 répétitions par traitement soit 140 unités expérimentales.

Pendant les premières semaines de culture (de la 1^{ère} à la 7^{ème} semaine), l'arrosage des plantes s'est fait avec de l'eau déminéralisée. A partir de la 8^e semaine de culture, les arrosages avec de l'eau contenant du chlorure de sodium (100 ml de NaCl de concentration 275 mM/plante) ont été effectués. Les apports de solution saline ont été effectués une fois toutes les quatre semaines jusqu'à la fin de l'expérience, permettant ainsi une élévation progressive du niveau de salinité dans le substrat de culture.

L'expérience s'est étalée sur 36 semaines. Les plantes ont été régulièrement arrosées en recevant 100 ml de solution nutritive tous les 15 jours.

À partir de la 12^e semaine jusqu'à la fin de l'expérience, cinq plants par traitement ont été récoltés toutes les quatre semaines et les paramètres suivants ont été mesurés : le poids de matière sèche, la teneur en éléments minéraux et les paramètres de mycorhization.

Paramètres mesurés

Croissance : des mesures de longueur des parties aériennes des plantes ont été effectuées pendant les 12 premières semaines de l'expérience.

Poids : à partir de la 12^e semaine de croissance, les parties aériennes et racinaires de cinq plants par traitement sont récoltés toutes les quatre semaines et mises à l'étuve

pendant 72 heures à 70 °C afin de déterminer le poids de la matière sèche.

Mycorhization : L'analyse repose sur l'observation de trente fragments fins (1 cm de longueur) du système racinaire, prélevés aléatoirement, colorés au bleu trypan (Phillips et Hayman, 1970), puis examinés au microscope. La détermination de la fréquence et de l'intensité de la mycorhization (Trouvelot, 1986) est faite par une notation des fragments, suivant un barème de classe. Ce dernier permet d'estimer rapidement le degré d'infection mycorhizienne de chaque fragment au moyen de six classes notées de 0 à 5.

Nutrition minérale : à partir de la 12^{ème} semaine de culture, des analyses chimiques des échantillons obtenus par broyage des parties aériennes et racinaires récoltées et séchées ont été réalisées. Différentes méthodes ont permis de déterminer par rapport à la moyenne pondérale des plants la teneur en éléments minéraux tels que le phosphore (Murphy and Riley, 1962), l'azote (Keeney and Nelson, 1982), le sodium et le potassium par absorption atomique.

Traitement des données

Le logiciel R v2.15.3 (R Development Core Team, 2013) a été utilisé pour le traitement statistique des données. Des analyses de variances et des comparaisons de moyennes ont été réalisées sur la longueur des parties aériennes, la biomasse des parties aériennes et racinaires, la teneur en éléments minéraux des plantes et le taux de mycorhization.

RESULTATS

Croissance des plants

Durant les sept premières semaines de culture, et pour chaque période de mesure, les longueurs entre plants de *A. seyal* inoculés avec *G. aggregatum* et non inoculés n'ont pas montré de différences significatives.

Cependant, à la fin de la 7^{ème} semaine, l'application d'un stress salin progressif a montré un ralentissement de la croissance chez les plants non inoculés une semaine après l'application du NaCl. Ce ralentissement a été cependant moins marqué chez les plants

inoculés (Figure 1). Ainsi, à la 12^{ème} semaine de culture, il a été noté chez les plants non soumis au stress salin une taille moyenne de 22,15 cm ; tandis que ceux soumis au stress salin ont eu une moyenne de taille de 20,77 cm.

La taille des plants inoculés soumis au stress salin a été inférieure à celle des plants inoculés non soumis au stress à la 12^{ème} semaine de culture avec respectivement 21,23 cm et 22,17 cm même si aucune différence significative n'a été notée.

Quantification des biomasses aériennes et racinaires

Les mesures aussi bien pour la biomasse des parties aériennes que racinaires ont indiqué une évolution irrégulière caractérisée par des périodes de baisse et d'augmentation du poids de matière sèche. Concernant les parties aériennes, cette évolution en « dents-de-scie » du poids de matière sèche correspond à des périodes de défoliation suivies de régénérations qui aboutissent à l'apparition de nouvelles feuilles. Chez les plants inoculés n'ayant pas subi de stress, la baisse du poids de la matière sèche des parties aériennes a été très marquée à partir de la 20^{ème} semaine de culture. Cette baisse est suivie d'une régénération des feuilles tout aussi rapide se traduisant par une nouvelle hausse du poids de biomasse sèche.

D'une manière générale, les plants mycorhizés ont été moins affectés par l'augmentation de la salinité que les plants non mycorhizés (Figure 2). Ainsi, l'inoculation par *G. aggregatum* a permis une légère augmentation de la biomasse sèche pour les parties aériennes. Cette augmentation de biomasse sèche a été légèrement inférieure chez les plants ayant subi un stress salin progressif. Par contre, les plants non inoculés ont eu des poids de matière sèche nettement inférieurs particulièrement pour ceux soumis stress salin.

L'inoculation par *G. aggregatum* a stimulé le développement de la biomasse des parties aériennes des plants sous stress salin à partir de la 28^{ème} semaine même si au départ il

n'y avait pas de différences significatives entre plants inoculés et non inoculés (Figure 3).

Tout comme la biomasse des parties aériennes, la biomasse des parties racinaires a montré également une évolution très irrégulière. En effet, les plants inoculés sous stress salin progressif ont eu une augmentation notable de leur biomasse racinaire avec l'augmentation de la sévérité du stress dépassant celle des autres traitements. Par contre, les plants non inoculés soumis au stress salin ont présenté le poids de matière sèche racinaire le plus faible (Figure 4).

À la 36^e semaine de culture, des différences significatives ont été notées entre les poids de matière sèche des plants inoculés et non inoculés. Les poids de matière sèche des plants inoculés ont été plus élevés tant au niveau de la biomasse aérienne que racinaire.

Nutrition minérale

La composition minérale en N, P et K des plants a varié en fonction du temps et du traitement apporté aux plants.

À la 12^e semaine de culture (Tableau 1), aucune différence significative dans la teneur minérale en N et P n'a été notée tant sur les parties aériennes que racinaires. La teneur en K a montré des valeurs significativement plus élevées chez les parties aériennes des témoins et des plants inoculés avec *G. aggregatum*.

À la 16^e semaine (Tableau 2), la teneur en N a été significativement plus élevée chez les plants inoculés sans addition de NaCl aussi bien sur les parties aériennes (8,32 mg) que sur les racines (8,89 mg). Le P des parties aériennes a montré également la même tendance chez les plants inoculés sans addition de NaCl (0,42 mg de P) et chez les racines des témoins (0,44 mg de P) et inoculés sans addition de NaCl (0,52 mg de P). Les teneurs en K n'ont pas été significativement différentes chez les parties aériennes quel que soit le traitement avec une teneur moyenne de 1,65 mg de K. Chez les racines, des teneurs en K significativement plus élevées (6,86 mg)

ont été notées chez les plants inoculés sans addition de NaCl.

À la 20^e semaine (Tableau 3), la mesure de la teneur en N des parties aériennes n'a pas montré pas de différences significatives entre traitements avec une teneur moyenne de 6,10 mg de N. Chez les racines des témoins, des teneurs en N significativement plus élevées (13,07 mg) ont été observées par rapport aux plants inoculés croissant sur substrats contenant du NaCl (6,58 mg de N). Les parties aériennes et racinaires ont eu des teneurs en P significativement plus élevées que dans les autres traitements avec respectivement 0,45 mg et 0,63 mg. La teneur en K des parties aériennes des plants inoculés sans addition de NaCl a été significativement plus élevée (3,40 mg de K) que les teneurs observées pour les autres traitements. Concernant les racines, les teneurs en K des plants inoculés (5,36 mg) et non inoculés (5,49 mg) sans addition de NaCl ont été significativement plus élevées que pour les traitements ayant reçu des doses de NaCl.

À la 24^e semaine (Tableau 4), la teneur en azote des parties aériennes a été significativement plus élevée chez les témoins (5,14 mg de N). Aucune différence significative n'a été notée sur la teneur en N et K chez les racines quel que soit le traitement avec une teneur moyenne de 8,3 mg pour le N, et de 3,75 mg pour le K. La teneur en P des parties aériennes des plants inoculés sans addition de NaCl (0,17 mg de P) a été significativement plus élevée que celle des témoins (0,12 mg de P) et des plantes non inoculées avec addition de NaCl (0,09 mg de P). La teneur en P des racines a été significativement plus élevée chez les plants inoculés sans addition de NaCl (0,43 mg) comparés aux autres traitements. Concernant les parties aériennes, les teneurs ont été plus élevées chez les témoins (1,38 mg) et les plants inoculés sans NaCl (1,31 mg) comparées aux plants non inoculés avec addition de NaCl (0,78 mg).

À la 28^e semaine (Tableau 5), les teneurs N des parties aériennes ont été significativement plus élevées chez les témoins (6,28 mg) et les plants inoculés sans NaCl (5,75 mg). Aucune différence significative n'a été notée ($p < 0,05$) entre les teneurs en N des différents traitements chez les racines qui ont en moyenne 9,57 mg de N. Les teneurs en P ont été significativement plus élevées aussi bien chez les parties aériennes que chez les racines des plants inoculés sans addition de NaCl avec respectivement 0,32 mg et 0,53 mg. Les teneurs en K les plus élevées ont été notées également chez parties aériennes des plantes inoculées sans NaCl (2,45 mg) et les témoins sans NaCl (1,63 mg). Les racines présentant les teneurs en K significativement plus élevées sont notées chez les parties aériennes des plantes non inoculées soumises au stress salin (5,33 mg de K) et des témoins sans NaCl (5,19 mg de K).

À la 32^e semaine de culture (Tableau 6), la teneur en N des parties aériennes a été significativement plus élevée chez les plants témoins sans NaCl (7,55 mg) comparée aux plantes non inoculées chez lesquelles il y a eu addition de NaCl (2,71 mg). La présence du champignon permet de maintenir des teneurs moyennes de 6,58 mg de N par rapport aux plants qui ont reçu du NaCl. Chez les racines, aucune différence significative n'a été notée sur la teneur en N quel que soit le traitement avec une teneur moyenne de 10,05 mg de N. La teneur en P chez les parties aériennes a été significativement plus élevée chez les plantes inoculées sans addition de NaCl (0,36 mg) comparée aux plantes non inoculées soumises au stress salin (0,07 mg). Chez les racines, des teneurs en P significativement plus élevées sont également notées chez les plants inoculés sans addition de NaCl (0,49 mg) comparés aux plantes non inoculées soumises au stress salin (0,15 mg). Il n'existe pas de différences significatives entre les valeurs de teneur en K chez les racines avec en moyenne 4,41 mg de P. Par contre, chez les parties aériennes, les témoins (1,96 mg de K), les plantes inoculées sans NaCl (2,73 mg de K) et celles soumises

au stress salin (2,01 mg de K) ont eu des teneurs significativement différentes des plantes non inoculées et soumises au stress salin (0,61 mg de K).

À la 36^e semaine de culture (Tableau 7), une bonne nutrition minérale en N, P et K a été généralement observée pour les parties aériennes et racinaires chez les plants inoculés soumis ou non au stress salin.

Concernant le N, des teneurs significativement plus élevées ont été notées chez les parties aériennes des plants inoculés sans apport de NaCl (12,63 mg de N) et avec apport de NaCl (12,64 mg de N). La même tendance est notée dans la teneur en N des racines avec respectivement 10,75 et 11,08 mg de N. La teneur en P aussi bien chez les parties aériennes que chez les racines est significativement plus élevée chez les plants inoculés avec ou sans addition de NaCl. Par contre, aucune différence significative n'a été notée ($p < 0,05$) dans la teneur en K des racines qui ont une moyenne de 3,95 mg de K. Les parties aériennes chez les plants inoculés sans addition de NaCl (5,38 mg de K) et avec addition de NaCl (0,39 mg de K) ont eu des teneurs plus élevées comparées aux témoins sans NaCl (1,15 mg de K) et aux plantes avec NaCl (1,34 mg de K).

Influence sur la mycorhization

Les observations des fragments de racines colorés des différents traitements ont montré l'absence de colonisation chez les plants non inoculés. Par contre, la mycorhization était présente à des degrés divers chez les plants inoculés (Tableau 8). Les plants inoculés soumis au stress salin ont eu des intensités et des fréquences de colonisation généralement moins importantes que ceux n'ayant pas subi de stress salin. Chez les plants soumis ou non au stress salin, l'intensité de colonisation a augmenté régulièrement jusqu'à la 20^e semaine avec respectivement 13,03% et 7,67% avant de baisser à partir de la 24^e semaine de culture à un niveau très bas (4,27% et 1,63%). La persistance du stress salin a induit des différences significatives ($p < 0,05$) dans le degré de colonisation par le champignon à la 36^e semaine de culture entre les plantes subissant les effets du stress (2,90%) et celles non stressées (31,57%).

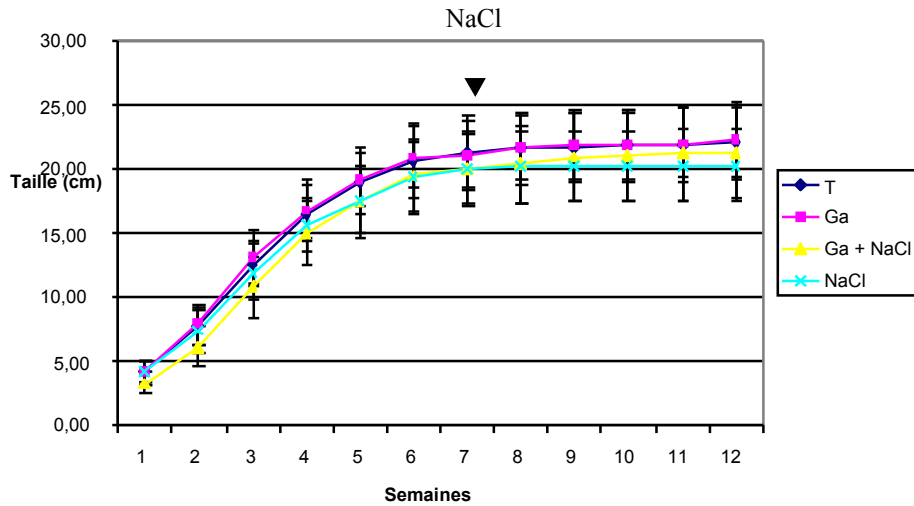


Figure 1: Evolution de la croissance des plants d'*Acacia seyal* inoculés ou non et soumis à un stress salin.

T : *A. seyal* non inoculés ; Ga : *A. seyal* inoculés avec *G. aggregatum* ; Ga + NaCl : *A. seyal* inoculés avec *G. aggregatum* sous stress salin progressif ; NaCl : *A. seyal* non inoculés sous stress salin progressif. Les barres verticales représentent les écarts-types à la moyenne.



Figure 2 : Signes de chocs chez des plants d'*A. seyal* soumis à un stress salin après 36 semaines de culture.

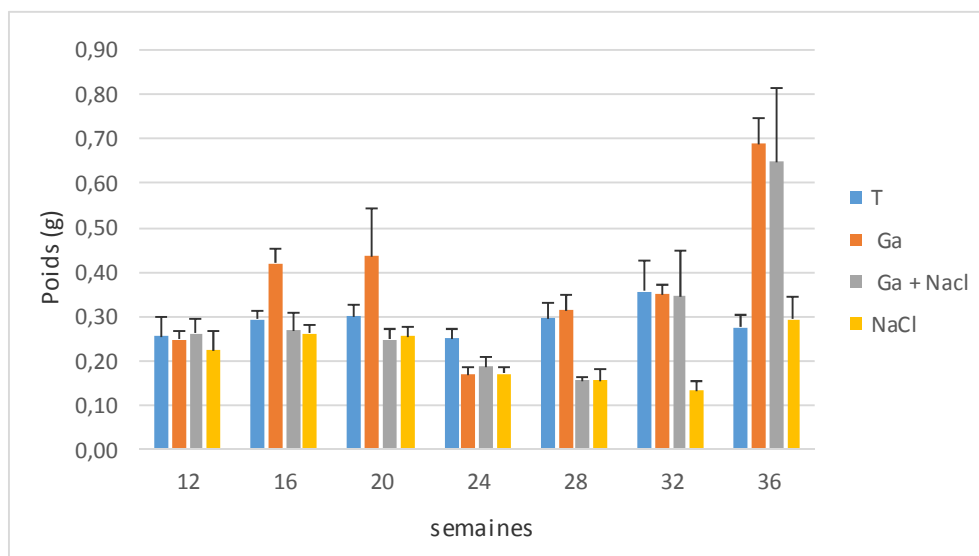


Figure 3 : Evolution de la biomasse sèche des parties aériennes d'*A. seyal* inoculés ou non en fonction du temps et du stress salin. T : *A. seyal* non inoculés ; Ga : *A. seyal* inoculés avec *G. aggregatum* ; Ga + NaCl : *A. seyal* inoculés avec *G. aggregatum* sous stress salin progressif ; NaCl : *A. seyal* non inoculés sous stress salin progressif. Les barres verticales représentent les écarts-types à la moyenne.

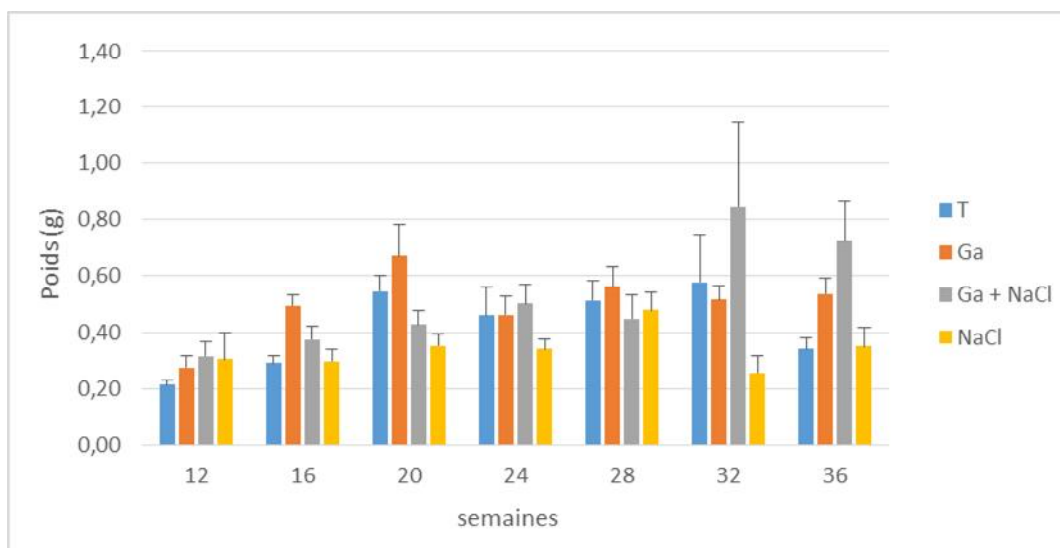


Figure 4 : Evolution de la biomasse sèche racinaire d'*A. seyal* inoculés ou non en fonction du temps et du stress salin. T : *A. seyal* non inoculés ; Ga : *A. seyal* inoculés avec *G. aggregatum* ; Ga + NaCl : *A. seyal* inoculés avec *G. aggregatum* sous stress salin progressif ; NaCl : *A. seyal* non inoculés sous stress salin progressif. Les barres verticales représentent les écarts-types à la moyenne.

Tableau 1: Statut minéral des parties aériennes et racinaires d'*A. seyal* à la 12^e semaine.

	N (mg/plante)		P (mg/plante)		K (mg/plante)		Apport en NaCl (mM)
	P.A	R	P.A	R	P.A	R	
Témoins	5,88 ^a	3,23 ^a	0,142 ^a	0,80 ^a	1,78 ^b	2,96 ^a	
<i>G. aggregatum</i>	5,22 ^a	5,07 ^a	0,172 ^a	0,17 ^a	1,86 ^b	4,26 ^a	
G. a + NaCl	5,18 ^a	4,96 ^a	0,141 ^a	0,16 ^a	1,39 ^{ab}	3,18 ^a	275
NaCl	4,24 ^a	4,89 ^a	0,129 ^a	0,16 ^a	1,03 ^a	2,99 ^a	275

Tableau 2: Statut minéral des parties aériennes et racinaires d'*A. seyal* à la 16^e semaine.

	N (mg)		P (mg)		K (mg)		Apport en NaCl (mM)
	P.A	R	P.A	R	P.A	R	
Témoins	6,04 ^a	5,20 ^a	0,21 ^a	0,44 ^b	1,43 ^a	4,32 ^a	
<i>G. aggregatum</i>	8,32 ^b	8,89 ^b	0,42 ^b	0,52 ^b	2,73 ^a	6,86 ^b	
G. a + NaCl	5,09 ^a	5,94 ^a	0,20 ^a	0,26 ^a	1,29 ^a	3,50 ^a	275
NaCl	4,98 ^a	4,26 ^a	0,15 ^a	0,28 ^a	1,15 ^a	2,92 ^a	275

Tableau 3: Statut minéral des parties aériennes et racinaires d'*A. seyal* à la 20^e semaine

	N (mg)		P (mg)		K (mg)		Apport en NaCl (mM)
	P.A	R	P.A	R	P.A	R	
Témoins	6,36 ^a	11,15 ^{bc}	0,14 ^a	0,31 ^a	1,65 ^a	5,49 ^b	
<i>G. aggregatum</i>	7,98 ^a	13,07 ^c	0,45 ^b	0,63 ^b	3,40 ^b	5,36 ^b	
G. a + NaCl	4,84 ^a	6,58 ^a	0,21 ^a	0,23 ^a	1,44 ^a	2,45 ^a	275
NaCl	5,21 ^a	7,33 ^{ab}	0,13 ^a	0,20 ^a	1,17 ^a	3,93 ^{ab}	275

Tableau 4: Statut minéral des parties aériennes et racinaires d'*A. seyal* à la 24^e semaine.

	N (mg)		P (mg)		K (mg)		Apport en NaCl (mM)
	P.A	R	P.A	R	P.A	R	
Témoins	5,14 ^b	9,43 ^a	0,12 ^{ab}	0,26 ^a	1,38 ^b	4,65 ^a	
<i>G. aggregatum</i>	3,07 ^a	9,01 ^a	0,17 ^c	0,43 ^b	1,31 ^b	3,70 ^a	
G. a + NaCl	3,63 ^a	7,68 ^a	0,16 ^{bc}	0,27 ^a	1,08 ^{ab}	2,86 ^a	275
NaCl	3,49 ^a	7,08 ^a	0,09 ^a	0,20 ^a	0,78 ^a	3,80 ^a	275

Tableau 5: Statut minéral des parties aériennes et racinaires d'*A. seyal* à la 28^e semaine.

	N (mg)		P (mg)		K (mg)		Apport en NaCl (mM)
	P.A	R	P.A	R	P.A	R	
Témoins	6,28 ^b	10,54 ^a	0,14 ^a	0,29 ^a	1,63 ^b	5,19 ^b	
<i>G. aggregatum</i>	5,75 ^b	10,92 ^a	0,32 ^b	0,53 ^b	2,45 ^c	4,80 ^{ab}	
G. a + NaCl	3,04 ^a	6,89 ^a	0,13 ^a	0,24 ^a	0,91 ^a	2,57 ^a	275
NaCl	3,20 ^a	9,94 ^a	0,08 ^a	0,27 ^a	0,72 ^a	5,33 ^b	275

Tableau 6: Statut minéral des parties aériennes et racinaires d'*A. seyal* à la 32^e semaine.

	N (mg)		P (mg)		K (mg)		Apport en NaCl (mM)
	P.A	R	P.A	R	P.A	R	
Témoins	7,55 ^b	11,85 ^a	0,17 ^{ab}	0,33 ^{ab}	1,96 ^b	5,84 ^a	
<i>G. aggregatum</i>	6,41 ^{ab}	10,06 ^a	0,36 ^c	0,49 ^b	2,73 ^b	4,13 ^a	
G. a + NaCl	6,75 ^{ab}	12,94 ^a	0,29 ^{bc}	0,46 ^{ab}	2,01 ^b	4,82 ^a	275
NaCl	2,71 ^a	5,34 ^a	0,07 ^a	0,15 ^a	0,61 ^a	2,86 ^a	275

Tableau 7: Statut minéral des parties aériennes et racinaires d'*A. seyal* à la 36^e semaine.

	N (mg)		P (mg)		K (mg)		Apport en NaCl (mM)
	P.A	R	P.A	R	P.A	R	
Témoins	5,81 ^a	7,01 ^a	0,13 ^a	0,20 ^a	1,15 ^a	3,45 ^a	
<i>G. aggregatum</i>	12,63 ^b	10,45 ^b	0,70 ^b	0,50 ^b	5,38 ^b	4,29 ^a	
G. a + NaCl	12,64 ^b	11,08 ^b	0,55 ^b	0,39 ^b	3,76 ^b	4,13 ^a	275
NaCl	5,99 ^a	7,29 ^a	0,15 ^a	0,20 ^a	1,34 ^a	3,91 ^a	275

Pour les tableaux 1 à 7, sur une même colonne, les chiffres suivis d'une même lettre ne présentent pas de différences significatives à $p < 0,05$ (test de Newman-Keuls).
PA = Parties aériennes ; R = Racines.

Tableau 8 : Evolution de la mycorhization des plants d'*A. seyal* en présence ou non de NaCl.

	Intensités (%)							Fréquences (%)						
	Semaines													
	12	16	20	24	28	32	36	12	16	20	24	28	32	36
G a	6,40 ^a	16,90 ^{abc}	13,03 ^{ab}	4,27 ^a	8,90 ^a	17,40 ^{abc}	31,57 ^c	43,33 ^{abc}	46,67 ^{bc}	53,33 ^c	46,67 ^{bc}	43,33 ^{abc}	56,67 ^c	83,33 ^a
Ga + NaCl	6,63 ^a	30,17 ^{bc}	7,67 ^a	1,63 ^a	6,13 ^a	7,00 ^a	2,90 ^a	23,33 ^a	26,67 ^{ab}	30,00 ^{ab}	40,00 ^{abc}	40,00 ^{abc}	40,00 ^{abc}	56,67 ^c

Sur une même colonne, les chiffres suivis d'une même lettre ne présentent pas de différences significatives à $P < 0,05$ (test de

DISCUSSION

Le choix du partenaire fongique pourrait être d'une grande importance pour l'amélioration de la tolérance au stress salin des plantes. La comparaison des biomasses aériennes et racinaires indique chez les plants inoculés sous stress salin une atténuation de l'effet du sel sur le développement des plantes. Ce qui pourrait être dû en particulier à un effet du champignon dont la présence pourrait aider la plante à mieux supporter les effets du stress par la stimulation du développement racinaire permettant ainsi à la plante d'améliorer sa nutrition hydrominérale.

Haro et al., 2015 ont montré que le champignon arbusculaire *G. aggregatum* pouvait améliorer de façon significative la croissance de la variété de niébé K VX au stade floraison-fructification. Une étude sur les effets de deux champignons arbusculaires (*Glomus deserticola* et *Glomus* sp) sur la laitue avait conduit Ruiz-Lozano et Azcon (2000) à conclure que les mécanismes par lesquels *Glomus* sp protège les plantes des effets négatifs du sel seraient basés sur la stimulation du développement racinaire, tandis que les effets de *Glomus deserticola* s'appuieraient sur l'amélioration de la nutrition des plantes particulièrement pour l'azote et le phosphore.

Une autre comparaison qui paraît intéressante est celle constatée entre les mesures de taille et celles des biomasses. Si les tailles moyennes entre plants inoculés et non inoculés sont sensiblement les mêmes, nous constatons que la biomasse des plants inoculés est beaucoup plus importante que celle des plants non inoculés qui ont un aspect plus frêle. L'amélioration de la productivité et de la biomasse des plantes mycorhizées a été souvent attribuée à une meilleure absorption de l'eau et des nutriments (Augé, 2004).

Chez les plantes associées aux champignons arbusculaires, ces derniers étendent leur réseau d'hyphes au-delà de la zone d'absorption racinaire favorisant l'exploration d'un plus grand volume de sol que le système racinaire seul (Mohammadi et

al., 2011 ; Cavagnaro et al., 2015). Ce qui pourrait favoriser l'absorption de divers nutriments comme P, Zn, N, Cu et K (Cavagnaro, 2008 ; Finlay, 2008 ; Bienders et al., 2010 ; Lehmann et al., 2014). Les champignons arbusculaires du genre *Glomus* sont caractérisés par une large diversité se traduisant par un effet différentiel dans le prélèvement de certains éléments minéraux tels que le phosphore (Munkvold et al., 2004). L'utilisation d'une plus grande diversité de champignons pourrait donc du point de vue fonctionnel aboutir à des réponses physiologiques variables suivant le type d'association symbiotique.

Les résultats montrent des teneurs en P et K plus élevées chez les plants mycorhizés par *G. aggregatum* non soumis au stress salin. La capacité des champignons arbusculaires à améliorer la nutrition des plantes pourrait favoriser une meilleure tolérance aux divers stress environnementaux subis par les plantes. Pour ce qui concerne le P, des travaux récents ont montré que la symbiose des plantes avec les champignons arbusculaires induisait l'expression de transporteurs spécifiques de P et de N (Xie et al., 2013; Walder et al., 2015). Par contre, l'impact de la symbiose mycorhizienne sur le prélèvement de K a permis de démontrer que son accumulation chez les plantes était lié à une amélioration de la tolérance de ces dernières à la salinité et à la sécheresse (Garcia and Zimmermann, 2014).

Dans des conditions environnementales salines, en plus d'améliorer la nutrition, les champignons arbusculaires améliorent la capacité d'absorption de l'eau par les plantes grâce à l'augmentation de la conductivité hydrique et le maintien de l'osmolarité des racines (Augé, 2001).

Concernant la mycorhization des plants, une baisse de l'intensité de colonisation racinaire est suivie peu après par une chute de la biomasse aérienne et racinaire à partir de la 28^e semaine, ce qui pourrait être dû à l'influence négative de la présence de NaCl sur la symbiose.

Certains auteurs (Yano-Melo et al., 2003) ont montré que la durée de l'expérience pouvait affecter la réponse de l'hôte à la colonisation par des champignons mycorrhiziens. Ils ont démontré que lorsque les champignons mycorrhiziens étaient inoculés dans des sols salés, il y avait une forte demande en énergie pour la survie, entraînant une activation rapide du champignon et favorisant l'accroissement des éléments nutritifs et la tolérance de la plante hôte au stress. La comparaison avec les évolutions de biomasse aérienne et racinaire nous indique que cette chute d'intensité de colonisation coïncide avec une période de défoliation des parties aériennes et une baisse sensible de la biomasse sèche racinaire.

Conclusion

Cette étude en serre a montré chez les plants inoculés avec le champignon arbusculaire *G. aggregatum* une amélioration de la tolérance au sel (NaCl). L'effet de l'association symbiotique entre *A. seyal* et *G. aggregatum* en présence de NaCl a abouti à une amélioration significative de la biomasse des plantes et de leur teneur en N, P et K. Cependant, il serait intéressant d'étendre cette étude à une plus grande diversité de champignons symbiotiques afin de définir les couples symbiotiques les plus performants et de mieux valoriser le potentiel microbiologique des sols.

CONFLITS D'INTÉRÊTS

Les auteurs déclarent qu'ils n'y a aucun conflit d'intérêts pour cet article.

CONTRIBUTIONS DES AUTEURS

TAD et FN ont mis en place de l'expérimentation et correction du manuscrit AM a mis en place et conduite de l'expérimentation, collecte et traitement des données, rédaction du manuscrit.

REFERENCES

- Al-Karaki GN. 2000. Growth of mycorrhizal tomato and mineral acquisition under salt stress. *Mycorrhiza*, **10**: 51–54. DOI: <https://doi.org/10.1007/s005720000055>
- Augé RM. 2001. Water relations, drought and vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Mycorrhiza*, **11**: 3–42. DOI : <http://dx.doi.org/10.1007/s005720100097>.
- Augé RM. 2004. Arbuscular mycorrhizae and soil/plant water relations. *Can. J. Soil Sci.*, **84**: 373–381. DOI: <https://doi.org/10.4141/S04-002>
- Augé RM, Toler HD, Saxton AM. 2015. Arbuscular mycorrhizal symbiosis alters stomatal conductance of host plants more under drought than under amply watered conditions: a meta-analysis. *Mycorrhiza*, **25**: 13–24. DOI : [10.1007/s00572-014-0585-4](https://doi.org/10.1007/s00572-014-0585-4)
- Bada BS, Fagbola O. 2014. Effects of arbuscular mycorrhiza and composted market waste on the performance of Tiannug 1 variety of kenaf (*Hibiscus cannabinus* Linn.). *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **8**(3): 1151-1164. DOI : <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v8i3.27>
- Bielders CL, Dahiratou I, Maimouna G. 2010. Contribution of arbuscular mycorrhizal fungi to pearl millet [*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.] nutrition on Sahelian acid sandy soils at various levels of soil degradation. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **4**(4): 924-938. DOI: <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v4i4.62974>
- Birhane E, Kuyper TW, Sterck FJ, Gebrehiwot K, Bongers F. 2015. Arbuscular mycorrhiza and water and nutrient supply differently impact seedling performance of dry woodland species with different acquisition strategies. *Plant Ecol Divers.*, **8**(3): 1-13. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/17550874.2014.992488>
- Cavagnaro TR. 2008. The role of arbuscular mycorrhizas in improving plant zinc

- nutrition under low soil zinc concentrations. *Plant Soil*, **304**: 315-325. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9559-7>
- Cavagnaro TR, Franz Bender S, Asghari HR, van der Heijden MG. 2015. The role of arbuscular mycorrhizas in reducing soil nutrient loss. *Trends Plant Sci.*, **20**: 283-290. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anres.2016.06.004>
- da Silva IR, de Mello CMA, Neto RAF, da Silva DKA, de Melo AL, Oehl F, Maia, LC. 2014. Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi along an environmental gradient in the Brazilian semiarid. *Appl. Soil Ecol.*, **84**, 166-175. DOI : [10.1016/j.apsoil.2014.07.008](https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2014.07.008).
- Finlay RD. 2008. Ecological aspects of mycorrhizal symbiosis: with special emphasis on the functional diversity of interactions involving the extraradical mycelium. *J. Exp. Bot.*, **59**: 1115-1126. DOI : <https://doi.org/10.1093/jxb/ern059>
- Garcia K, Zimmermann S D. 2014. The role of mycorrhizal associations in plant potassium nutrition. *Front. Plant Sci.*, **5**:337. DOI: [10.3389/fpls.2014.00337](https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00337)
- Gerdemann JW, Nicholson TH. 1963. Spores of mycorrhizal Endogone species extracted from soil by wet sieving and decanting. *Trans. Br. Mycol. Soc.*, **46**: 235-244. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(63\)80079-0](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(63)80079-0)
- Haro H, Sanon KB, Krasova-Wade T, Kane A, NDoye I, Traore AS. 2015. Réponse à la double inoculation mycorrhizienne et rhizobienne du niébé (variété, K VX396-4-5-2D) cultivé au Burkina Faso. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **9**(3): 1485-1493 DOI: <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v9i3.31>
- Jøker D. 2000. *Acacia seyal* Del. Danida Forest Center. Seed Leaflet N° 34.
- Keeney DR, Nelson DW. 1982. Nitrogen-inorganic forms. In *Methods of Soil Analysis* (Part 2). Page AL, Miller RH, Keeney DR (Eds). American Society of Agronomy, Madison, WI; 643-698.
- Lehmann A, Stavros DV, Leifheit EF, Rillig MC. 2014. Arbuscular mycorrhizal influence on zinc nutrition in crop plants: a meta-analysis. *Soil Biol. Biochem.*, **60**: 123-131. DOI : <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.11.001>
- Lenoir I, Fontaine J, Sahraoui AL. 2016. Arbuscular mycorrhizal fungal responses to abiotic stresses: A review. *Phytochemistry*, **123**: 4-15. DOI : [10.1016/j.phytochem.2016.01.002](https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2016.01.002)
- Manga A, Ndiaye F, Sow HA, Diop TA. 2008. Influence du chlorure de sodium sur la croissance, la nutrition minérale et la mycorrhization de *Acacia seyal*. *Journal des Sciences et Technologies*, **7**(1) : 11-20
- Mohammadi K, Khalesro S, Sohrabi Y, Heidari G. 2011. A review: beneficial effects of the mycorrhizal fungi for plant growth. *J. Appl. Environ. Biol. Sci.*, **1**(9): 310-319.
- Mohammed HM. 2011. *Management of Natural Stands of Acacia Seyal Del. Variety Seyal (Brenan) for Production of Gum Talha*, TUD press: Verlag der Wissenschaften. South Kordofan, Sudan; 111
- Munkvold L, Kjoller R, Vestberg M, Rosendahl S, Jakobsen I, 2004. High functional diversity within species of arbuscular mycorrhizal fungi. *New Phytol.*, **164**: 357-364. DOI: [10.1111/j.1469-8137.2004.01169.x](https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01169.x)
- Murphy J, Riley JP. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal Chim. Acta*, **27**: 31-36. DOI: [10.1016/S0003-2670\(00\)88444-5](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(00)88444-5)
- Ndiaye M, Cavalli E, Manga AGB, Diop TA. 2011. Improved *Acacia senegal* growth after inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi under water deficiency conditions. *Int. J. Agric. Biol.*, **13**(2): 271-274. DOI: [10-343/AJL/2011/13-2-271-274](https://doi.org/10.343/AJL/2011/13-2-271-274)
- Phillips JM, Hayman DS. 1970. Improved procedures for clearing and staining

- parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Trans. Br. Mycol. Soc.*, **55**: 158–161. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0007-1536\(70\)80110-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0007-1536(70)80110-3)
- Porcel R., Aroca R., Ruiz-Lozano JM. 2011. Salinity stress alleviation using arbuscular mycorrhizal fungi. A review. *Agron. Sustain. Dev.*, **32**: 181–200. DOI: [10.1007/s13593-011-0029-x](https://doi.org/10.1007/s13593-011-0029-x)
- Ruiz-Lozano JM, Azcon R. 2000. Symbiotic efficiency and infectivity of an autochthonous arbuscular mycorrhizal *Glomus sp.* from saline soils and *Glomus deserticola* under salinity. *Mycorrhiza*, **10**: 137–143. DOI : <https://doi.org/10.1007/s005720000075>
- Saidou A, Kossou D, Azontonde A, Hougni D-G JM. 2009. Effet de la nature de la jachère sur la colonisation de la culture subséquente par les champignons endomycorhiziens : cas du système ‘jachère’ manioc sur sols ferrugineux tropicaux du Bénin. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* **3**(3): 587-597. DOI: <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v3i3.45330>
- Sene G, Thiao M, Manga A, Sene S, Khasa D, Kane A, Mbaye MS, Samba-Mbaye R, Sylla SN. 2013. The use of forest plantations in the semiarid Sahel regions: impacts of the abundance and diversity of soil legume – nodulating rhizobia and arbuscular mycorrhizal fungal communities. In *Plantations: Biodiversity, Carbon Sequestration and Restoration*. Nova Science Publishers, Inc, New York; 33 – 51.
- Smith SE, Read DJ. 2008. *Mycorrhizal Symbiosis*, (3rd Edn). Academic; London.
- Soumaré A, Diop T, Manga A, Ndoye I. 2015. Role of arbuscular mycorrhizal fungi and nitrogen fixing bacteria on legume growth under various environmental stresses. *Int. J. Biosci.*, **7**(4): 31-46. DOI: <http://dx.doi.org/10.12692/ijb/7.4.31-46>
- Trouvelot A, Kough JL, Gianinazzi-Pearson V. 1986. Mesure du taux de mycorrhization VA d'un système racinaire. Recherche de méthodes d'estimation ayant une signification fonctionnelle. *Mycorrhizae : Physiology and genetics*. ESM Dijon, 1-5 July 1985, INRA, Paris.
- Walder F, van der Heijden MGA. 2015. Regulation of resource exchange in the arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Nat. Plants*, **1**: 15159. DOI: <http://dx.doi.org/2615476610.1038/nplants.2015.159>
- Xie X, Huang W, Liu F, Tang N, Liu Y, Lin H, Zhao B. 2013. Functional analysis of the novel mycorrhiza-specific phosphate transporter AsPT1 and PHT1 family from *Astragalus sinicus* during the arbuscular mycorrhizal symbiosis. *New Phytol.*, **198**: 836–852. DOI: [10.1111/nph.12188](https://doi.org/10.1111/nph.12188)
- Yano-Melo AM, Saggin OJ, Maia LC. 2003. Tolerance of mycorrhized banana (*Musa sp.* cv. Pacovan) plantlets to saline stress. *Agric. Ecosystems Environ.*, **95**: 343–348. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(02\)00044-0](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(02)00044-0)