



## Réponse du fonio blanc (*Digitaria exilis* Stapf) à l'inoculation avec des champignons mycorhiziens à arbuscules en conditions semi-contrôlées

Fatou Ndoye<sup>1,2,3\*</sup>, Abdala G. Diedhiou<sup>1,2,3</sup>, Moustapha Gueye<sup>4</sup>, Dioumacor Fall<sup>2,3,5</sup>, Adeline Barnaud<sup>5,6</sup>, Mame O. Sy<sup>1,3</sup>, Kandioura Noba<sup>1</sup>, Diegane Diouf<sup>1,2,3</sup>, Aboubacry Kane<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Département de Biologie Végétale, Faculté des Sciences et Techniques, Université Cheikh Anta Diop, BP 5050, Dakar, Sénégal

<sup>2</sup>Laboratoire Commun de Microbiologie IRD/ISRA/UCAD, Centre de Bel Air, BP1386, Dakar, Sénégal

<sup>3</sup>LMI Adaptation des Plantes aux Stress Environnementaux (LMI-LAPSE), Dakar, Sénégal

<sup>4</sup>Centre de Recherches Zootechniques de Kolda, ISRA/CRZ Kolda, BP 53 Kolda, Sénégal

<sup>5</sup>Centre National de Recherches Forestières, ISRA/CNRF, Route des Pères Maristes, BP 2312, Dakar-Sénégal

<sup>6</sup>UMR DIADE, Institut de Recherche pour le Développement (IRD), BP 64501 Montpellier, France

**Auteur correspondant** : Fatou NDOYE

Laboratoire Commun de Microbiologie IRD/ISRA/UCAD, Centre de Bel Air, BP1386, Dakar, Sénégal, Tel : (+221) 775106752, Fax : (+221) 338493302, E-mail : [fatoundoye20@gmail.com](mailto:fatoundoye20@gmail.com)

Original submitted in on 6<sup>th</sup> May 2016. Published online at [www.m.elewa.org](http://www.m.elewa.org) on 31<sup>st</sup> July 2016  
<http://dx.doi.org/10.4314/jab.v103i1.1>

### RÉSUMÉ

**Objectif** : Le fonio blanc (*Digitaria exilis* Stapf), malgré ses nombreuses qualités nutritionnelles et thérapeutiques, est considéré comme une culture négligée ou mineure dans plusieurs pays ouest-africains. Bien que le fonio, comme toute céréale s'associerait à des champignons mycorhiziens à arbuscules (CMA), aucune donnée n'a encore été publiée sur son statut mycorhizien. L'objectif de cette étude était de déterminer la dépendance mycorhizienne du fonio à l'inoculation avec des champignons mycorhiziens à arbuscules (CMA).

**Méthodologie et résultats** : Une accession de fonio provenant de la région de Sédhiou (sud du Sénégal) a été inoculée avec sept espèces de CMA (*Glomus aggregatum*, *G. fasciculatum*, *G. etunicatum*, *G. manihotis*, *G. mosseae*, *G. verrucosum* et *Rhizophagus irregularis*). Un dispositif expérimental complètement aléatoire avec dix plants par traitement a été utilisé pour comparer les sept traitements inoculés avec les sept souches de CMA en conditions semi-contrôlées. Après 110 jours de culture, les paramètres de mycorhization et de croissance ont été mesurés. Les résultats ont montré que les taux de mycorhization les plus élevés ont été obtenus avec *G. aggregatum* et *R. irregularis* alors que l'inoculation avec *G. verrucosum*, *G. manihotis* et *R. irregularis* a amélioré significativement la biomasse des plants de fonio. Des effets positifs significatifs de l'inoculation mycorhizienne ont également été observés en fonction des espèces de CMA avec des augmentations sur la biomasse totale (+14,44% à +45,56%), le tallage

(+15,79% à 31,58% à l'exception de *G. etunicatum*, *G. manihotis*), la production de feuilles (+13,41% à +35,79%), de panicules (+20,70% à 39,24%) et de racèmes (+52,94% à +125,29%).

**Conclusion et application :** Les résultats ont montré que le fonio répond bien à l'inoculation mycorrhizienne avec cependant un degré de dépendance variable en fonction de l'espèce de CMA. Ceci suggère que l'utilisation de CMA comme biofertilisant pourrait constituer une stratégie prometteuse pour contribuer à l'amélioration de la productivité du fonio au Sénégal et dans d'autres pays ouest-africains.

**Mots clés :** Fonio, champignons mycorrhiziens arbusculaires, inoculation, conditions semi-contrôlées

## **Response of white fonio (*Digitaria exilis* Stapf) to inoculation with different arbuscular mycorrhizal fungi under net house conditions**

### **ABSTRACT**

**Objective :** White fonio (*Digitaria exilis* Stapf), is a traditional cereal in most of West African countries where it is cultivated. Despite its many nutritional and therapeutic qualities, this plant is still a neglected or minor crop in several West African countries. The objective of this study was to determine the mycorrhizal dependency of fonio plants inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi (AMF), known for their major role in mineral nutrition of many plant species.

**Methodology and results:** A fonio accession from the Sedhiou district (southern Senegal) was inoculated with seven species of AMF (*Glomus aggregatum*, *G. fasciculatum*, *G. etunicatum*, *G. manihotis*, *G. mosseae*, *G. verrucosum* and *Rhizophagus irregularis*). A completely randomized design with ten replicates per treatment was carried out to compare the seven inoculated treatments under net house conditions. After 110 days, plant growth and mycorrhizal parameters were measured. The results showed that the highest mycorrhization rates were obtained with *G. aggregatum* and *R. irregularis* whereas the largest plant dry masses were achieved with *G. verrucosum*, *G. manihotis* and *R. irregularis*. Moreover, significant increase in the number of tillers, leaves, panicles and racemes was observed with AMF inoculation.

**Conclusion and application:** The results showed that fonio responds differently to mycorrhizal inoculation depending on AMF species used. It suggests that the use of AMF as biofertilizers might be a promising strategy to help improving the productivity of fonio in Senegal and other West African countries.

**Keywords:** Fonio, arbuscular mycorrhizal fungi, inoculation, net house conditions

### **INTRODUCTION**

Le fonio blanc (*Digitaria exilis* Stapf) est une graminée annuelle (Clayton et Renvoize 1986; Adoukonou-Sagbadja 2010). C'est la plus ancienne céréale d'Afrique de l'Ouest dont l'aire de distribution s'étend du Sénégal au Lac Tchad (Vodouhe et al. 2003; Adoukonou-Sagbadja 2007). Au Sénégal, le fonio représente 1% de la production nationale de céréales. Pour une prévision de 25 000 tonnes en 2007 (DAPS 2008), le rendement est de 2179 tonnes en 2014, dont près de la moitié est produite dans la région de Kédougou (FAO 2016). Cette faiblesse de l'offre fait que le Sénégal importait près de 70% du fonio de pays limitrophes comme la Guinée et le Mali

(USAID 2008). Et pourtant, grâce à ses qualités gustatives, nutritionnelles et thérapeutiques (Vietmeyer et al. 1996 ; Jideani 1999 ; Ogbonnaya 2009, Ballogou Vénérande et al. 2013), le fonio bénéficie d'une forte demande à l'export avec une valeur ajoutée très intéressante. La production mondiale du fonio est estimée à 663 351 tonnes (FAO 2016). La commercialisation ce produit est faible (20%); le reste étant destiné à l'autoconsommation. Les plus grands pays producteurs de fonio sont la Guinée, le Nigéria, le Mali et le Burkina Faso. Toutefois, le fonio reste une céréale peu connue voire négligée dans les autres pays ouest-africains dont le Sénégal (Cruz

et al. 2011). Cette situation s'expliquerait en partie par des politiques agricoles toujours axées sur les spéculations majeures (arachide, riz, oignons, mil, sorgho, maïs, etc.) et le caractère extensif des systèmes de culture sous pluies. En effet, le fonio est essentiellement cultivé sur des terres pauvres, marginales, dégradées ou généralement moins aptes pour les autres cultures alimentaires, et sans fertilisation minérale et/ou organique (Kanfany 2008). Les rendements en grains sont faibles et très variables dans les zones de production, entre 100 et 800 kg/ha, mais dépassent rarement 500 kg/ha surtout sur des terres marginales (Vodouhe et al. 2003 ; DAPS 2008 ; 2011). Depuis quelques années, des paquets technologiques incluant l'amélioration des semences, les opérations post récolte et la transformation primaire, sont développés dans plusieurs pays ouest africains pour améliorer la production du fonio et relancer la filière (Vodouhe et al. 2005). En Guinée et au Mali, une étude sur la fertilisation minérale a rapporté que des apports modérés d'engrais permettaient d'augmenter les rendements en grains de 12-22% par rapport au témoin non fertilisé (Gigou et al. 2009). Au Sénégal, une étude réalisée dans les zones principales de production de fonio a montré un effet bénéfique de la fertilisation minérale sur le rendement en grains avec des augmentations de 16 à 19 % (Kanfany, 2008). Par ailleurs, il existe des techniques agrobiologiques telles que la technologie de l'inoculation avec des microorganismes bénéfiques du sol (champignons mycorrhiziens à arbuscules et bactéries PGPR). Cependant, cette technologie de biofertilisation qui contribuerait efficacement à l'amélioration de la productivité et de la protection des cultures est encore peu exploitée dans les zones tropicales. En effet, à notre connaissance, aucune étude ne s'est jusqu'alors intéressée à l'utilisation de microorganismes symbiotiques pour améliorer la

croissance et la productivité du fonio. Or, comme toutes les céréales, le fonio s'associerait à des champignons mycorrhiziens à arbuscules (CMA) qui peuvent contribuer de façon significative à améliorer son développement et sa productivité. En effet, les CMA sont des microorganismes symbiotiques du sol capables de s'associer aux racines des plantes pour former un organe mixte appelé endomycorhize qui améliore la nutrition hydrominérale et la protection contre certains pathogènes (Smith et Read, 2008 ; Sharma et al. 2016), mais également dans la stabilité des agrégats du sol (Zhang et al. 2016). Une étude réalisée par Pandey et al. (2004) a montré que l'inoculation avec des CMA améliore significativement la croissance (+43,22%) et la nutrition phosphatée (+45%) du blé. Usharani et al. (2014) ont montré l'effet positif significatif de *Glomus fasciculatum* sur la croissance (+32,67%) et le rendement en grains (+11,06%) d'une variété de maïs en Inde. L'inoculation de plants de riz avec *Glomus mosseae* a amélioré significativement sa croissance même dans un sol contaminé par des métaux lourds (Zhang et al. 2012). La productivité (+143%) du sorgho est significativement augmentée par l'inoculation avec *Glomus mosseae* (Mehraban et al. 2009). Toutefois, il faut signaler que la mise en place de la symbiose appréciable par les paramètres de mycorrhization telles que la fréquence et l'intensité de colonisation ; et la réponse de la plante en termes de croissance et de rendement vont dépendre de plusieurs facteurs comme la nature du sol, les conditions environnementales et les partenaires symbiotiques impliqués (plante et champignon MA). Ainsi, l'objectif de cette étude était d'évaluer la réponse du fonio à l'inoculation avec sept espèces de CMA en conditions semi-contrôlées.

## MATERIELS ET METHODES

**Matériel végétal :** Les semences de fonio (*Digitaria exilis* Stapf) sont d'une accession paysanne provenant de la région de Sédhiou (Sud du Sénégal) ayant un cycle de 110-120 jours. Les graines ont été désinfectées dans de l'eau de javel à 10% pendant 30 s puis rincées 3 fois à l'eau distillée stérile. Elles ont été ensuite pré-germées dans des boîtes de Pétri sur du papier Wathmann (8 mm de diamètre) imbibé d'eau distillée, puis placées à l'obscurité dans une étuve à 30 ± 1° C pendant 24 h.

**Matériel fongique et multiplication des inocula :** Sept souches de CMA de la collection du Laboratoire Commun de Microbiologie (LCM, IRD/ISRA/UCAD) de Dakar (Sénégal) ont été utilisées pour cette étude. Il s'agit de *Glomus aggregatum* (Schenck & Smith emend. Koske ; DAOM 227 128), *G. fasciculatum* (Thaxter sensu Gerdemann DAOM 227 130), *G. etunicatum* (Becker & Gerdemann BEG 176), *G. manihotis* (Howeler, Sieverding et Schenck, FL87), *G. mosseae* (Nicolson & Gerd. ; Gerd. & Trappe DAOM 227 131), *G. verrucosum* (Błaszowski & Tadych ; DAOM 227 115) et *Rhizophagus irregularis* (Schenck & Smith, anciennement appelé *G. intraradices* DAOM 197 198 ; Krüger *et al.* 2012). Chaque souche pure de CMA a été multipliée en serre à l'aide d'une plante mycotrophe en l'occurrence du maïs (*Zea mays* L.), dans du sol de Sangalkam stérilisé (120° C, 2 h) dont la composition suit : argile (3,6 %), limon fin (7,4 %), limon grossier (25,4 %), sable fin (36,6 %), sable grossier (21,55 %), C total (0,54 %), N total (0,06 %), rapport C/N (8,5), P total (39 mg P/kg), P Olsen (4,8 mg P/kg), pH H<sub>2</sub>O (6,5). Après 3 mois de culture des plants de maïs dans des pots, les racines et le substrat de culture ont été collectés pour évaluer la densité des spores (Brundrett *et al.* 1996) et le taux de colonisation des racines pour chaque souche de CMA (Phillips et Hayman, 1970 ; Trouvelot *et al.* 1986). Les racines de maïs colonisées par chaque souche de CMA ont été ensuite découpées en fragments d'environ 1 cm et mélangées au substrat de culture contenant des spores et des hyphes, pour constituer l'inoculum.

**Dispositif expérimental :** L'expérimentation a été réalisée en serre (température jour/nuit : 30°/25°C, photopériode : 16 h) au Laboratoire Commun de Microbiologie (LCM, IRD/ISRA/UCAD) du Centre de Recherche de Bel Air, Dakar, Sénégal. Des gaines de pépinière (23,5 cm x 9,5 cm) ont été remplies de sol de Sangalkam stérilisé (120 °C, 2 h) à raison de 800 g de sol par gaine. Un dispositif expérimental complètement aléatoire avec dix plants par traitement a été utilisé pour comparer les sept traitements inoculés avec les sept souches de CMA (*G. aggregatum*, *G. fasciculatum*, *G. etunicatum*, *G. manihotis*, *G. mosseae*, *G. verrucosum* et *R. irregularis*) et le témoin. Avant de semer les graines de fonio, 20 g d'inoculum fongique de chaque souche de CMA ont été enfouis à 4 cm de profondeur au centre de chaque gaine et bien mélangés avec le sol stérilisé. Les plants du traitement témoin ont reçu 20 g d'inoculum mycorhizien mixte préalablement stérilisé (120° C, 2 h). Les plants ont été arrosés tous les deux jours avec l'eau du robinet jusqu'à la fin de l'expérimentation (110 jours après semis).

**Détermination des paramètres agronomiques et mycorrhiziens :** Les paramètres morphologiques des plants (hauteur, nombre de talles, nombre de feuilles, de panicules et de racèmes) ont été déterminés juste avant la récolte. La distance entre le collet et l'apex de la plus longue feuille représente la hauteur du plant. Le nombre de feuilles, de talles, de panicules et de racèmes ont été comptées manuellement par observation directe. Après la récolte, les parties aériennes et racinaires des plants de fonio ont été séparées puis séchées à l'étuve à 70 °C pendant 48 h pour déterminer les poids secs des parties aérienne et racinaire. La dépendance mycorhizienne relative (DMR) qui exprime le degré par lequel une plante répond à l'inoculation mycorhizienne dans les conditions de fertilité du sol en question, a été estimée (Plenchette *et al.* 1983).

$$\text{DMR} = \frac{\text{Biomasse totale des plants mycorhizés} - \text{Biomasse totale des plants témoins}}{\text{Biomasse totale des plants mycorhizés}} \times 100$$

Pour mesurer les paramètres de mycorhization, les racines séchées ont été réhydratées dans de l'eau puis colorées avec le Bleu Trypan à 0,05 % (Phillips et Hayman, 1970). La fréquence et l'intensité de mycorhization ont été calculées par la méthode de Trouvelot et al. (1986), après montage des fragments racinaires colorés entre lame et lamelle et observation au microscope (x250).

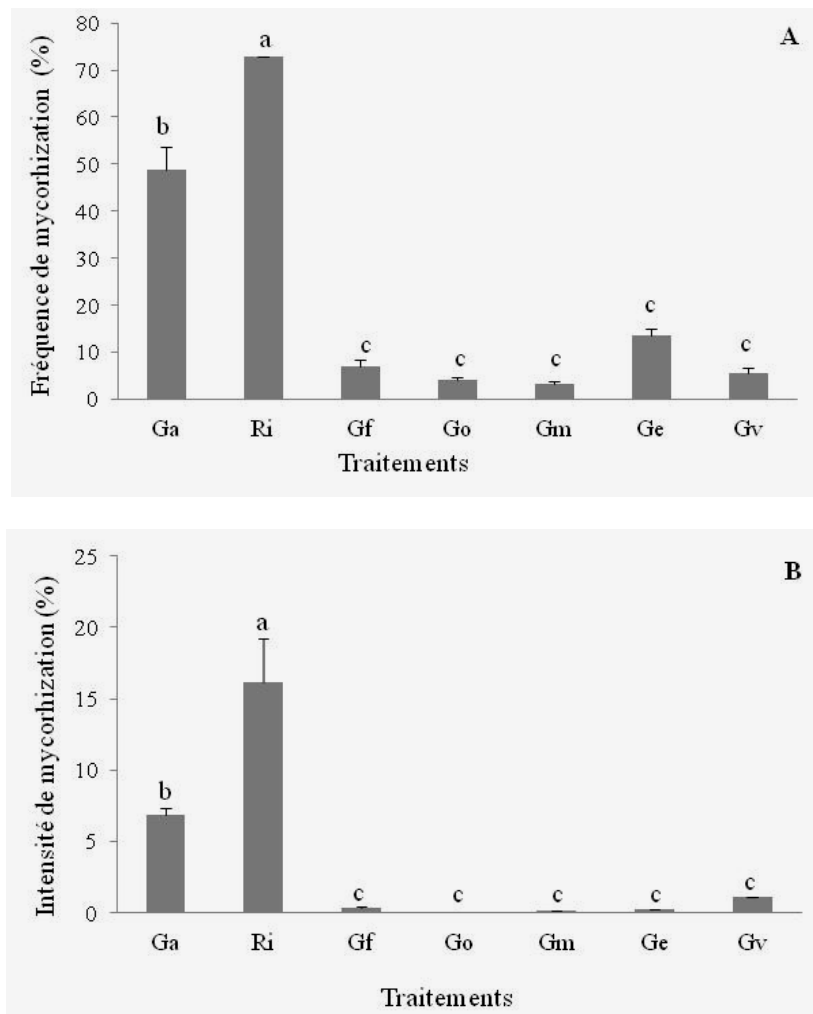
**Analyse statistique des données :** Les tests de Shapiro et de Levene ont été faits sur les données

brutes pour vérifier la normalité et l'homogénéité de variance. Les données normalisées ont été soumises à l'analyse de la variance (ANOVA). Les moyennes des variables mesurées au seuil de probabilité de 5 % ( $p \leq 0,05$ ) ont été comparées en utilisant le test de Student-Newman-Keuls. Les tests et l'analyse statistique des résultats ont été réalisés avec le logiciel IBM SPSS Statistics Version 20.0.

## RESULTATS

**Colonisation des racines de fonio par les CMA :** La fréquence et l'intensité de mycorhization des racines

des plants de fonio sont présentées dans les figures 1A et 1B.



**Figure 1 :** Fréquence (A) et intensité (B) de mycorhization des racines de plants de fonio inoculés avec des champignons mycorhiziens à arbuscules. Ga: *Glomus aggregatum* - Ri: *Rhizophagus irregularis* - Gf: *G. fasciculatum* - Go: *G. mosseae* - Gm: *G. manihotis* - Ge: *G. etunicatum* - Gv: *G. verrucosum*. Les barres suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes d'après le test de Student-Newman-Keuls ( $p \leq 0,05$ ).

Les sept espèces de CMA testées ont colonisé de façon variable les racines des plants de fonio. Cependant, les analyses ont révélé des différences significatives entre espèces de CMA aussi bien pour la fréquence que pour l'intensité de mycorhization. Par ailleurs, nous observons des comportements similaires entre la fréquence et l'intensité pour chaque CMA. La meilleure colonisation racinaire est obtenue avec *R. irregularis* (72,80 % et 16,17 % respectivement pour la fréquence et l'intensité de mycorhization), suivi de *G. aggregatum* (48,8 % et 6,87 % respectivement pour la fréquence et l'intensité de mycorhization). Les fréquences comme les intensités de mycorhization avec les autres espèces de CMA sont relativement faibles et ne sont pas significativement différentes (Figures 1A et 1B).

**Croissance en hauteur et biomasses des plants :** Les plants de fonio répondent différemment à l'inoculation selon l'espèce de CMA utilisée (Tableau 1). Ainsi, sur les 7 espèces de CMA testées, seule *G. manihotis* a significativement amélioré la croissance en

hauteur des plants de fonio, avec une augmentation de 28,5 % par rapport aux plants témoins. La biomasse aérienne a été significativement améliorée chez les plants de fonio inoculés avec *G. verruculosum*, *G. manihotis* et *R. irregularis*, soit une augmentation de 44,71 %, 28,24 % et 25,88 % respectivement par rapport aux plants témoins. Quant à la biomasse racinaire, seuls les plants inoculés avec *G. verruculosum* ont montré une amélioration significative (73,47 % par rapport aux plants témoins), alors que les plants inoculés avec *G. etunicatum* ont donné une valeur (0,38 mg/plant) significativement inférieure à celle des plants témoins (0,049 mg/plant). La biomasse totale a été significativement améliorée chez les plants inoculés avec *G. verruculosum*, *G. manihotis* et *R. irregularis* avec respectivement des gains de 45,56 %, 26,67 % et 24,44 % par rapport aux plants témoins. Les espèces *G. aggregatum*, *G. fasciculatum*, et *G. mosseae* n'ont pas significativement affecté la hauteur et les biomasses aérienne, racinaire et totale des plants de fonio (Tableau 1).

**Tableau 1 :** Hauteur et biomasses des plants de fonio inoculés et témoins cultivés sur le sol de Sangalkam stérilisé.

Traitements	Hauteur (cm/plant)	Biomasse aérienne (BA, g/plant)	Biomasse racinaire (BR, g/plant)	Biomasse totale (g/plant)	Ratio BR/BA
Témoin	78,13 (±4,75) b	0,85 (±0,08) c	0,049 (±0,00) b	0,90 (±0,08) c	0,07 (±0,01) a
<i>Glomus aggregatum</i>	88,53 (±3,18) b	1,02 (±0,03) bc	0,048 (±0,00) bc	1,07 (±0,03) bc	0,05 (±0,00) b
<i>Rhizophagus irregularis</i>	87,13 (±2,91) b	1,07 (±0,04) ab	0,046 (±0,00) bc	1,12 (±0,04) b	0,04 (±0,00) b
<i>G. fasciculatum</i>	80,20 (±3,18) b	0,99 (±0,02) bc	0,047 (±0,00) bc	1,04 (±0,01) bc	0,05 (±0,00) b
<i>G. mosseae</i>	79,93 (±2,29) b	1,02 (±0,03) bc	0,051 (±0,00) b	1,07 (±0,03) bc	0,05 (±0,00) b
<i>G. manihotis</i>	100,40 (±1,89) a	1,09 (±0,05) ab	0,046 (±0,00) bc	1,14 (±0,05) b	0,04 (±0,00) b
<i>G. etunicatum</i>	85,19 (±2,98) b	0,99 (±0,03) bc	0,038 (±0,00) c	1,03 (±0,03) bc	0,04 (±0,00) b
<i>G. verruculosum</i>	81,93 (±3,01) b	1,23 (±0,08) a	0,085 (±0,00) a	1,31 (±0,08) a	0,07 (±0,00) a

Pour chaque colonne, les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes d'après le test de Student-Newman-Keuls ( $p \leq 0,05$ ).

**Nombres de talles et de feuilles des plants :** Des réponses variables des plants de fonio en fonction des CMA et du type de talles (primaires ou secondaires) ont été relevées (Tableau 2). Ainsi, pour le nombre de talles primaires, aucune différence significative n'a été observée entre les plants de fonio témoins et ceux inoculés, cela quelle que soit l'espèce de CMA utilisée. Toutefois, le nombre de talles primaires des plants inoculés avec *G. etunicatum* est significativement inférieur à celui des plants inoculés avec *R. irregularis* et ceux inoculés avec *G. fasciculatum*. Pour le nombre

de talles secondaires, seuls les plants inoculés avec *R. irregularis* et *G. verruculosum* ont présenté des valeurs significativement supérieures à celles des plants témoins. Le nombre total de talles des plants inoculés avec *R. irregularis*, *G. fasciculatum*, *G. mosseae* et *G. verruculosum* est significativement plus élevé que celui des plants témoins et inoculés avec les autres espèces de CMA. Par ailleurs, une augmentation significative du nombre de feuilles a été observée chez les plants inoculés avec *G. aggregatum*, *R. irregularis* et *G. manihotis* par rapport aux plants témoins (Tableau 2).

**Tableau 2** : Nombres de talles et de feuilles des plants de fonio inoculés et témoins sur le sol de Sangalkam stérilisé.

Traitements	Nombre de talles primaires/plant	Nombre de talles secondaires/plant	Nombre total de talles /plant	Nombre de feuilles/plant
Témoin	1,67 (±0,13) ab	2,13 (±0,26) bc	3,80 (±0,34) b	11,93 (±0,57) b
<i>Glomus aggregatum</i>	1,67 (±0,13) ab	2,73 (±0,23) abc	4,40 (±0,34) ab	14,87 (±0,36) a
<i>Rhizophagus irregularis</i>	2,00 (±0,00) a	3,27 (±0,21) a	5,27 (±0,21) a	15,07 (±1,07) a
<i>G. fasciculatum</i>	2,00 (±0,00) a	2,87 (±0,24) ab	4,87 (±0,24) a	14,00 (±0,45) ab
<i>G. mosseae</i>	1,80 (±0,11) ab	2,93 (±0,23) ab	4,73 (±0,30) a	13,53 (±0,46) ab
<i>G. manihotis</i>	1,60 (±0,13) ab	2,00 (±0,17) c	3,60 (±0,25) b	16,20 (±1,10) a
<i>G. etunicatum</i>	1,47 (±0,13) b	2,20 (±0,11) bc	3,67 (±0,21) b	13,87 (±0,56) ab
<i>G. verruculosum</i>	1,87 (±0,09) ab	3,13 (±0,22) a	5,00 (±0,26) a	14,40 (±0,35) ab

Pour chaque colonne, les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes d'après le test de Student-Newman-Keuls ( $p \leq 0,05$ ).

**Tableau 3** ; Coefficients de corrélation des paramètres de mycorhization avec les paramètres de croissance des plants de fonio inoculés avec différentes espèces de champignons mycorhiziens à arbuscules (FM = fréquence de mycorhization, IM = intensité de mycorhization).

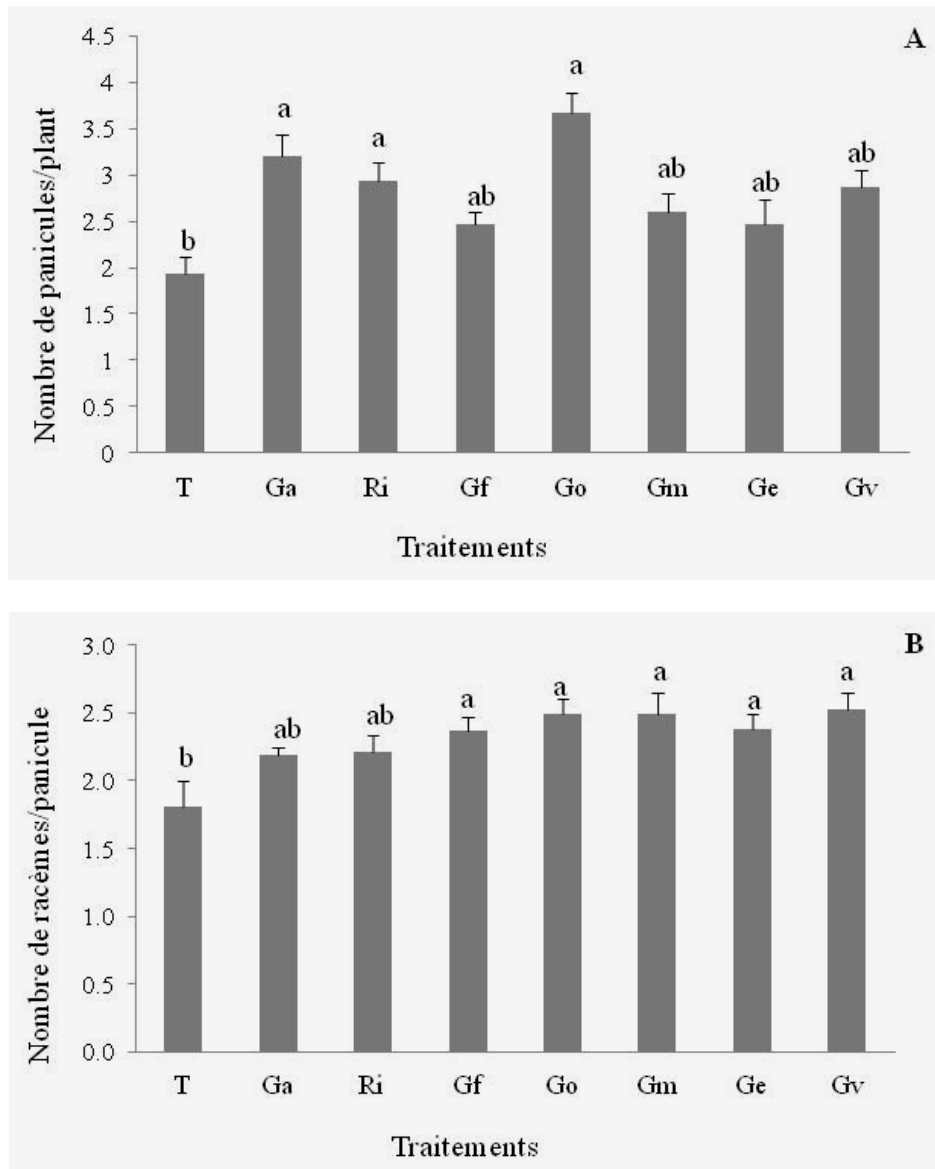
	<i>Glomus aggregatum</i>		<i>Rhizophagus irregularis</i>		<i>G. fasciculatum</i>		<i>Glomus mosseae</i>		<i>G. manihotis</i>		<i>G. etunicatum</i>		<i>G. verruculosum</i>	
	FM	IM	FM	IM	FM	IM	FM	IM	FM	IM	FM	IM	FM	IM
Hauteur	0,564	0,313	-0,186	0,095	0,147	-0,033	0,896*	0,992**	0,530	0,839	0,090	0,649	0,057	0,844
Biomasse aérienne	0,755	0,544	-0,191	0,403	0,466	0,578	-0,831	-0,629	0,678	0,418	0,196	0,388	0,205	-0,090
Biomasse racinaire	0,268	0,382	0,715	0,471	-0,330	-0,284	-0,572	-0,601	-0,413	-0,678	-0,771	-0,771	0,757	-0,389
Biomasse totale	0,781	0,481	-0,466	0,159	0,351	0,461	-0,872	-0,679	0,652	0,380	0,196	0,388	0,129	-0,077
Nombre de talles primaires	0,559	0,213	0,476	0,831	0,314	0,032	0,814	0,593	0,329	0,498	0,621	0,955*	0,941*	0,512
Nombre de talles secondaires	0,834	0,505	-0,771	-0,493	0,330	0,874	-0,086	-0,063	-0,210	-0,776	-0,256	-0,035	-0,892*	-0,597
Nombre de feuilles	0,812	0,703	-0,162	0,051	-0,441	-0,118	-0,192	0,140	-0,470	-0,579	0,070	0,416	-0,145	0,857
Nombre de panicules	-0,615	0,391	-0,358	-0,246	0,673	0,662	0,767	0,769	-0,343	-0,158	-0,171	-0,668	0,145	-0,208
Nombre de racèmes	-0,086	0,265	0,088	-0,167	0,262	-0,110	-0,307	-0,299	-0,778	-0,397	0,412	0,769	0,453	0,272

\* : corrélation significative à  $p < 0,05$  ; \*\* : corrélation significative à  $p < 0,01$  ; \*\*\* : corrélation significative à  $p < 0,0001$



**Production de panicules et de racèmes des plants :** Les productions de panicules et de racèmes sont significativement influencées par l'inoculation endomycorhizienne. En effet, comparés aux plants témoins, trois espèces de CMA (*G. aggregatum*, *G. mosseae* et *R. irregularis*) ont provoqué une

augmentation significative du nombre de panicules. Cependant, le nombre de racèmes par panicule a été significativement amélioré par toutes les espèces de CMA à l'exception de *G. aggregatum* et *R. irregularis* (Figure 2).

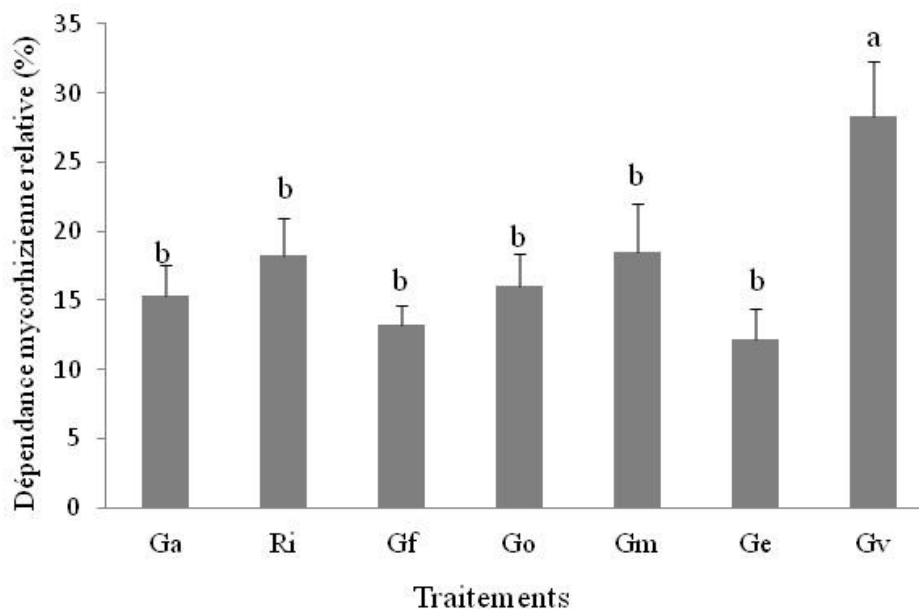


**Figure 2 :** Nombre de panicules (A) et de racèmes (B) des plants de fonio inoculés et non inoculés sur le sol de Sangalkam stérilisé. Ga: *Glomus aggregatum* - Ri : *Rhizophagus irregularis* - Gf: *G. fasciculatum* - Go: *G. mosseae* - Gm: *G. manihotis* - Ge : *G. etunicatum* - Gv : *G. verriculosum*. Les barres suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes d'après le test de Student-Newman-Keuls ( $p \leq 0,05$ ).

**Dépendance mycorhizienne relative du fonio :** Les dépendances mycorhiziennes relatives (DMR) ont montré des réponses variables en fonction de l'espèce de CMA (Figure 3). Les valeurs de DMR des plants de fonio sont comprises entre 12,22 et 28,37 % et l'analyse statistique révèle que les plants de fonio sont plus dépendants de *G. verruculosum*. Les plants de fonio associés avec les autres espèces de CMA présentent des DMR qui ne sont pas significativement différentes entre elles.

**Corrélation entre les traitements et les paramètres mesurés :** Les coefficients de corrélation entre les paramètres de mycorhization et de croissance des plants de fonio pour chaque espèce de CMA indiquent une réponse variable. Ces résultats ont révélé une

corrélation positive significative entre les paramètres de mycorhization et la hauteur des plants inoculés avec *G. mosseae* ( $R=0,896$  pour la fréquence et  $R=0,992$  pour l'intensité). Une corrélation positive significative a également été observée entre l'intensité de mycorhization et le nombre de talles primaires des plants inoculés avec *G. etunicatum* ( $R=0,995$ ). Chez les plants inoculés avec *G. verruculosum*, la fréquence de mycorhization est significativement et positivement corrélée avec le nombre de talles primaires ( $R=0,941$ ) et négativement avec le nombre de talles secondaires ( $R=0,892$ ). Aucune corrélation significative n'a cependant été observée entre les paramètres de croissance des plants et la fréquence ou l'intensité de mycorhization chez les autres espèces de CMA.



**Figure 3 :** Dépendance mycorhizienne relative (DMR) du fonio déterminée chez 7 espèces de champignons mycorhiziens à arbuscules. Ga: *Glomus aggregatum* - Ri: *Rhizophagus irregularis* - Gf: *G. fasciculatum* - Go: *G. mosseae* - Gm: *G. manihotis* - Ge: *G. etunicatum* - Gv: *G. verruculosum*. Les barres suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes d'après le test de Student-Newman-Keuls ( $p \leq 0,05$ ).

## DISCUSSION

L'observation de structures mycorhiziennes telles que les vésicules et les hyphes dans les racines des plants de fonio inoculés avec les différentes espèces de CMA indique donc que cette céréale d'Afrique de l'Ouest est bien mycotrophe. De plus, cette accession de fonio est capable de s'associer avec les 7 espèces de CMA testées. Guewa-Przepióra *et al.* (2014) ont montré que la graminée *Deschampsia cespitosa* était colonisée par

différentes espèces de CMA (*Archaeospora trapei*, *Funnelformis mosseae* et *Scutellospora dipurpurescens*). En effet, il a été généralement admis que les CMA n'ont pas de spécificité d'hôtes (Gianinazzi-Pearson *et al.* 1985) et sont donc capables de s'associer avec la majorité des plantes terrestres (Balachandhran & Mishra 2014). Cependant, il peut avoir une préférence plante-CMA ou une spécificité

écologique de la symbiose CMA/plante hôte dans la mesure où une plante peut être colonisée par une ou plusieurs espèces de CMA (McGonigle & Fitter, 1990). Les résultats obtenus ont également révélé que le degré de colonisation racinaire varie en fonction de l'espèce de CMA. En effet, les fréquences de mycorhization varient entre 3,2 % avec *G. manihotis* et 72,8 % avec *R. irregularis*, et les intensités entre 0,06 % avec *G. mosseae* et 16,17 % avec *R. irregularis*. Des fréquences de mycorhization variant de 20 à 70 % ont été observées par Kumar *et al.* (2003) chez d'autres espèces de Poacées (*Sporobolus indicus*, *Grevillea pteridifolia*, *Eragrostis tenella*, *Digitaria bicornis*, *Cynodon dactylon*). Des résultats similaires ont été obtenus chez d'autres plantes, *Acacia senegal* et *Phoenix dactylofera*, inoculées avec les mêmes espèces de CMA (Ndoye *et al.* 2013 ; Diatta *et al.* 2014). Sanchez-Roque *et al.* (2016) ont également observé un effet positif de l'inoculation avec un cocktail de CMA sur la croissance de trois variétés de piment. Par ailleurs, les résultats ne montrent pas de corrélation significative entre les paramètres de mycorhization et les paramètres agronomiques. En effet, les travaux de Diagne & Ingleby (2003) ont montré que d'une forte colonisation mycorhizienne des racines ne résulte pas toujours une amélioration de la croissance des plantes. Ndoye *et al.* (2013) avaient trouvé un effet positif de *G. verrucosum* sur la croissance de l'*A. senegal* malgré le taux de colonisation mycorhizienne faible. Duponnois *et al.* (2001) avaient également montré que l'inoculation d'espèces de *Sesbania* sp avec *G. aggregatum* n'a pas amélioré la croissance de la plante malgré la forte colonisation mycorhizienne des racines. Ceci indique donc que certaines espèces de CMA sont agressives mais non efficaces (Graham *et al.* 1996), ce qui pourrait s'expliquer par une utilisation des carbohydrates pour la colonisation racinaire au détriment de la croissance de la plante. Les fréquences et intensités de mycorhization les plus élevées sont obtenues avec *G. aggregatum* et *R. irregularis*. Les travaux de Ndoye *et al.* (2013) sur *Acacia senegal* avec les mêmes espèces de CMA avaient montré une colonisation plus importante avec *R. irregularis* et *G. aggregatum*. Shamshiri *et al.* (2011) ont également noté des taux de mycorhization des plants de *Petunia hybrida* plus élevés avec *R. irregularis* comparé à *G. mosseae*. Incesu *et al.* (2015) ont observé des taux de colonisations racinaires de *Diospyros virginiana* plus élevés avec *R. irregularis* et *G. caledonium* comparés à

d'autres espèces de CMA (*G. etunicatum*, *G. mosseae* et *G. clarium*). Ce fait pourrait être attribué à la capacité d'une plante à développer une association symbiotique de type préférentiel avec une espèce de CMA bien qu'elle soit colonisée par différentes espèces de CMA, entraînant des taux de colonisation racinaire différents (Smith *et al.* 2009), ou par une spécificité écologique (McGonigle and Fitter, 1990). Les inoculations mycorhiziennes ont augmenté la hauteur et la biomasse totale des plants de fonio à la fin de la culture. Ces inoculations ont également augmenté d'une part le nombre total de talles des plants à l'exception de ceux inoculés avec *G. manihotis* et *G. etunicatum* ; et d'autre part le nombre de feuilles des plants de fonio. Le rôle bénéfique des CMA sur la croissance des plantes serait attribuable à une amélioration du prélèvement, du transport et de l'absorption d'éléments minéraux essentiellement le phosphore par les tissus de la plante (Yamawaki *et al.* 2013). Cette amélioration du statut nutritionnel des plantes mycorhizées serait due aux hyphes mycéliens extra-radicaux qui explorent un volume de sol plus important non accessible aux seules racines de la plante (Clark et Zeto, 2000). Toutefois, la croissance des plants de fonio varient en fonction de l'espèce de CMA. Des augmentations significatives de biomasses ont été observées avec les inocula de *G. verrucosum*, *G. manihotis* et *R. irregularis*. Des résultats similaires ont été trouvés sur *Petunia* sp par Shamshiri *et al.* (2011), sur *Jatropha curcas* par Leye *et al.* (2012), sur *Zea mays* par Chen *et al.* (2014) et sur *Morus alba* par Lu *et al.* (2015). Les travaux d'Andrea *et al.* (2007) ont également montré l'effet positif de différentes espèces CMA sur la croissance des plantes d'*Ocimum basilicum* L. inoculés avec *G. mosseae*, *Gigaspora rosea* et *Gigaspora margarita*. Marin *et al.* (2003) ont montré un effet positif significatif de *R. irregularis* sur la croissance de *Diospyros* sp comparé à *G. mosseae* et au témoin non inoculé. De plus, le prélèvement et le transport d'éléments minéraux tel que le phosphore par les CMA varient en fonction des espèces de CMA (Smith *et al.* 2011). L'existence d'une forte diversité fonctionnelle dans les symbioses entre une plante et différents CMA en termes de bénéfices (quantité de phosphore fournie à la plante) et de coût (quantité de carbone fournie au CMA) pourrait expliquer le succès ou l'échec d'une symbiose endomycorhizienne (Smith *et al.* 2011). Les résultats de notre étude montrent également que l'inoculation avec les différentes espèces de CMA augmente significativement le nombre de panicules et

de racèmes des plants de fonio. Al-Karaki *et al.* (2004) ont observé un effet positif significatif de l'inoculation avec des espèces de CMA sur le nombre d'inflorescences par plante chez le blé. Ceci pourrait s'expliquer par une augmentation du taux de photosynthétats de la plante grâce aux CMA (Singh et Singh, 1992). Le degré de dépendance mycorhizienne du fonio varie en fonction des CMA. Selon la classification de Cruz *et al.* (1999), le fonio est moyennement dépendant de la mycorhization par les 7 espèces de CMA testées. Les travaux de Javaid (2008) ont démontré que les graminées sont faiblement dépendantes de la symbiose mycorhizienne car leurs racines fibreuses ont une forte capacité d'absorption des nutriments (Baylis, 1975). Selon ce même auteur, les différences de taux de mycorhization observées entre plusieurs espèces de Poacées pourraient s'expliquer par la présence ou l'absence de composés allélochimiques. Une étude de Ndoye *et al.* (2013) avec les mêmes espèces de CMA avait montré des dépendances mycorhiziennes de l'*Acacia senegal* fortes, moyennes et nulles en fonction de l'espèce de CMA et du type de sol indiquant donc que la réponse à l'inoculation mycorhizienne dépend de l'interaction plante/CMA/sol. De plus, notre étude a mis en évidence une dépendance mycorhizienne du fonio plus élevée avec *G. verruculosum* bien que le plus fort taux de colonisation ait été obtenu avec *R. irregularis*. Des résultats similaires observés par Shamshiri *et al.* (2011) ont montré que le taux de colonisation ne peut pas être considéré comme un facteur déterminant dans la nutrition de la plante et la capacité de translocation des

hyphes. La densité des hyphes extra-radicaux pourrait jouer un rôle très important dans ce processus. D'autre part, la plus faible dépendance mycorhizienne relative a été observée avec *G. etunicatum*. Ceci est contraire aux résultats d'Incesu *et al.* (2015) qui ont trouvé une dépendance mycorhizienne plus forte avec *G. etunicatum* chez *Diospyros virginiana*. Ceux-ci suggèrent donc que la réponse à l'inoculation mycorhizienne dépend également de l'espèce végétale. Par ailleurs, la relation entre la dépendance mycorhizienne relative et les paramètres agronomiques n'est toujours pas évidente. L'étude réalisée par Al-Qarawi et Alshahrani (2010) a montré que chez *Ziziphus spina* et *Ziziphus nummularia*, il existe une relation positive entre la dépendance mycorhizienne et le niveau de colonisation mycorhizienne des racines. De plus, Guissou *et al.* (2009) ont observé que la densité et la longueur racinaire étaient positivement corrélées à la dépendance mycorhizienne. Cependant, Garg et Chandel (2011) ont trouvé que des niveaux de salinité élevés diminuent le taux de colonisation mycorhizienne des racines de *Cicer arietinum* mais améliorent la dépendance mycorhizienne des plantes. Une corrélation positive significative entre le taux de colonisation mycorhizienne et les paramètres de croissance (biomasses aérienne et racinaire) a été observée par Incesu *et al.* (2015). Cependant, dans notre étude, seuls la hauteur et le nombre de tiges sont positivement corrélés aux fréquences et/ou intensités de mycorhization de certaines espèces de CMA (*G. mosseae*, *G. etunicatum* et *G. verruculosum*).

## CONCLUSION

Cette étude a démontré que le fonio répond bien à l'inoculation avec des champignons mycorhiziens à arbuscules (CMA) en conditions semi-contrôlées. Les résultats ont également souligné que la dépendance mycorhizienne relative du fonio varie en fonction de l'espèce de CMA utilisée. Cette étude suggère donc que certains CMA pourraient jouer un rôle important

dans l'amélioration de la croissance des plants de fonio. Des travaux complémentaires devront être menés pour étudier l'impact agronomique des CMA sur la croissance et la productivité du fonio et la gestion de la fertilité des sols dans les parcelles paysannes afin de faire des recommandations sur l'utilisation des CMA comme biofertilisants.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le Laboratoire Mixte International-Adaptation des Plantes et microorganismes associés aux Stress Environnementaux (LMI-LAPSE) pour avoir financé ce

projet de recherche ainsi que l'Association Sénégalaise pour la Promotion du Fonio (ASPROF) pour la fourniture des semences de fonio.

## REFERENCES

- Adoukonou-Sagbadja H, Wagner C, Dansi A, Ahlemeyer J, Dainou O, Akpagana K, Ordon F, Friedt W. 2007. Genetic diversity and population differentiation of fonio millet (*Digitaria* spp.) landraces from different agro-ecological zones of West Africa. *Theoretical and Applied Genetics* 115: 917–931.
- Adoukonou-Sagbadja H. 2010. Genetic Characterization of Traditional Fonio millets (*Digitaria exilis*, *D. iburua* Stapf) Landraces from West-Africa: Implications for Conservation and Breeding, Thesis, Institute of Crop Science and Plant Breeding, Justus-Liebig University Giessen, Germany, 119 p.
- Al-Karaki GN, McMichael G, Zak B. 2004. Field response of wheat to arbuscular mycorrhizal fungi and drought stress. *Mycorrhiza* 14: 263–269.
- Al-Qarawi AA, Alshahrani TS. 2010. Growth Response of Two Species of Zizyphus to Inoculation with Arbuscular Mycorrhizal Fungi; *The Meteorology, Environment and Arid Land Agriculture Journal of King Abdulaziz University* 21(1): 109-122.
- Andrea C, Lingua G, Bardi L, Masoero G, Berta G. 2007. Influence of arbuscular mycorrhizal fungi on growth and essential oil composition in *Ocimum basilicum* var. Genovese. *Caryologia* 60: 106–110.
- Balachandhran S, Mishra S. 2014. Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AM fungi): A potential tool for augmenting carbon dioxide sequestration. In: *Recent Trends in Life Sciences*, Eds. MH Fulekar & R K Kale, Published by: IK International Publishing House Pvt. Ltd. New Delhi. ISBN- 978-93-82332-25-1, pp. 59- 75.
- Ballogou Vénérande Y, Soumanou MM, Toukourou F, Hounhouigan JD. 2013. Structure and Nutritional Composition of Fonio (*Digitaria exilis*) Grains: A Review. *International Research Journal of Biological Sciences* 2(1): 73–79.
- Baylis GT. 1975. The magnolioid mycorrhizal and mycotrophy in root systems derived from it. In *Endomycorrhizas*, Sanders FE; Mosse B and Tinker PB. Eds. Academic Press, London, 374–381.
- Brundrett M, Bougher N, Dell B, Grove T, Malajczuk N. 1996. Working with Mycorrhizas in Forestry and Agriculture. ACIAR, Canberra, ISBN: 1 86320 181 5.
- Chen X, Song F, Fulai L, Chunjie T, Shengqun L, Hongwen X, Xiancan Z. 2014. Effect of Different Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Growth and Physiology of Maize at Ambient and Low Temperature Regimes. *Scientific World Journal*, ID 956141, 7 p.
- Clark RB, Zeto SK. 2000. Mineral acquisition by arbuscular mycorrhizal plants. *Journal of Plant Nutrition* 23: 867–902.
- Clayton WD, Renvoize SA. 1986. Genera Graminum, grasses of the world. Kew Bull Add Series XIII, 389 p.
- Cruz RE, de la Zarade JF, Agganzae NS, Lorilla EB. 1999. Differential mycorrhizal development of agricultural, horticultural and forestry crops to inoculation of mycorrhizal fungi, In Jasper some D. (Edition) Proceedings of the international symposium on management of mycorrhizas on agriculture, horticulture and forestry. *Journal of the Australian Institute of Agricultural Science*, Australia, 54 p.
- Cruz JF, Beavogui F, Drame D. 2011. Le fonio, une céréale africaine. Éditions Quae, Versailles ; Presses agronomiques de Gembloux, Gembloux (Belgique), CTA, Wageningen (Netherlands, Pays-Bas), 160 pages.
- DAPS. 2008. Résultats définitifs de la campagne 2007-2008. DISA/DAPS/MAE, Dakar (Sénégal), 14 p.
- DAPS. 2011. Résultats définitifs de la campagne 2010-2011. DISA/DAPS/MAE, Dakar (Sénégal), 27 p.
- Diagne O, Ingleby K. 2003. Ecologie des champignons mycorrhiziens arbusculaires infectant *Acacia raddiana*. Un arbre au desert. IRD Editions, Paris, pp 205–228.
- Diatta ILD, Kane A, Agbangba CE, Sagna M, Diouf D, Bertossi FA, Duval Y, Borgel A, Sane D. 2014. Inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi improves seedlings growth of two sahelian date palm cultivars (*Phoenix dactylifera* L., cv. Nakhla hamra and cv. Tijib) under salinity stresses. *Advances in Bioscience and Biotechnology* 5: 64–72.

- Duponnois R, Plenchette C, Ba AM. 2001. Growth stimulation of seventeen fallow leguminous plants inoculated with *Glomus aggregatum* Senegal. *European Journal of Soil Biology* 37:181–186.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAOSTAT. 2016. <http://faostat3.fao.org/home/index.html#DOWNLOAD>.
- Garg N, Chandel S. 2011. Effect of mycorrhizal inoculation on growth, nitrogen fixation, and nutrient uptake in *Cicer arietinum* (L.) under salt stress. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry* 35: 205-214.
- Gianinazzi-Pearson V, Gianinazzi S, Trouvelot A. 1985. Evaluation of the infectivity and effectiveness of indigenous vesicular arbuscular fungal populations in some agricultural soils in Burgundy. *Canadian Journal of Botany* 63: 1521–1524.
- Gigou J, Stilmant D, Diallo AT, Cissé N, Sanogo MD, Vaksman M, Dupuis B. 2009. Fonio millet (*Digitaria exilis*) response to N, P and K fertilizers under varying climatic conditions in West Africa. *Experimental Agriculture* 45: 401–415.
- Graham JH, Drouillard DL, Hodge NC. 1996. Carbon economy of sour orange in response to different *Glomus* spp. *Tree Physiology* 16:1023–1029.
- Guewa-Przepióra E, Błaszowski J, Kurtyka R, Małkowski L, Małkowski E. 2014. Arbuscular mycorrhiza of *Deschampsia cespitosa* (Poaceae) at different soil depths in highly metal-contaminated site in southern Poland. *International journal Acta Societatis Botanicorum Poloniae* 82(4): 251–258.
- Guissou T, Ba AM, Ouadba JM, Guinko S, Duponnois R. 1998. Responses of *Parkia biglobosa* (Jacq.) Benth, *Tamarindus indica* L. and *Zizyphus mauritiana* Lam to arbuscular mycorrhizal fungi in a phosphorus-deficient sandy soil. *Biology and Fertility of Soils* 28: 194-198.
- Incesu M, Yesiloglu T, Cimen B, Yilmaz B, Akpınar C, Ortas I. 2015. Effects on growth of persimmon (*Diospyros virginiana*) rootstock of arbuscular mycorrhizal fungi species. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry* 39: 117–122.
- Javaid A. 2008. Allelopathy in mycorrhizal symbiosis in the Poaceae family. *Allelopathy Journal* 21(2): 207–218.
- Jideani IA. 1999. Traditional and possible technological uses of *Digitaria exilis* (acha) and *Digitaria iburua* (iburua): A review. *Plant Foods for Human Nutrition* 54: 363–374.
- Kanfany G. 2008. Diagnostic agronomique du fonio (*Digitaria exilis* Stapf) dans des parcelles paysannes en Casamance et au Sénégal oriental. Mémoire d'Ingénieur Agronome. École Nationale Supérieure d'Agriculture de Thiès (Sénégal), 45 p.
- Krüger M, Krüger C, Walker C, Stockinger H, Schuñler A. 2012. Phylogenetic reference data for systematics and phylotaxonomy of arbuscular mycorrhizal fungi from phylum to species level. *New Phytologist* 193: 970–984.
- Kumar A, Raghuvanshi R, Upadhyay RS. 2013. Vesicular-arbuscular mycorrhizal association in naturally revegetated coal mine spoil. *Tropical Ecology* 44(2): 253–256.
- Leye MEH, Diouf M, Ndiaye F, Diallo B, Diagne HM, Diop T. 2012. Effet de la mycorhization et de la salinité sur la croissance, les réponses biochimiques et la productivité de *Jatropha curcas* L., cultivée sous serre. *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 6(4): 1741–1760.
- Lu N, Zhou X, Cui M, Yu M, Zhou J, Kin Y, Li Y. 2015. Colonization with Arbuscular Mycorrhizal Fungi Promotes the Growth of *Morus alba* L. Seedlings under Greenhouse Conditions. *Forests* 6: 734-747.
- Marin M, Mari A, Ibarra M, Garcia-Ferriz L. 2003. Arbuscular mycorrhizal inoculation of micropropagated persimmon plantlets. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 78: 734–738.
- McGonigle TP, Fitter AH. 1990. Ecological specificity of vesicular arbuscular mycorrhizal associations. *Mycological Research* 94: 120–122.
- Mehraban A, Vazan S, Naroui Rad MR, Ardakany AR. 2009. Effect of vesicular-arbuscular mycorrhiza (VAM) on yield of sorghum cultivars. *Journal of Food, Agriculture and Environment* 7(3, 4): 461–463.
- Ndoye F, Kane A, Bakhom N, Sanon A, Fall D, Diouf D, Sylla SN, Bâ AM, Sy MO, Noba K. 2013. Response of *Acacia senegal* (L.) Willd. to

- inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi isolates in sterilized and unsterilized soils in Senegal. *Agroforestry Systems Journal* 87: 941-952.
- Ogbonnaya C. 2009. Physicochemical properties of acha (*Digitaria exilis* and *Digitaria iburua* spp) grains. *International Journal of Postharvest Technology and Innovation* 1(4): 360–366.
- Pandey R, Singh B, Nair TVR. 2001. Impact of Arbuscular-Mycorrhizal Fungi on Phosphorus Efficiency of Wheat, Rye, and Triticale. *Journal of Plant Nutrition* 28(10):1867–1876.
- Phillips JM, Hayman DS. 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: 158–161.
- Plenchette C, Fortin JA, Furlan V. 1983. Growth responses of several plant species to mycorrhizae in a soil of moderate P fertility. *Plant and Soil* 70: 199–209.
- Sánchez-Roque Y, Pérez-Luna Y, Becerra-Lucio A, Alvarez-Gutiérrez P, Pérez-Luna E, González-Mendoza D, Canseco-Pérez M, Saldaña-Trinidad S, Berrones-Hernández R. 2016. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi in the development of cultivars of Chili. *International Journal of Advance Agriculture Research* 4:10–15.
- Shamshiri MH, Mozafari V, Sedaghati E, Bagheri V. 2011. Response of Petunia Plants (Petunia hybrid cv. Mix) Inoculated with *Glomus mosseae* and *Glomus intraradices* to Phosphorous and Drought Stress. *Journal of agricultural science and technology* 13: 929–942.
- Sharma N, Yadav K, Aggarwal A. 2016. Growth Response of Two Phaseolus mungo L. Cultivars Induced by Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Trichoderma viride. *International Journal of Agronomy* ID 1524304, 6 pages, <http://dx.doi.org/10.1155/2016/1524304>.
- Singh RP, Singh S. 1992. Estimation of genetic parameters through generation of mean analysis in bread wheat. *Indian Journal of Genetics* 52: 369–375.
- Smith FA, Grace EJ, Smith SE. 2009. More than a carbon economy: nutrient trade and ecological sustainability in facultative arbuscular mycorrhizal symbioses. *New Phytologist* 182: 347–358.
- Smith S, Jakobsen I, Gronlund 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 Physiologist* 156: 1050–1057.
- Smith SE, Read DJ. 2008. *Mycorrhizal Symbiosis*, 3rd Edn. Academic Press, London.
- 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*: 217–221.
- USAID. 2008. Chaîne de valeur de la filière fonio au Sénégal. *International Resources Group*, Washington DC, 90 p.
- Usharani G, Sujitha S, Sivasakthi S, Saranraj P. 2014. Effect of arbuscular Mycorrhizal (AM) fungi (*Glomus fasciculatum* L.) for the improvement of growth and yield of maize (*Zea mays* L.). *Central European Journal of Experimental Biology* 3(2):30-35.
- Vietmeyer ND, Borlaugh NE, Axtell J, Burton GW, Harlan JR, Rachie KO. 1996. Fonio (Acha). Lost crop in Africa, Chapitre 3, BOSTID Publication: 58–75.
- Vodouhe SR, Sidibe A, Glele P, Kuta D, Diallo A. 2005. Promoting fonio production in West and Central Africa through germplasm management and improvement of post harvest technology. Final Project Report, IPGRI and CORAF/WECARD.
- Vodouhe SR, Zannou A, Dako EA. 2003. Actes du Premier Atelier sur la Diversité Génétique du Fonio (*Digitaria exilis*) en Afrique de l'Ouest. Conakry, Guinée, du 04 au 06 Août 1998. Institut International des Ressources Phytogénétiques (IPGRI), Rome, Italie.
- Yamawaki K, Matsumura A, Hattori R, Tarui A, Hossain MA, Ohashi Y, Daimon H. 2013. Effect of inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi on growth, nutrient uptake and curcumin production of turmeric (*Curcuma longa* L.). *Agricultural Sciences* 4(2): 66–71.

Zhang XH, Wang YS, Lin AJ. 2012. Effects of Arbuscular Mycorrhizal Colonization on the Growth of Upland Rice (*Oryza Sativa* L.) in Soil Experimentally Contaminated with Cu and Pb. *Journal of Clinical Toxicology* S3:003, 5 p.

Zhang H, Liu Z, Chen H, Tang M. 2016. Symbiosis of Arbuscular Mycorrhizal Fungi and *Robinia pseudoacacia* improves root tensile strength and soil aggregate stability. *Plos One* 12 pages, DOI: 10.1371.