

Evaluation Au Champ Du Potentiel De Croissance Et De La Production Du Riz (*Oryza Sativa* L.) Variété IR841 Inoculé En Pépinière Par Quatre Souches De Champignons Mycorhiziens À Arbuscules

Gnamkoulamba Atama,

Institut national de formation agricole (INFA) Tové, Ministère de l'Agriculture d'Elevage et de l'Hydraulique.

Faculté des Sciences, Université de Lomé, Laboratoire de Botanique et d'écologie Végétale

Ecole supérieure d'agronomie, université de Lomé, Laboratoire de recherche sur les Agroressources et la santé environnementale

Tounou Agbéko Kodjo,

Tchao Manguilibè,

Ecole supérieure d'agronomie, université de Lomé, Laboratoire de Recherche sur les Agroressources et la Santé Environnementale

Tchabi Atti,

Institut Supérieur des Métiers de l'Agriculture, Université de Kara

Adjevi Anani Kossi Mawuko,

Ecole supérieure d'agronomie, université de Lomé, Laboratoire de Recherche sur les Agroressources et la Santé Environnementale

Batawila Komlan,

Faculté des Sciences, Université de Lomé, Laboratoire de Botanique et d'Ecologie Végétale

Doi: 10.19044/esj.2018.v14n12p452 [URL:http://dx.doi.org/10.19044/esj.2018.v14n12p452](http://dx.doi.org/10.19044/esj.2018.v14n12p452)

Abstract

The growth and production of rice (*Oryza sativa* L.) variety IR841 were evaluated in response to arbuscular mycorrhizal fungus (AMF) inoculation. Four strains of AMF (*Acaulospora spinosa*, BEN 10, *Glomus mosseae* and *G. hoi*) were tested at 1.96×10^5 ; 3.91×10^5 and 7.82×10^5 spores/ha during two growing seasons 2016 and 2017, in a complete random block design. Uninoculated plants and plants fertilized with chemical fertilizer were used as control. The experiments conducted for 19 weeks including 5 weeks in nursery and 14 weeks in field tests showed better development and production of rice in inoculated plants compared to uninoculated controls. The tested rice variety was highly dependent on arbuscular mycorrhization. For

each strain the rate of mycorrhization was dose dependent. The different growth parameters such as the height of the plant, the development of the root system, the total biomass, the number of tillers, the number of fertile panicles per plant, the number of paddy grains per panicle and the paddy grain yield, were positively correlated with the rate of root mycorrhization. This study showed that biofertilizers based on mycorrhizal fungi provide important benefits to the plant, and can be used to improve the growth and yield of rice in Togo. The results are discussed in terms of using AMF as alternative to chemical fertilizer in rice production system.

Keywords: Arbuscular Mycorrhizal Fungal, mycorrhizal symbiosis, biofertilizer, growth and yield of rice

Résumé

La croissance et la production du riz (*Oryza sativa*) variété IR841 ont été évaluées en réponse à l'inoculation mycorrhizienne arbusculaire. Quatre souches de CMA (*Acaulospora spinosa*, Ben 10, *Glomus mosseae* et *G. hoi*) ont été testées aux doses d'inoculation de $1,96 \times 10^5$; $3,91 \times 10^5$ et $7,82 \times 10^5$ spores/ha suivant un dispositif en blocs aléatoires complets. Les plants non inoculés et les plants fertilisés à l'engrais chimique ont servi de témoins. Les essais conduits en serre et en champ pendant 19 semaines dont 5 en pépinière et 14 en culture, ont montré un meilleur développement et une meilleure production en grain paddy chez les plants inoculés comparés aux témoins non inoculés. La variété testée s'est révélée très dépendantes de la mycorrhization arbusculaire. Pour chaque souche, le taux de mycorhization augmente avec la dose d'inoculation. Les différents paramètres de croissance tels que la croissance en hauteur de la plante, le développement du système racinaire, la biomasse totale, le nombre de talles, le nombre de panicule par plant, le nombre de grains paddy par panicule et le rendement en grain paddy ont été fortement corrélés aux taux de mycorrhization des racines. Il ressort de cette étude que les biofertilisants à base de champignons mycorrhiziens procureraient des bénéfices importants à la plante, et peuvent être utilisés pour améliorer la croissance et le rendement du riz au Togo. Les résultats sont discutés en termes de l'utilisation des CMA comme alternative à l'utilisation des engrais chimiques.

Mots Clés: Champignons mycorrhiziens arbusculaires, symbiose mycorrhizienne, biofertilisant, croissance et production du riz

Introduction

La population en Afrique subsaharienne devrait plus que doubler d'ici 2050 pour atteindre 2 milliards d'habitants alors qu'elle n'était que de 800

millions en 2010 (PNUD, 2012). Dans le même temps, ses besoins alimentaires seront multipliés par quatre notamment pour le riz (Agrimonde, 2009). Seconde céréale dans le monde après le blé de par les superficies emblavées pour sa production, le riz est la céréale la plus consommée dans le monde (Siddiqui *et al.*, 2007). Il est considéré comme l'aliment de base dans les pays les moins avancés (FAO, 2004), et son importance ne cesse de croître au plan alimentaire et économique (Totin *et al.*, 2012). La forte préférence des populations urbaines africaines à la consommation du riz (Balasubramanian *et al.*, 2007 ; Krupnik *et al.*, 2013) se justifie par les importations de plus en plus croissantes de cette denrée, passant de 161 000 tonnes en 1991 à 5 364 000 tonnes en 2011 ; soit un taux de croissance d'importation de 6,5% (USDA, 2013). En Afrique il reste également la denrée la plus convoitée du siècle et sa production devrait plus que quadrupler pour faire face à l'exponentielle croissance de la population Africaine (Agrimonde, 2009). Nonobstant les progrès observés en termes d'extension des surfaces rizicoles, l'intensification de la production rizicole africaine reste insuffisante pour faire face aux besoins qui progressent sous la triple pression de la croissance démographique, de l'urbanisation et de l'augmentation de la consommation par habitant (Fagade, 2000). Au Togo, la consommation de cette denrée classée 3^{ème} après le maïs et le sorgho est entrée dans les habitudes alimentaires à tel point qu'en zone rurale comme dans le milieu urbain il ne se passe de jour où le riz n'est pas consommé. Selon une étude de la DSID (2013), la consommation moyenne nationale est de 27 kg par habitant et par an. Avec un taux moyen d'accroissement de la population de 2,4% par an, le besoin annuel en riz blanc sera de 108803 tonnes en 2018. La production locale du riz ne couvre pas les besoins du pays et de ce fait, les déficits en riz sont toujours compensés par les importations malgré les potentialités dont dispose le pays. En effet, le gouvernement togolais ne cesse de mener les efforts pour subventionner les engrais chimiques qui restent de nos jours de plus en plus chers pour le monde paysan. Outre cet aspect, ces intrants ne sont pas souvent bien utilisés par les producteurs et de ce fait ne restent pas sans effets néfastes sur la santé des sols agricoles et de la biodiversité en générale. Selon Mosse (1973), plus de 75 % des fertilisants phosphatés utilisés ne sont pas immédiatement disponibles pour les cultures, les différentes réactions biogéochimiques les transforment souvent sous des formes inutilisables particulièrement en milieux alcalins. L'agriculture intensive qui jadis a fait ses preuves à travers l'apport important d'intrants a montré ses limites notamment par la pollution des sols et de l'eau, le coût élevé des pesticides chimiques, les risques pour la santé des agriculteurs et consommateurs, l'apparition de bioagresseurs résistants aux pesticides, ou encore la fragilisation des écosystèmes.

Face aux exigences des consommateurs pour une agriculture saine et respectueuse de l'environnement, les agriculteurs se tournent de plus en plus

vers une intensification écologique (Griffon, 2010) principalement celle qui s'appuie sur la favorisation des pratiques agro-écologiques. En particulier, la lutte biologique par l'utilisation de microorganismes bénéfiques est de plus en plus considérée dans les programmes de contrôle des nuisibles des plantes. En raison de la pauvreté accrue des sols et des attaques des bioagresseurs que sont les maladies, insectes et nématodes, les pertes de production en culture de riz sont énormes et peuvent atteindre des niveaux estimés entre 60 et 100% de la production (Togola *et al.*, 2011). La production du riz est donc particulièrement menacée et l'approvisionnement de pays se fait essentiellement par des importations. Il est donc indispensable de trouver une solution à la faible productivité des sols et aux dégâts engendrés par les bioagresseurs en privilégiant une approche intégrée. Les champignons mycorhiziens à arbuscules (CMA) font partie de cette stratégie. Ces champignons du sol forment une association symbiotique avec près de 80 % des espèces végétales (Garbaye, 2013). Cette association se traduit par une amélioration de la croissance des plantes et une résistance et ou tolérance accrue vis-à-vis de nombreux stress abiotiques et biotiques. Parmi les stress biotiques, une résistance accrue des plantes a été constatée vis-à-vis des pathogènes, nématodes notamment et les insectes ravageurs (Karagiannidis *et al.*, 2002 ; Wardle *et al.*, 2004 ; Akkopru et Demir, 2005 ; Goicoechea *et al.*, 2010 ; Ren *et al.*, 2010). De récentes études ont montré l'avantage que procurent les CMA aux plantes en rendant accessibles les éléments minéraux peu inaccessibles naturellement à la plante (Cardenas, 2010).

L'introduction des espèces symbiotiques comme les mycorhizes dans l'optimisation des nutriments s'inscrit bien dans les systèmes écologiques d'intensification durable des productions agricoles et donc du riz. Bien que les champignons mycorhiziens soient omniprésents dans les sols naturels, les pratiques culturales perturbent le plus souvent leurs populations et leur diversité. Dans ces conditions, les nombreuses expériences conduites depuis des décennies démontrent le plus souvent que l'addition aux sols de spores ou propagules de ces champignons se traduit par un développement plus rapide de la plante et des rendements accrus. C'est dans ce contexte que la présente étude a été initiée dont l'objectif est d'évaluer l'effet de la relation symbiotique entre les CMA et le riz, variété IR841 sur les paramètres de production de la plante en station.

Matériel et méthode

Cadre expérimental

Les travaux de la présente étude ont été effectués de septembre-décembre 2016 et 2017 à la station d'expérimentation de l'Institut national de formation agricole (INFA) de Tové (N 06°53'06" et E 00° 38' 38") au Togo (Figure 1). Cette localité est située dans la région des Plateaux, préfecture de

Kloto à 112 km au Nord de Lomé, la capitale de la République du Togo. Le site est caractérisé par une végétation dominée par la savane humide parcourue par de vastes étendues de forêts sèches. Le site jouit d'un climat de type guinéen caractérisé par deux saisons de pluies et deux saisons sèches. La pluviométrie enregistrée au cours de la période de l'essai durant les deux saisons de culture est en moyenne de 300,9 mm en décembre. L'essai a été conduit sur un sol de bas-fonds.

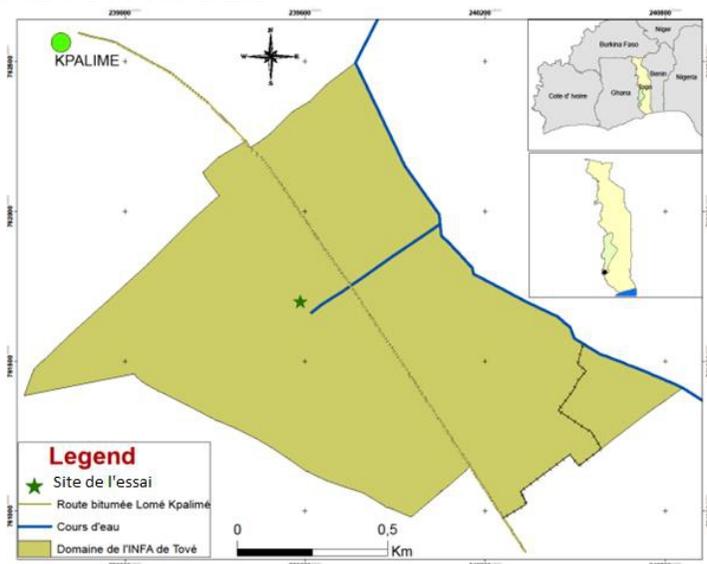


Figure 1. Site de l'essai à la station d'expérimentation de l'INFA de Tové

Matériel végétal

Les semences de base du riz, variété IR841 obtenues de l'Institut Togolais de Recherche Agronomique (ITRA) ont été utilisées dans tout l'essai. La variété IR841 a un cycle semis maturité de 115 à 120 jours avec un rendement potentiel de 6 t/ha et est la plus utilisée par les riziculteurs togolais.

Substrat de culture et inocula fongiques

Les spores de quatre souches de Champignons Mycorrhiziens Arbusculaires (CMA) dont *Glomus mosseae*, *G. hoï*, *Acaulospora spinosa* originaires du Togo et BEN 10, originaire du Bénin, ont été originellement isolées de l'igname. Les inocula ont été produits et multipliés par l'association de spores de chacune des quatre champignons avec de jeunes plants de riz à l'Institut International d'Agriculture Tropicale (IITA, Station du Bénin). Les plants de riz ont été cultivés en serre dans des pots contenant du substrat stérilisé constitué d'un mélange de sable de mer et de tourbe (2:1 v/v), pendant quatre mois pour assurer une bonne sporulation des souches. Au bout des quatre mois de culture, l'inoculum, constitué d'un mélange de spores et de fragments de racines a été collecté pour les essais.

Traitement des semences et inoculation en pépinière

Les semences ont été désinfectées dans une solution d'eau de Javel (5%), puis rincées et trempées dans de l'eau tiède pendant 48 heures. Les grains surnageant le liquide ont été retirés. Les pépinières ont été réalisées dans des pots plastiques (Figure 2) contenant un mélange stérilisé de sable de mer tamisé et de tourbe (2:1 v/v). Les grains de riz ont été semés dans des sillons dans lesquels les inocula sont apportés dans les substrats de cultures à proximité des semences enfin de favoriser leur mycorhization. Pour les plants témoins n'ayant reçu aucun inoculum, les grains ont été déposées directement dans le sol stérilisé de la pépinière sans apport de substrat de champignons. Les pots ont été maintenus en serre et les plants arrosés régulièrement deux fois par semaine pendant 5 semaines. Le taux de mycorhization des plants de 5 semaines d'âge a été évalué pour chaque traitement et les plants ont été ensuite repiqués suivant un schéma cultural de 2 cm x 2 cm soit 250000 plants/ha.

Dispositif expérimental et mise en place des essais en station

Un total de 14 traitements a été effectué suivant un dispositif en blocs complètement aléatoires avec 5 répétitions par traitement soit 70 unités parcellaires de 2 m x 4 m. Pour chaque souche, les doses de $7,82 \times 10^5$, $3,91 \times 10^5$ et $1,96 \times 10^5$ spores/ha ont été testées. Les plants fertilisés aux engrais chimiques NPK 15 15 15 et Urée à la dose recommandée de 200kg/ha et 100 kg/ha et les plants sans engrais chimiques ni CMA ont servis de respectivement de témoin relatif et de témoin absolu. Les traitements suivants ont été effectués :

- les plants témoin absolu non inoculés ;
- les plants témoin relatif non inoculés mais ayant reçu au champ un apport d'engrais chimiques NPK 15 15 15 et Urée à la dose recommandée de 200kg/ha et 100 kg/ha ;
- les plants inoculés avec *A. spinosa* à la dose de $7,82 \times 10^5$ spores/ha ;
- les plants inoculés avec *A. spinosa* à la dose de $3,91 \times 10^5$ spores/ha ;
- les plants inoculés avec *A. spinosa* à la dose de $1,96 \times 10^5$ spores/ha ;
- les plants inoculés avec *G. mosseae* à la dose de $7,82 \times 10^5$ spores/ha ;
- les plants inoculés avec *G. mosseae* à la dose de $3,91 \times 10^5$ spores/ha ;
- les plants inoculés avec *G. mosseae* à la dose de $1,91 \times 10^5$ spores/ha ;
- les plants inoculés avec *G. hoï* à la dose de $7,82 \times 10^5$ spores/ha ;
- les plants inoculés avec *G. hoï* à la dose de $3,91 \times 10^5$ spores/ha ;
- les plants inoculés avec *G. hoï* à la dose de $1,96 \times 10^5$ spores/ha ;
- les plants inoculés avec Ben 10 à la dose de $7,82 \times 10^5$ spores/ha ;
- les plants inoculés avec Ben 10 à la dose de $3,91 \times 10^5$ spores/ha ;
- les plants inoculés avec Ben 10 à la dose de $1,96 \times 10^5$ spores/ha.

L'expérience s'est étalée sur 19 semaines dont 5 semaines pour la pépinière et 14 pour la culture en station. Les plants ont été repiqués suivant un schéma cultural de 2 cm x 2 cm soit 250000 plants/ha. Le NPK a été appliqué 2 semaines après repiquage alors que l'Urée en deux temps aux 4 et 6 semaines après repiquage. L'apport d'eau a été fait au besoin.

Dynamique de colonisation des plants en serre en en champ

Pour évaluer la dynamique d'infection des racines de riz par les endomycorhizes testées, et sur la base des niveaux de mycorhization obtenus en pépinière, les plants inoculés à la dose moyenne de $3,91 \times 10^5$ spores/ha ont été maintenus en serre (Figure 2) et suivis durant toute la période de l'essai. Le taux de mycorhization a été évalué toutes les quatre semaines jusqu'à la 19^{ème} semaine après inoculation. Outre les plants maintenus en pépinière le taux de mycorhization des plants repiqués a été évalué à la récolte soit 14 semaines après repiquage.

Au laboratoire, analyse repose sur la technique de coloration préconisée par Phillips et Hayman (1970) et Vierheilig *et al.* (2005). Elle consiste à choisir 30 fragments de racines fines des plants sélectionnés de façon aléatoire au sein de chaque parcelle et de les lavées abondamment à l'eau de robinet pour les débarrasser des particules de sables, d'argiles et ou de limons puis les découper en fragments d'environ 1cm de longueur.



Figure 2. Inoculation artificielle des plants de riz variété IR841 par différentes souches de champignons mycorhiziens arbusculaires en serre avant repiquage au champ.

Les fragments de racines dans des tubes à essai en plastique sont mis dans un premier temps au bain-marie dans une solution d'hydroxyde de potassium (KOH à 10 %) pendant une heure de temps afin de vider les cellules de leur contenu cytoplasmique pour améliorer l'observation du champignon symbiotique. Ensuite, les fragments racinaires sont rincés à l'eau afin

d'éliminer toute trace de KOH, puis ils sont plongés successivement, dans du peroxyde d'hydrogène (H₂O₂ à 10 vol) pendant 40 minutes et dans l'acide chlorhydrique (HCl à 2 %) pendant 30 minutes pour les éclaircir, puis un nouveau rinçage à l'eau est effectué. Les fragments racinaires éclaircis sont colorés pendant trente minutes additionnelles de temps en utilisant le bleu de trypan (0,05%) et chauffés au bain marie pendant 30 minutes additionnelles. Les racines ainsi colorées sont étalées entre lames et lamelles pour les observations et comptage des spores. Quelques gouttes de glycérol (3ml) sont déposées sur les fragments de racines avant l'observation. Le taux d'infection a été estimé, sous loupe binoculaire (G X 40), à partir du nombre de fragments montrant les arbuscules et/ou les vésicules sur le total de fragments colorés.

Effet de la mycorhization sur les paramètres de production du riz au champ

A partir de la quatrième semaine après repiquage et chaque quatre semaines jusqu'à la fin de l'expérience, cinquante plants par traitement (dix par unité parcellaire) ont été examinés à chaque fois et les paramètres suivants ont été mesurés : la hauteur des plants (du collet à l'apex), le nombre de talles produites par plant et les paramètres de mycorhization. A la récolte, la longueur des racines, le nombre de panicules fertiles par plant, le nombre de grains par panicule ainsi que la masse sèche de la biomasse totale et le rendement en grains paddy ont été évalués.

Rendement en biomasse et en grains paddy

A la récolte soit 14 semaines après repiquage, les parties aériennes et racinaires de cinquante plants par traitement sont récoltées et la longueur des racines mesurée. La biomasse aérienne ainsi que la biomasse racinaire ont été estimées, des carrés de rendement d'un mètre carré de surface ont été délimités sur chaque unité expérimentale en raison de cinq carrés de rendement par parcelle élémentaire (un au niveau de chaque angle de la parcelle et un dernier au centre à la croisée des diagonales). Au total vingt –cinq carrés de rendements ont été délimités pour chaque traitement. Au niveau de chaque carré de rendement, tous les plants entiers du riz ont été arrachés racines y comprises. Les poids frais ont été déterminés par pesées directes et les poids secs ont été mesurés après séchage à l'étuve à 70°C pendant 72 heures. Le nombre de panicules fertiles par plant ainsi que le nombre de grains paddy par panicule sont comptés et pesés. La moyenne de rendements en biomasse et en grains paddy obtenus pour chaque traitement à partir des vingt-cinq carrés de rendements a été extrapolée à l'hectare pour obtenir le rendement en biomasse totale à l'hectare pour chaque traitement.

Analyse statistique

Les données obtenues sur le taux de mycorhization, la hauteur des plants, le nombre de talles, les rendements en grains paddy, en biomasse et le rendement en grains paddy ont été utilisées pour comparer les différents traitements par la procédure «General Linear Model» (GLM) en utilisant SPSS 21.1 (Statistical Package for the Social Sciences) version 2016. Les moyennes ont été cumulées pour les deux saisons de culture et comparées par Student-Newman-Keuls (SNK) au seuil de 5%. Les données en pourcentage ont été transformées avec Arcsin ($\sqrt{(x/100)}$) alors que les données numériques ont été transformées en log (x+1) avant les analyses statistiques (Quinn et Keough, 2002). A la récolte, une analyse de régression a permis d'établir la corrélation entre le taux moyen de mycorhization des racines et les différents paramètres de croissance et de production (croissance en hauteur, nombre de talles, la biomasse totale, nombre de panicules fertiles, nombre de grains paddy et le rendement.

Résultats

Effet de l'inoculation des semences sur le taux de mycorhization en pépinière et en champ

L'examen des plants en pépinière a révélé que 100% des plants examinés étaient colonisés par les CMA, avec des taux de mycorhization des racines variables de mycorhization (Tableau 1).

Tableau 1. Taux de mycorhization des racines de riz variété IR841 cinq (5) semaines après inoculation avec quatre souches de Champignons Mycorhiziens Arbusculaires et quatorze (14) semaines après repiquage en station

Souches de CMA	Taux de mycorhization des racines (% \pm ES) [‡]		
	7,82 x 10 ⁵	3,91 x 10 ⁵	1,96 x 10 ⁵
<i>Acaulospora spinosa</i>	56,14 \pm 2,75d	32,75 \pm 2,27f	23,16 \pm 1,43h
BEN 10	70,18 \pm 3,44b	40,93 \pm 1,84e	28,95 \pm 3,54g
<i>Glomus mosseae</i>	64,56 \pm 2,36c	37,66 \pm 2,21ef	26,63 \pm 2,10gh
<i>G. hoii</i>	79,33 \pm 1,87a	53,63 \pm 1,27d	37,92 \pm 1,26ef
Témoin relatif		0,00 \pm 0,00i	
Témoin absolu		0,00 \pm 0,00i	

[‡] Les données sont rapportées comme moyennes et erreurs standards pour cinq (5) répétitions par traitement. Les différences significatives entre les systèmes de culture sont indiquées par différentes lettres (test de Student-Newman-Keuls au seuil de 5%).

L'observation des racines cinq semaines après inoculation a montré que les racines ont bien été colonisées par les champignons mycorhiziens à arbuscules. Le pourcentage de colonisation des racines a varié en fonction des doses d'inoculation. Une bonne colonisation des racines a été obtenue aux deux plus fortes doses testées, alors que les fragments de racines colorés des plants non inoculés ont montré l'absence totale de colonisation mycorhizienne

(Tableau 1).

En condition de champ et après repiquage, la mycorhization des racines des plants inoculés en pépinière s'est poursuivie comme le montrent les niveaux élevés de mycorhization des racines évalués à la fin de cycle de la culture, soit à la dix-neuvième semaine après inoculation (Tableau 2). Contrairement aux observations faites en serre, les fragments de racines colorés des plants non inoculés ont révélé la présence de colonisation par les mycorhizes avec à la récolte des taux d'infection respectives de $35,42 \pm 2,78$ et $38,50 \pm 3,37\%$ pour le témoin absolu et le témoin relative. Ces taux restent toutefois significativement plus faibles que ceux des plants inoculés à toutes les doses sauf la dose de $1,96 \times 10^5$ spores/ha de *A. spinosa* a produit un taux d'infection des racines statistiquement similaire à celui des deux témoins (Tableau 2). Que ce soit en serre ou en champ, la dose d'inoculation a induit des différences significatives ($p < 0,05$) dans le taux d'infection des racines par les champignons durant toute la période de l'expérience, avec la souche *G. hoï* produisant le plus fort taux d'infection suivie de Ben 10, *G. mosseae* et *A. spinosa* (Tableaux 1 et 2).

Tableau 2. Taux de mycorhization des racines de riz variété IR841 quatorze (14) semaines après repiquage en champ des plants préinoculé en pépinière.

Souches de CMA	Taux de mycorhization des racines (% \pm ES) [‡]		
	$7,82 \times 10^5$	$3,91 \times 10^5$	$1,96 \times 10^5$
<i>Acaulospora spinosa</i>	$84,89 \pm 2,51b$	$62,52 \pm 2,36c$	$38,45 \pm 3,41f$
BEN 10	$89,08 \pm 1,07a$	$67,96 \pm 3,02c$	$48,06 \pm 2,20e$
<i>Glomus mosseae</i>	$87,85 \pm 1,94a$	$62,95 \pm 1,97c$	$44,21 \pm 2,47e$
<i>G. hoï</i>	$91,91 \pm 3,22a$	$84,56 \pm 2,17b$	$54,37 \pm 3,06d$
Témoin relatif		$35,42 \pm 2,78f$	
Témoin absolu		$38,5 \pm 3,37f$	

[‡] Les données sont rapportées comme moyennes et erreurs standards pour cinq (5) répétitions par traitement. Les différences significatives entre les systèmes de culture sont indiquées par différentes lettres (test de Student-Newman-Keuls au seuil de 5%).

Variation temporelle de la mycorhization des plants de riz en serre

L'évolution de taux de mycorhization des racines des plants de riz inoculés en serre par les quatre souches de champignons mycorhiziens arbusculaires à différentes doses de spores est rapportée dans la figure 3. Des résultats il ressort que l'infection des racines du riz par les endomycorhizes en serre a commencé dès les 5 premières semaines de culture. Cependant, les souches *G hoï* se sont installées plus rapidement que les souches BEN 10, *G. mosseae* et *A. spinosa*. En effet, à la 5^{ème} semaine, la souche *G. hoï* a atteint un taux d'infection de l'ordre de 55,13% contre uniquement 41,54; 36,53 et 30,53 % respectivement chez BEN 10, *G. mosseae* et *A. spinosa*. Quel que soit la souche considérée et à la dose de $3,91 \times 10^5$ spores/ha, les taux de

colonisation des racines ont augmenté avec le temps et atteignent des valeurs maximale de $90,04 \pm 1,08$; $82,06 \pm 1,89$; $81,53 \pm 1,74$ et $62,86 \pm 1,83$, respectivement chez *G. mosseae*, BEN 10, *G. mosseae* et *A. spinosa* 19 semaines après inoculation en serre (Figure 3).

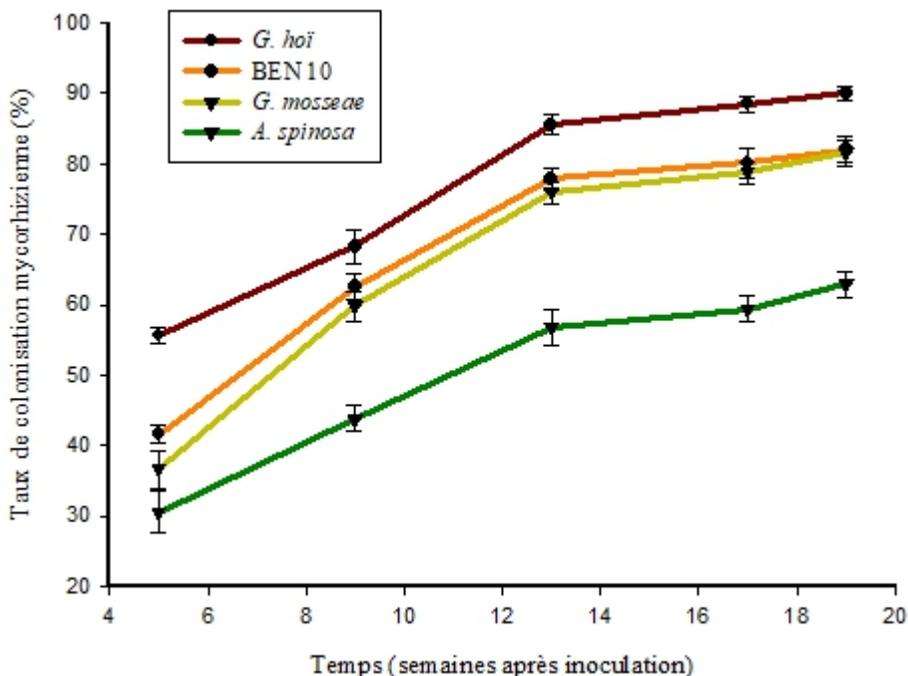


Figure 3. Evolution du taux de mycorhization des plants de riz inoculés par quatre souches de CMA, *Glomus mosseae*, *G. hoï*, *A. spinosa* et BEN 10 à la dose de $3,91 \times 10^5$ spores/ha dans les conditions contrôlées en serre.

Effet des CMA sur l'état verdoyant des plants et le développement du système racinaire des plants inoculés au champ

L'observation visuelle des plants inoculés a montré des plants de riz plus verdoyants que des plants non inoculés. Les plants inoculés ont développé un système racinaire plus dense et de couleur plus foncée comparé aux plants non inoculés (Figure 4).



Figure 4. Image montrant l'intensité de la verdure des plants de riz inoculés aux champignons endomycorhiziens (M) et des plants non inoculés (NM) et la coloration et l'épaisseur des racines de plants de riz non inoculés (A) et des plants inoculés au *G. hoï* (B) âgés de 19 semaines.

Les observations à la loupe binoculaire des racines des plants du riz ont révélé la présence en leur sein, des spores de CMA, des vésicules et des arbuscules dans certains cas (Figure 5). De ces résultats, il ressort que lorsque les plants de riz sont inoculés en pépinière par les CMA, ces derniers s'établissent au sein des racines de la plante où ils se développent en favorisant un meilleur développement des racines de la plante.

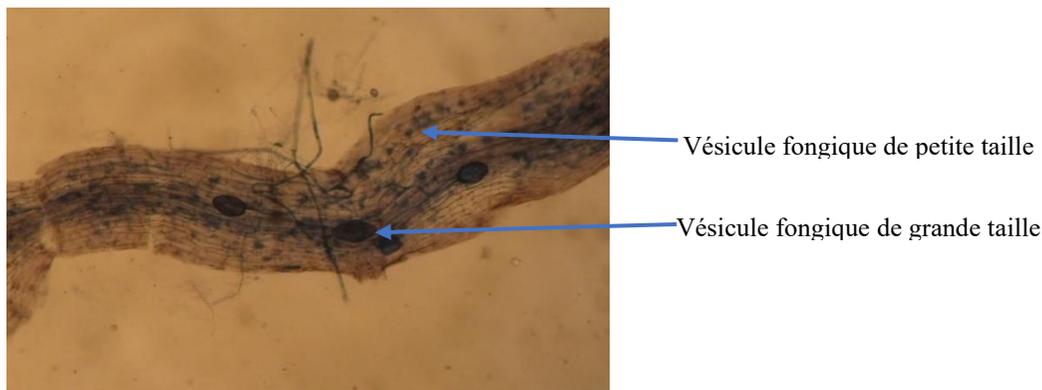


Figure 5. Observation à la loupe binoculaire (G x 40) des morphotypes des racines mycorhizées des plants inoculés âgés de 19 semaines d'âge montrant des vésicules fongiques de différentes tailles à l'intérieur de la racine.

Les résultats de l'effet des CMA sur le développement du système racinaire du riz sont présentés dans les Tableaux 2 & 3. Comparés au témoin sans engrais ni mycorhizes, les souches de champignons ont stimulé le développement du système racinaire des plants inoculés, avec des augmentations significatives de la longueur des racines ($F_{4, 56} = 130,661$; $p < 0.0001$) comparé aux plants non inoculés. A la dose de $7,82 \times 10^5$ spores/ha, les souches *G. hoi* et BEN 10, ont mieux stimulé le développement en longueur des racines de riz que la fertilisation minérale avec respectivement 14,01 et 9,50% d'augmentation de la longueur des racines par rapport aux plants fertilisés. A la même dose d'inoculation, les souches *G. mosseae* et *A. spinosa* se sont montrées significativement identique à l'engrais chimique (Tableau 3).

Tableau 3. Effet de l'inoculation des plants de riz par quatre souches de champignons endomycorhiziens sur le développement en longueur des racines

Souches de CMA	Longueur des racines (cm) ^f		
	$7,82 \times 10^5$ spores/ha	$3,91 \times 10^5$ spores/ha	$1,96 \times 10^5$ spores/ha
<i>G. hoi</i>	15,13 ± 1,44a	12,87 ± 0,384bc	11,33 ± 1,71c
BEN 10	14,53 ± 0,29a	12,27 ± 1,72bc	11,27 ± 1,39c
<i>Glomus mosseae</i>	13,40 ± 0,61ab	11,40 ± 0,82c	11,07 ± 1,83c
<i>Acaulospora spinosa</i>	13,13 ± 0,17ab	11,13 ± 0,51c	10,67 ± 0,22c
Témoin relatif		13,26 ± 2,30b	
Témoin absolu		8,73 ± 0,57d	

‡ Les données sont rapportées comme moyennes et erreurs standards pour cinq (5) répétitions par traitement. Les différences significatives entre les systèmes de culture sont indiquées par différentes lettres (test de Student-Newman-Keuls au seuil de 5%).

Le grand développement du système racinaire des plants de riz en symbiose avec les CMA s'est traduit par une plus grande masse racinaire observée chez les plants mycorhizés comparée au plant non inoculés (Tableau 4).

Tableau 4. Effet de l'inoculation des plants de riz sur la masse des racines sèches

Souches de CMA	Masse sèche des racines (g/plant) [‡]		
	7,82 x 10 ⁵ spores/ha	3,91 x 10 ⁵ spores/ha	1,96 x 10 ⁵ spores/ha
<i>G. hoï</i>	36,30 ± 0,69a	24,38 ± 2,24c	17,97 ± 1,03d
BEN 10	29,15 ± 1,62b	19,98 ± 2,94d	12,01 ± 1,40ef
<i>Glomus mosseae</i>	25,12 ± 2,55bc	15,22 ± 1,69de	11,92 ± 1,04ef
<i>Acaulospora spinosa</i>	21,63 ± 1,86c	13,75 ± 1,10e	10,17 ± 1,35f
Témoin relatif		33,55 ± 2,28a	
Témoin absolu		10,08 ± 4,85f	

‡ Les données sont rapportées comme moyennes et erreurs standards pour cinq (5) répétitions par traitement. Les différences significatives entre les systèmes de culture sont indiquées par différentes lettres (test de Student-Newman-Keuls au seuil de 5%).

Effet des CMA sur la croissance en hauteur des plants

Les résultats relatifs à l'effet des différentes doses de CMA sur la croissance en hauteur des plants sont présentés dans la figure 8. Les hauteurs moyennes des plants du riz variété IR 841 ont varié dans le temps en fonction des souches et les doses d'inoculation. Durant les 14 semaines de culture, et pour chaque période de mesure, les hauteurs entre plants de riz inoculés avec les différentes souches de CMA ont montré à toutes les périodes de mesure des différences significatives ($p < 0.05$) comparées aux plants non inoculés (Figure 6). Durant les 12 premières semaines de culture aucune différence significative n'a été notée entre les plants inoculés avec les souches *G. hoï*, BEN 10 à la dose de 7,82 x 10⁵ spores/ha et les plants fertilisés à l'engrais chimique ($p > 0,05$). Il en est de même entre les souches *G. mosseae* et *A. spinosa*. Quel que soit la dose de spores considérée, les courbes de croissance en hauteur ont été plus prononcées pour les plants inoculés que pour les plants non inoculés (Figure 6A, B & C).

A la dose moyenne de spores testées dans la présente étude, les quatre souches de CMA ont entraîné une croissance similaire de la hauteur de plants durant tout le cycle de développement de la plante avec des hauteurs des plants significativement plus faibles que celle des plants fertilisés durant les 12

premières semaines de la cultures ($P < 0,05$). Après la 12^{ème} semaine de la culture, les quatre souches vont induire une augmentation dans la croissance en hauteur pour atteindre le niveau des plants fertilisés à la 14^{ème} semaine (Figure 6B). A la plus faible dose testée par contre, les quatre souches se sont comportées différemment avec la souche Ben 10 qui a atteint le niveau des plants fertilisés à la 14^{ème} semaine de la culture, les trois autres souches étant restée inférieures aux plants fertilisés mais supérieures aux plants sans engrais ni mycorhize (Figure 6C).

A la maturité des plants inoculés, les hauteurs les plus élevées ont été observées à la dose de $7,82 \times 10^5$ spores/ha de *G. hoii* ($109,70 \pm 3,58$ cm) et les plus faibles à la dose de $1,96 \times 10^5$ spores/ha de *A. spinosa* ($81,05 \pm 1,20$ cm), contre $98,38 \pm 0,83$ et $72,16 \pm 3,34$ cm respectivement pour le témoin relatif et le témoin absolu (Figure 6A, B & C).

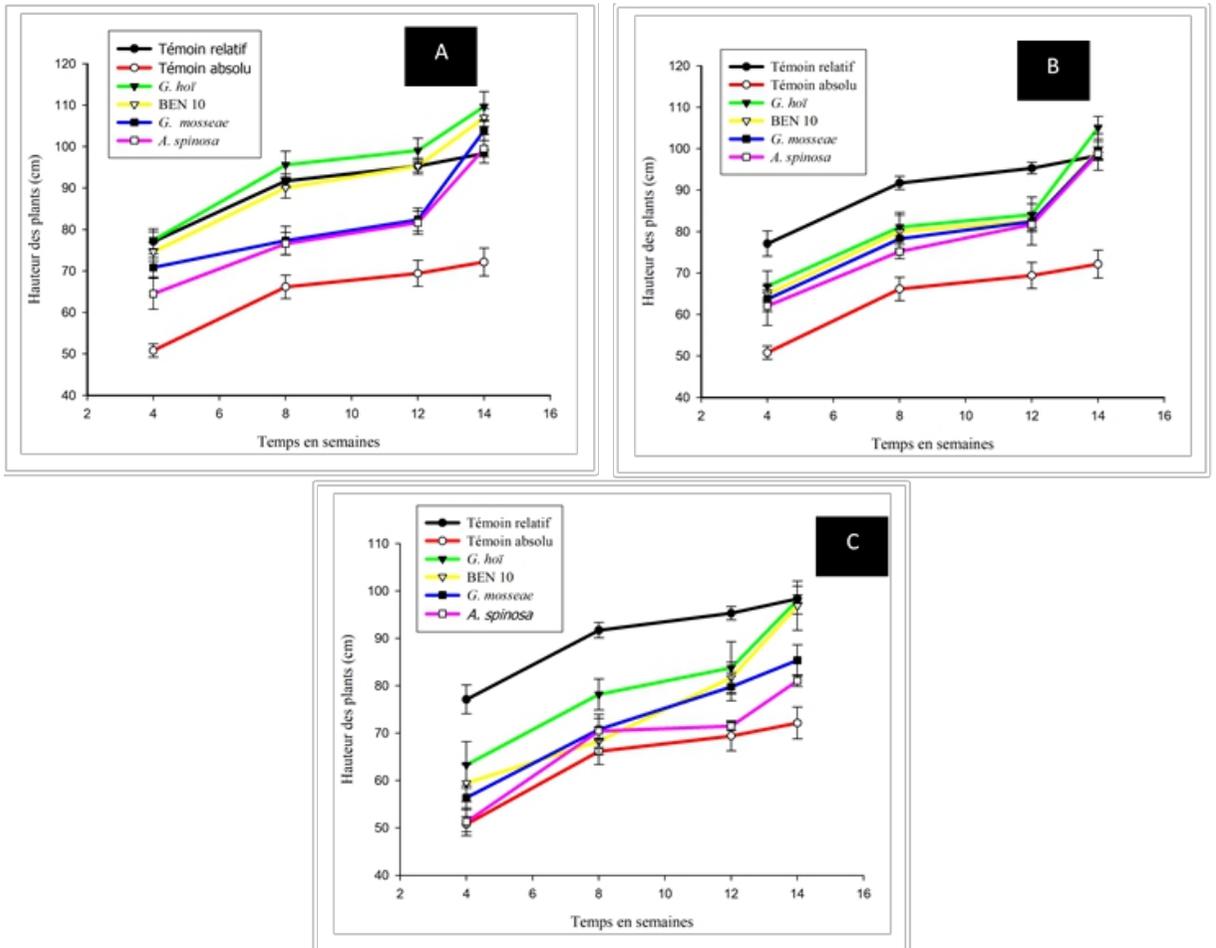


Figure 6. Croissance en hauteur des plants du riz témoins et inoculées par quatre champignons endomycorhiziens à la dose de $7,82 \times 10^5$ spores/ha (A), $3,91 \times 10^5$ spores/ha (B) et $1,96 \times 10^5$ spores/ha (C).

Effet des CMA sur la production de la biomasse sèche totale

Les résultats de l'effet des CMA sur la production de la biomasse totale sont représentés dans la figure 10. Les mesures de la biomasse totale sèche ont indiqué une évolution croissante avec la dose d'inoculation (Figure 7). Par contre, les plants sans engrais ni mycorhizes ont eu des poids de matière sèche nettement inférieurs comparés aux autres traitements. Ainsi, aussi bien la souche ($F_{5, 56} = 3,86; p = 0,03$) que la dose ($F_{4, 56} = 6,76; p = 0,004$) d'inoculation par les CMA ont permis une augmentation significative de la biomasse par rapport au témoin sans mycorhize ni engrais (Figure 7). Pour toutes les souches de CMA, l'augmentation de biomasse sèche a été plus remarquable chez les plants inoculés à la dose de $7,82 \times 10^5$ spores/ha. La souche BEN 10, *G. hoii* et *G. mosseae* ont induit les plus fortes productions en biomasse comparées à la souche *A. spinosa* (Figure 7).

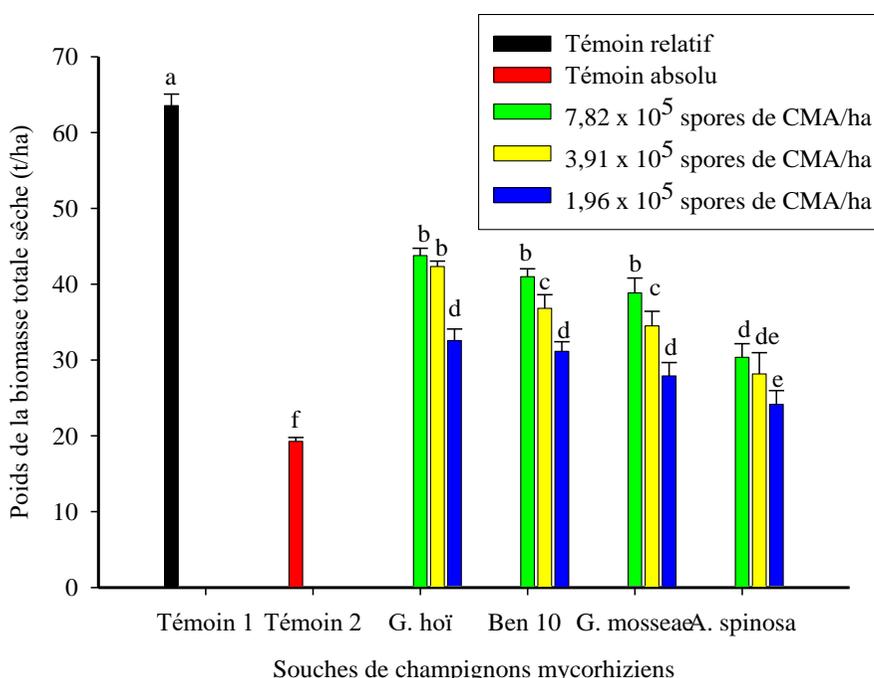


Figure 7. Effet de l'inoculation des plants de riz par quatre champignons endomycorhiziens sur la production de la biomasse sèche totale du riz. Les données sont rapportées comme moyennes et erreurs standards pour cinq (5) répétitions par traitement. Les différences significatives entre les systèmes de culture sont indiquées par différentes lettres (test de Student-Newman-Keuls au seuil de 5%).

Effet des CMA sur la production de talles

Les résultats de l'effet des CMA sur la production des talles sont présentés dans les figures 8A, B & C. Tout comme le développement en hauteur des plants, la production des talles a augmenté significativement dans le temps en fonction des souches testées et les doses d'inoculation ($p < 0,05$).

La plus faible production de talles a été obtenue dans le témoin absolu (Figure 8). Les plants inoculés, indépendamment de la souche et de la dose utilisé ont produit un nombre de talles similaire ($p > 0.05$) aux plants fertilisés à l'engrais chimique à la récolte (Figure)

Effet des CMA sur la production de panicules fertiles et de grains paddy

Les nombres moyens de panicules fertiles produites par plant et de grains paddy par panicule sont présentés dans la figure 9. Globalement, la souche de CMA que la dose d'inoculation ont induit une production significative de nombre de panicules produites par plant ($F_{5, 56} = 12,59$; $p < 0,001$ et $F_{4, 56} = 8,46$; $p < 0,001$) et de grains paddy par panicule ($F_{5, 56} = 6,76$; $p = 0,004$ et $F_{4, 56} = 7,71$; $p < 0,001$) comparé au traitement sans engrais ni mycorhize (Figure 9). Comparé aux plants de riz fertilisés, la mycorhization symbiotique de riz a entraîné une plus faible production de panicules fertiles ($p < 0.05$) quel que soit la dose de CMA testée dans cette étude (Figure 9). Les mêmes tendances ont été observées pour la production du nombre de grains paddy par panicule.

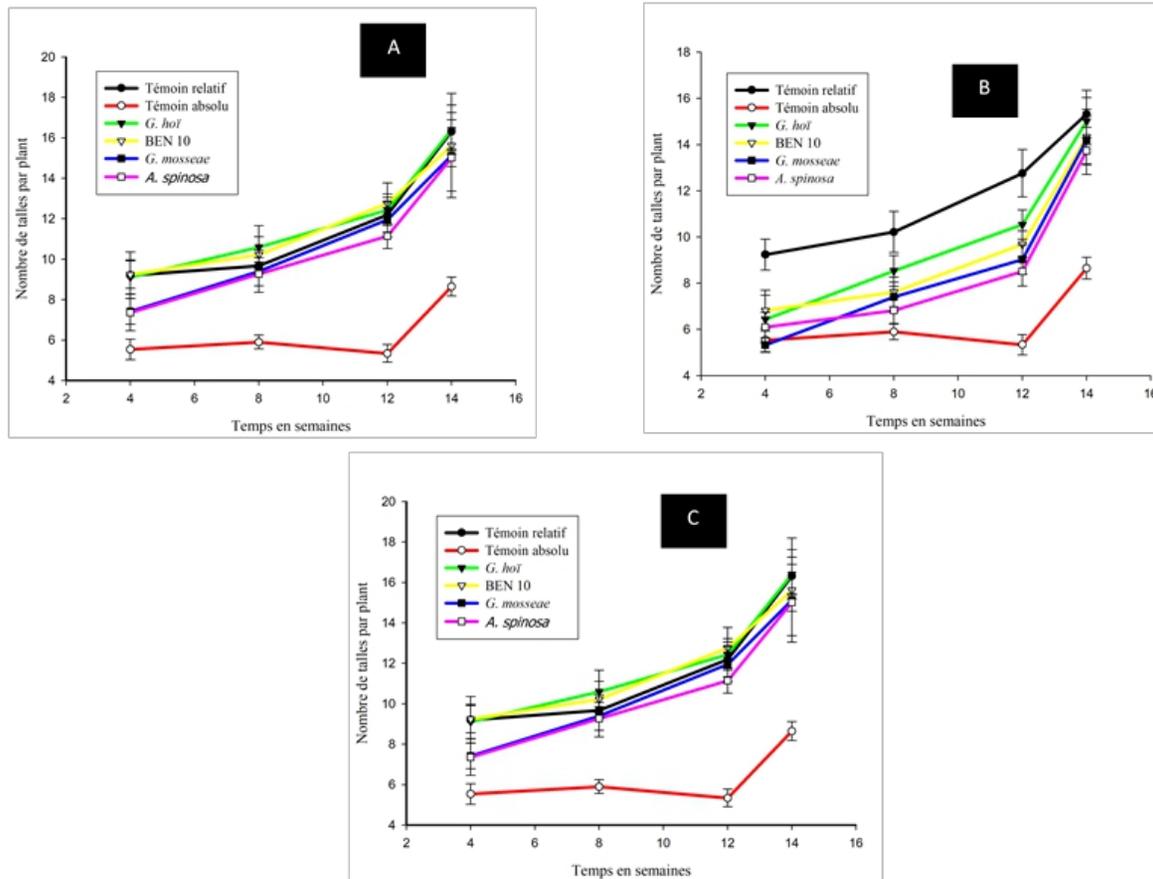


Figure 8. Production de talles par les plants du riz témoins et inoculés par quatre champignons endomycorhiziens à la dose de $7,82 \times 10^5$ spores/ha (A), $3,91 \times 10^5$ spores/ha (B) et $1,96 \times 10^5$ spores/ha (C)

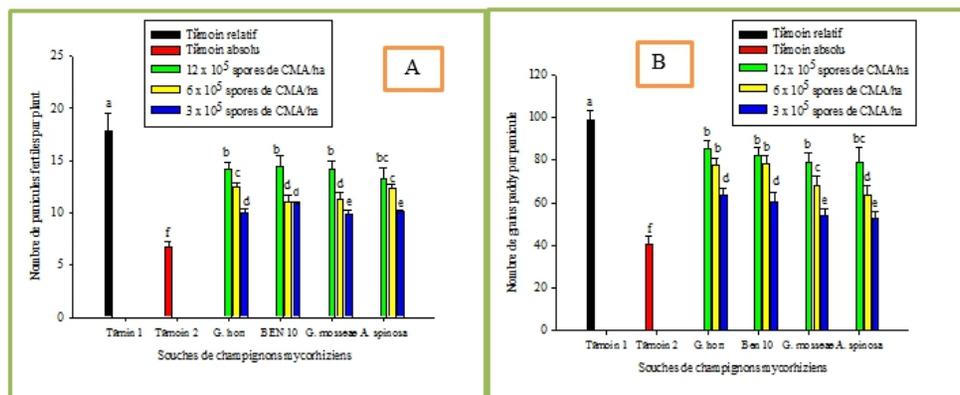


Figure 9. Effet de l'inoculation des plants de riz par quatre souches de champignons endomycorhiziens sur la production de panicules fertiles (A) et de grains par panicule (B). Les données sont rapportées comme moyennes et erreurs standards pour cinq (5) répétitions par traitement. Les différences significatives entre les systèmes de culture sont indiquées par différentes lettres (test de Student-Newman-Keuls au seuil de 5%).

Les résultats de la matrice de corrélation entre les différents paramètres morphologiques de croissance et le taux de mycorhization ont révélé une corrélation positive significative. Ainsi, les coefficients de détermination de ces corrélations étaient de 0,910 ; 0,578 ; 0,698 ; 0,767 ; 0,756 et 0,750 respectivement pour les paramètres suivants : longueur des racines, hauteur des plants, nombre de talles produites, nombre de panicules, poids de la biomasse totale sèche et nombre de grains paddy par panicule (Figure 10).

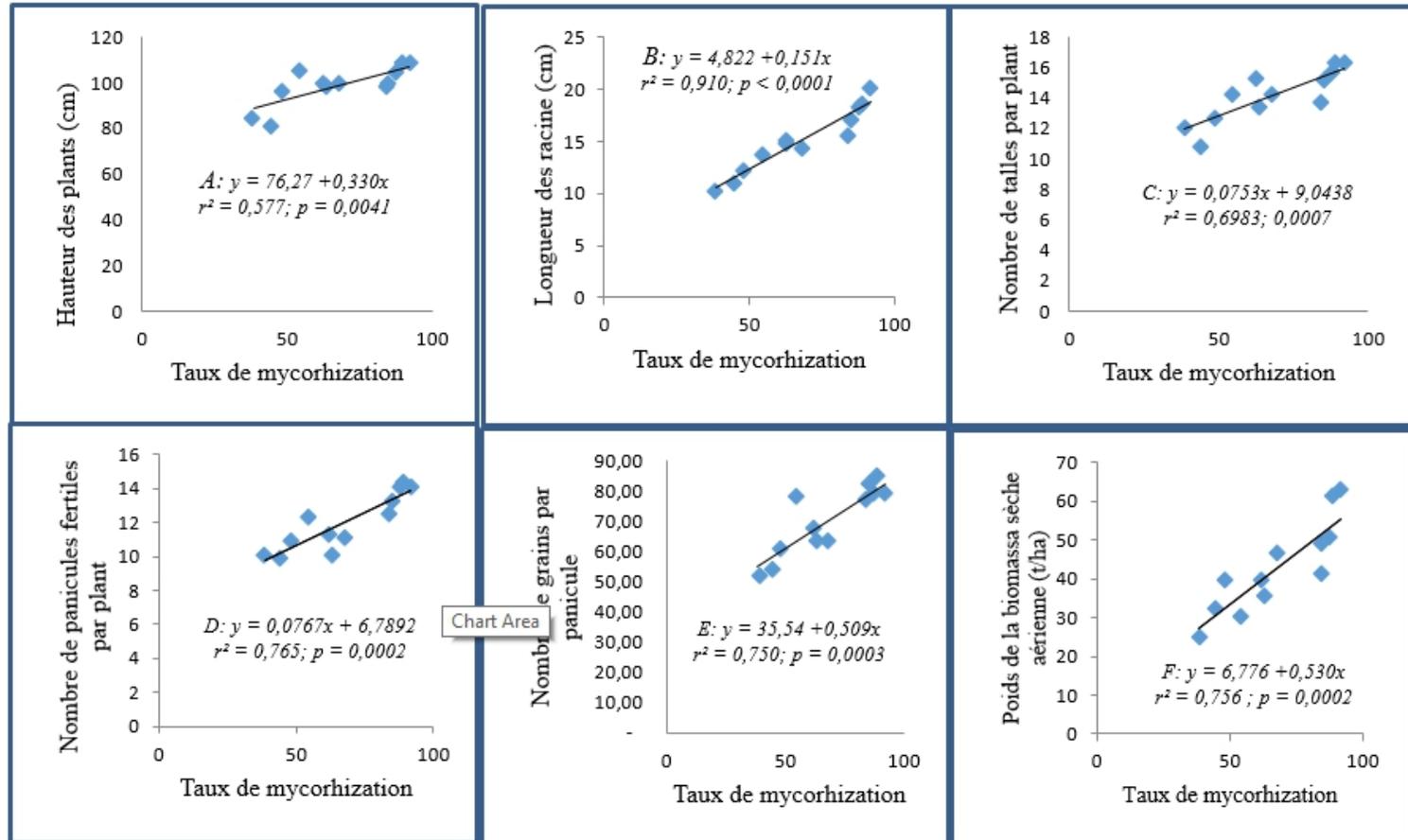
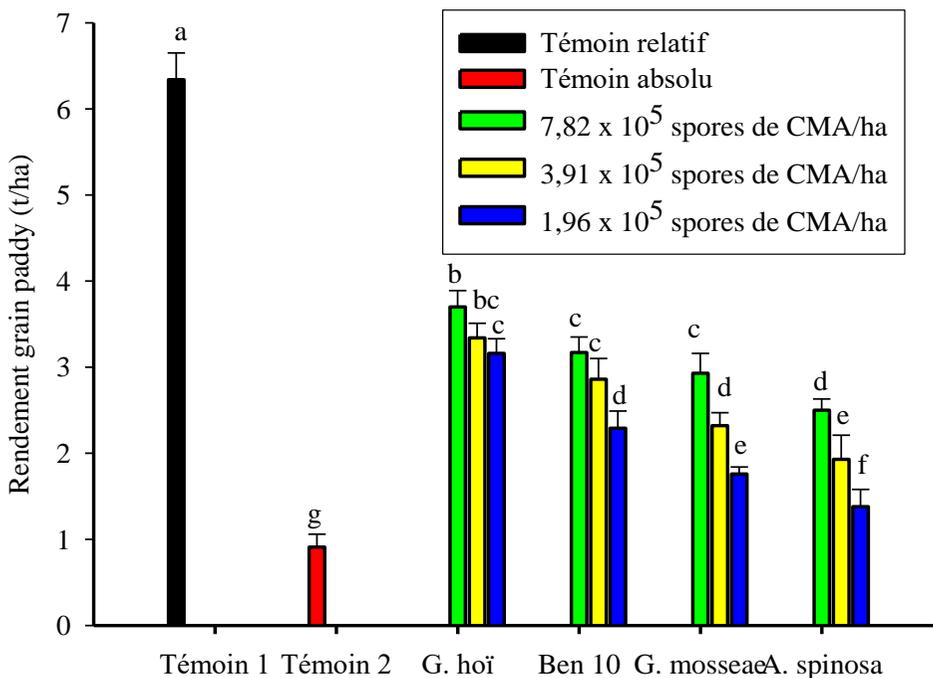


Figure 10. Relation linéaire entre le taux de mycorhization des racines et la hauteur des plants (A), la longueur des racines (B), le nombre de talles produites (C), le nombre de panicules fertiles (D), le nombre de grains paddy par panicule (E) et le poids de la biomasse totale sèche (F).

Sur le rendement global en grains paddy, les résultats présentés dans la figure 13 ont montré que lorsque les plants sont inoculés, les rendements ont varié entre $1,38 \pm 0,2$ (*A. spinosa* à la dose de $1,96 \times 10^5$ spores/ha) et $3,70 \pm 0,19$ t/ha (*G. hoï* à la dose de $7,82 \times 10^5$ spores/ha), contre $6,64 \pm 0,31$ t/ha pour les plants fertilisés et $0,91 \pm 0,15$ tonne/ha pour les plants qui n'ont reçu ni CMA ni engrais chimiques. Indépendamment de la dose d'inoculation, les plants mycorhizés ont présenté des rendements significativement plus élevés que les plants non inoculés ($F_{5, 56} = 41,66$; $p < 0,001$), tout en restant inférieurs aux plants fertilisés (Figure 11). Lorsque les souches de CMA et les doses d'inoculation sont comparées entre elles, on note que *G. hoï* et BEN 10 ont fourni les meilleurs rendements comparées aux souches *G. mosseae* et *A. spinosa* (Figure 11). La souche *A. spinosa* a donné les plus faibles rendements tout en restant meilleure par rapport au traitement sans engrais ni mycorhizes.



Souches de champignons mycorhiziens

Figure 11. Effet de l'inoculation des plants de riz par quatre souches de champignons endomycorhiziens sur le rendement en grain paddy. Les données sont rapportées comme moyennes et erreurs standards pour cinq (5) répétitions par traitement. Les différences significatives entre les systèmes de culture sont indiquées par différentes lettres (test de Student-Newman-Keuls au seuil de 5%).

Tout comme les paramètres de croissance évoqués plus haut, une corrélation positive significative a été observée entre le taux de mycorhization des racines et le rendement en grains paddy (Figure 12).

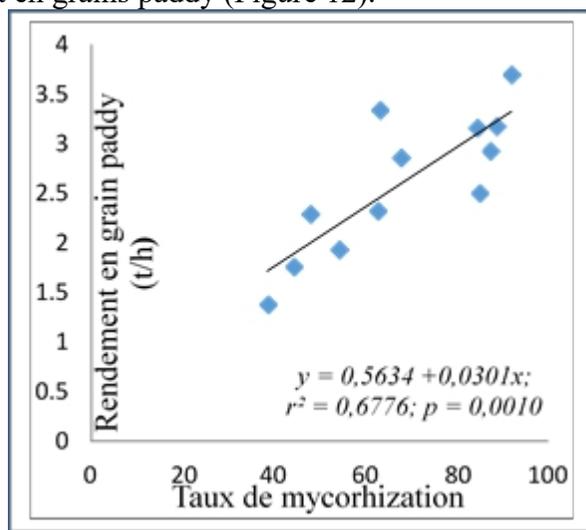


Figure 12. Relation linéaire entre le taux de mycorhization des racines et le rendement en grains paddy du riz, variété IR841 inoculés en pépinière par quatre souches de champignons mycorhiziens arbusculaires.

Dans les conditions de notre étude, l'inoculation en pépinière des plants de riz avant repiquage a eu des effets bénéfiques sur tous les paramètres de croissance et de production du riz variété IR841, comparé au traitement témoin sans engrais ni mycorhizes. Le tableau 5 résume l'augmentation des différents paramètres de croissance et production du riz induite par l'inoculation des plants aux champignons mycorhiziens arbusculaires comparés aux plants sans CMA ni engrais chimique. Ainsi, au terme des 14 semaines de culture après 5 semaines d'inoculation des plants de riz variété IR841 en pépinière par *G. hoi*, *G. mosseae*, BEN 10 et *A. spinosa*, les plants préinoculés ont induit en champ des gains en poids sec de la biomasse totale par rapport au témoin sans engrais ni mycorhize variant entre 4,88 ($1,96 \times 10^5$ spores/ha de *A. spinosa*) et 24,49 t/ha ($7,82 \times 10^5$ spores/ha de *G. hoi*) contre une augmentation de 44,26t/ha pour les plants fertilisés. De même le gain de rendement en grains paddy a varié de 0,47 à 2,43 t/ha pour les mêmes traitements, contre 5,97 t/ha (Tableau 5).

Tableau 5. Augmentation des différents paramètres de production du riz variété IR841 inoculés avec quatre champignons endomycorhiziens

Souches champignons mycorhiziens	de	% d'augmentation par rapport au témoin sans engrais ni champignons mycorhiziens				Gain de racinaire (g/plant)	Gain de biomasse sèche (t/ha)	Gain de rendement total grain (t/ha)	de paddy
		Hauteur	Longueur des racines	Nombre de talles	Nombre de panicules				
		7,82 x 10 ⁵ spores/ha							
<i>A. spinosa</i>		37,89	50,40	74,95	35,14	55,20	11,55	11,08	1,59
BEN 10		50,63	66,44	89,60	44,04	62,07	19,07	21,71	2,26
<i>G. mosseae</i>		44,04	53,49	80,54	44,18	55,71	15,04	19,57	2,02
<i>G. hoï</i>		51,05	73,31	88,63	46,99	67,88	26,22	24,49	2,79
		3,91 x 10 ⁵ spores/ha							
<i>A. spinosa</i>		36,96	27,49	64,16	12,86	25,08	5,14	8,85	1,02
BEN 10		38,11	40,55	65,70	25,78	53,89	9,90	17,54	1,95
<i>G. mosseae</i>		37,50	30,58	58,77	15,85	34,16	3,67	15,23	1,41
<i>G. hoï</i>		45,63	47,42	77,07	27,67	53,15	14,30	23,05	2,25
		1,96 x 10 ⁵ spores/ha							
<i>A. spinosa</i>		12,76	22,22	24,86	0,85	3,70	0,09	4,88	0,47
BEN 10		34,26	29,10	46,82	2,86	19,28	1,93	11,86	1,38
<i>G. mosseae</i>		17,86	26,80	38,73	2,59	5,96	1,84	8,63	0,85
<i>G. hoï</i>		35,91	29,78	55,68	11,56	25,93	7,89	13,29	2,43
Témoin relatif		57,12	51,89	73,53	82,45	94,95	23,47	44,26	5,97

Discussion

L'inoculation artificielle des semences de riz en pépinière a entraîné des taux de mycorhization racinaire croissants dans le temps et variables en fonction des souches testées et de la dose d'inoculation. Les souches *G. hoï* et BEN 10 se sont révélés les meilleures comparées aux souches *G. mosseae* et *A. spinosa*. L'absence de plants mycorhizés dans le témoin en pépinière confirme que le sol de la pépinière a été bien stérilisé. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par Wang

et al. (2015) et Jeong *et al.* (2015) qui ont rapporté des taux de mycorhization de l'ordre de 50% des semences du riz inoculées aux CMA en pépinière. Selon McKonigle et Miller (2000), le niveau de colonisation des racines dépend de la dose d'inoculation des CMA. De même Thongkhoun *et al.* (2017) ont rapporté une corrélation positive entre le temps de séjour en pépinière et l'intensité de mycorhization des plants. Le développement mycorhizien peut aussi être l'expression d'une interaction qui varie fortement en fonction de la plante hôte et des souches de champignons (Lumini *et al.*, 2011).

Nos résultats ont montré que les plants témoin non inoculés en pépinière ont été mycorhizés en champ après repiquage, avec des taux de mycorhization de $35,42 \pm 2,78$ et $38,5 \pm 3,37\%$ pour le témoin absolu et le témoin relatif, Cette mycorhization en champ confirme bien la relation symbiotique naturelle entre les CMA et le riz (Sivaprasad *et al.*, 1990; Solaiman et Hirata, 1995). Toutefois cette symbiose naturelle n'a pu renforcer au tant les capacités des plants à croître et à produire comme cela a été avec les plants préinoculés en serre dans cette étude. La mycorhization artificielle par un champignon très efficace et compétitif permet en effet, d'obtenir des gains importants de croissance et de production par rapport à la mycorhization naturelle (Smith & Read, 2008; Alguacil, 2011). Les études antérieures ont montré que l'inoculation artificielle des plants rend les CMA très compétitif et résistants parfois à la concurrence des mycorhizes naturelles. D'autre part, plus le plant est mycorhizé au départ par le CMA, moins les racines sont ensuite mycorhizées par d'autres champignons et meilleure est sa croissance (Chen *et al.*, 2006, Rincón *et al.*, 2007)

L'observation de la croissance des plants de riz variété IR841 réalisée après inoculation des plants par les quatre souches de champignons mycorhiziens dans notre étude a révélé que, par rapport aux plants non inoculés, les plants inoculés avaient une augmentation significativement plus élevée pour toutes les variables analysées (hauteur des plants, longueur de la racine, biomasse sèche totale), nombre de talles produites, nombre de panicules fertiles par plant et nombre de grains par panicule). Quatorze semaines après repiquage des plants inoculés en pépinière, des différences significatives sont enregistrées entre plants mycorhizés et non mycorhizés pour l'ensemble des paramètres de croissance observés. Cette augmentation est confirmée par la corrélation positive significative entre ces derniers et le taux de mycorhization des racines. Ces résultats viennent confirmer ceux de Jangde (2013) qui a rapporté en condition du champ, une augmentation significative de cinq paramètres de croissance du riz à savoir la hauteur des plants, le nombre de talles par plant, le nombre de panicules par plant et le nombre de grains paddy par panicule lorsque le riz est en association avec les CMA. Les effets bénéfiques de la symbiose du riz avec les champignons mycorhiziens sur la croissance et la production du riz est bien connu et

documenté (Sivaprasad *et al.*, 1990; Solaiman et Hirata, 1995). Plusieurs auteurs ont rapporté l'effet bénéfique de la symbiose entre les CMA et les plantes dans leur développement, la croissance et la production (El-yazeid *et al.*, 2007 ; Laminou *et al.*, 2009 ; Leye *et al.*, 2015). Solaiman et Hirata (1996) ont montré que l'inoculation du riz au stade pépinière avait des effets bénéfiques sur la croissance et la concentration des nutriments. Selon Hamza (2014), les mycorhizes en s'associant aux racines des plantes, facilitent un meilleur développement des racines permettant ainsi aux plantes de mieux se nourrir. Des études de Cardenas (2010), il ressort que les plants ayant subi une inoculation aux CMA seraient plus efficaces dans l'utilisation des nutriments du sol. Nos résultats corroborent avec ceux d'El-yazeid *et al.* (2007), qui ont rapporté dans leurs études que les CMA sont généralement impliqués dans l'amélioration de la croissance des plantes. Plusieurs espèces de CMA parmi lesquelles, *Glomus mosseae*, *G. hoï*, *G. versiformae*, *G. diaphanum*, *G. geosporum*, *G. cladoñius*, *G. clarum*, *Ascaulosporum* spp., *Archacospora* spp., *Paraglomus* spp., et autres sont souvent rapportés en association avec les racines de riz entraînant une augmentation de la surface racinaire pour une meilleure acquisition des nutriments (Zhang *et al.*, 2005, Gao *et al.*, 2006 ; Raimam *et al.*, 2007 ; Rajeshkannan *et al.*, 2009 ; Fernández *et al.*, 2011). Le grand développement en longueur du système racinaire obtenu dans cette étude sur les plants inoculés aux CMA dans nos essais auraient joué un rôle important dans le développement des plants de riz mycorhizés en leur permettant d'explorer un plus grand horizon du sol pour mobiliser plus d'éléments nutritifs pour la croissance et le développement des plants. En effet par la colonisation des racines des plants de riz, les mycorhizes forment un réseau mycélien extra-racinaire qui constitue un prolongement du réseau racinaire de la plante. Ce qui améliorerait la prospection racinaire de la culture et permettant une fixation des nutriments et de l'eau dans un volume de sol plus important que celui exploré par les racines seules (Finlay, 2007). **De ces essais il ressort que le système racinaire développé, observé sur les plants inoculés aux CMA, aurait joué un rôle important dans la nutrition, le développement des plants de riz mycorhizés, la production d'importantes quantités de biomasses totales (Rokhzadi *et al.*, 2008). En effet, les plants mycorhizés ont favorisé une plus grande production de la biomasse racinaire arienne avec des gains pouvant atteindre 26,22 g/plant de biomasse racinaire et 24,49 t/ha de biomasse arienne. Les travaux de Cimen *et al.* (2010) ont révélé que l'application des CMA sur les plants de la laitue en serre a augmenté leurs rendements en feuilles de plus de 200% par rapport aux plants non inoculés. Sur les plants de trèfle une augmentation de 65% de biomasse a été observée (Ben khaled *et al.*, 2003) alors qu'en culture de pastèque, Hamza (2014) a rapporté en trois mois une augmentation de 29% et de 31%, respectivement du poids de la matière sèche aérienne et racinaire des plants**

inoculés aux CMA comparés aux plants non inoculé. Dans leurs travaux au Niger, Laminou *et al.* (2009) ont montré que l'inoculation des CMA (surtout *G. intraradices*) aux plantes permettait à ces dernières d'augmenter leur rendement en biomasse totale.

La symbiose mycorhizienne fournit à la plante principalement du phosphore (Ezawa *et al.*, 2005) qui est un nutriment peu disponible pour les plantes en raison de sa mobilité réduite dans le sol et sa solubilité partielle mais aussi favorise l'accès à des formes complexes d'azote (Govindarajulu *et al.*, 2005 ; Cruz *et al.*, 2007), un nutriment essentiel et limitant à la production du riz. En plus de mettre à la disposition des plants des éléments nutritifs, les CMA sont connus pour leur capacité à conférer aux plants une meilleure capacité d'acquisition de l'eau comparé à une plante non mycorhizés (Bárzana *et al.*, 2012), entraînant une meilleure croissance des plants mycorhizés.

Conclusion

Les résultats de cette étude ont montré que la mycorhization du riz pourrait favoriser une meilleure production de la culture et contribuer à la mise au point des méthodes peu polluantes pour l'environnement en se substituant à la fertilisation chimique. Ces résultats obtenus devront cependant être répliqués dans plusieurs localités pour meilleur évaluation du potentiel de production des CMA.

Remerciements

Ces travaux ont été réalisés grâce au soutien financier du Programme de Productivité Agricole de l'Afrique de l'Ouest (PPAAO) à Gnamkoulamba Atama, dans le cadre du projet de renforcement de capacité des systèmes nationaux de recherche agricole. Les auteurs tiennent à remercier le DR ADOU Rahim Alimi pour son soutien et encouragement, et les techniciens de l'équipe de recherche en défense des cultures du Laboratoire de Recherche sur les Agroressources et la Santé Environnementale pour leurs appuis dans la collecte et le traitement des données.

References :

1. Agrimonde, 2009. Scénarios et défis pour nourrir le monde en 2050.
2. Akkopru, A. & Demir, S. (2005). Biological Control of Fusarium Wilt in Tomato Caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* by AMF *Glomus intraradices* and some Rhizobacteria: Journal of Phytopathology, 153: 544-550.
3. Alguacil, M. M., Torrecillas, E., Kohler, J., & Roldan, A. (2011). Amolecular approach to ascertain the success of "in situ" AM fungi inoculation in the revegetation of a semiarid, degraded land. Science of the Total Environment 409 : 2874 – 2880.

4. Balasubramanian , V. S., Hijmans, R.,J. & Otsdemuka, K. (2007). Increasing rice production in Sub-Saharan Africa. Challenges and opportunities. *Advances in Agronomy*, 94: 55–133.
5. Bárzana, G., Aroca, R., Paz, J. A., Chaumont, F., Martinez-Ballest, M. C., & Carvajal, M. (2012). Arbuscular mycorrhizal symbiosis increases relative apoplastic water flow in roots of the host plant under both well-watered and drought stress conditions. *Annals of Botany*, 109: 1009-1017.
6. Ben Khaled, L., Asunéion, G., Ouarraqi El. & Abdallah, O. (2003). Réponses physiologiques et biochimiques du trèfle (*Trifolium alexandrinum* L.) à la double association Mycorhizes- Rhizobium sous une contrainte saline. *Agronomie, EDP Sciences* 23: 571-580
7. Cardenas, R. E. (2010). La mycorhization favorise-t-elle l'accès à des formes d'azote complexes ? Étude sur la nutrition du pin parasol *Pinus pinea*. Centre National de la Recherche Scientifique. Université François Rabelais de Tour. 72p.
8. Chen, Y. L., Kang, L. H., Malajczuk, N., Dell, B. (2006). Selecting ectomycorrhizal fungi for inoculating plantations in south China: effect of *Scleroderma* on colonization and growth of exotic *Eucalyptus globulus*, *E. urophylla*, *Pinus elliottii*, and *P. radiata*. *Mycorrhiza*, 16: 251-259.
9. Cimen, I., Turgay, B. & Pirinç, V. (2010). Effect of solarization and vesicular arbuscular mychorrhizal on weed density and yield of lettuce (*Lactuca sativa* L.) in autumn season. *African Journal of Biotechnology*, 9: 3520-3526.
10. Cruz, C., Egsgaard, H., Trujillo, C., Ambus, P., Requena, N., Martins-Loucao, M. A. & Jakobsen, I. (2007). Enzymatic evidence for the key role of arginine in nitrogen translocation by arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant Physiology*, 144: 782–792.
11. DSID, 2013. Evaluation de la campagne agricole 2012-2013 au Togo. Lomé-Togo, 53p.
12. El-Yazeid, A. A., Abou-Aly, H. A., Mady, M. A. & Moussa, S. (2007). Enhancing growth, productivity and quality of squash plants using phosphate dissolving microorganisms (bio phos-phor) combined with boron foliar spray. *Research Journal of Agriculture and Biological Sciences*, 3: 274-286.
13. Ezawa, T., Hayatsu, M. & Saito, M. (2005). A new hypothesis on the strategy for acquisition of phosphorus in arbuscular mycorrhiza: up-regulation of secreted acid phosphatase gene in the host plant. *Molecular Plant Microbe Interaction*, 18: 1046–1053.
14. Fagade, S. O. (2000). Yield gaps and productivity decline in rice production in Nigeria. In: FAO (Ed.), *Proceeding of the Expert*

- Consultation on Yield Gap and Productivity Decline in Rice, Rome, Italy, 15–37.
15. FAO (2004). Le riz c'est la vie. Bulletin trimestriel de statistiques. Vingt troisième conférences régionales pour l'Afrique, année internationale du riz, Johannesburg.
 16. Fernández, F., Dell'Amico, J. M., Angoa, M. V. & de la Providencia, I. E. (2011). Use of a liquid inoculum of the arbuscular mycorrhizal fungi *Glomus hoi* in rice plants cultivated in a saline Gleysol: A new alternative to inoculate. *Journal of Plant Breeding and Crop Science* 3: 24-33.
 17. Finlay, R. D. (2007). The fungi in soil. *Modern Soil Microbiology*, 2nd edn (Van Elsas JD, Jansson JK & Trevors JT, eds), pp. 107–146. CRC Press, Boca Raton, FL.
 18. Gao, X., Kuyper, T. W., Zhang, C. Z. F. & Hoffland, E. (2006). Mycorrhizal responsiveness of aerobic rice genotypes is negatively correlated with their zinc uptake when nonmycorrhizal. *Plant Soil*, 290: 283–291.
 19. Garbaye, J. (2013). La symbiose mycorrhizienne. Une association entre les plantes et les champignons. Edition Quae.
 20. Goicoechea, N., Sanchez-Diaz, M., Garmendia, I., & Aguirreolea, J. (2010). Review: Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) as bioprotector agents against wilt induced by *Verticillium* spp. In pepper, Instituto Nacional de Investigacion y Tecnologia Agraria y Alimentaria (INIA).
 21. Govindarajulu, M., Pfeffer, P. E., Jin, H., Abubaker, J., Douds D. D., Allen, J. W., Heike Bücking, H., Lammers, P. J. & Shachar-Hill, Y. (2005). Nitrogen transfer in the arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Nature* 435: 819–823.
 22. Griffon, M. (2010). Pour des agricultures écologiquement intensives. La Tour d'Aigues, Editions de l'Aube, 112 p.
 23. Hamza, N. (2014). Application des mycorhizes arbusculaires en culture maraîchère cas de la pastèque (*Citrullus lanatus*). Université Ferhat Abbas Sétif 1, 83p.
 24. Jangde, N. (2013). Mycorrhizal Study in Selected Cultivars of Rice. Master thesis, The Rajendra Agricultural University, Bihar, Pusa. 111p.
 25. Jeong, K., Mattes, N., Catausan, S., Chin, J. H., Paszkowski, U. & Heuer, S. (2015). Genetic diversity for mycorrhizal symbiosis and phosphate transporters in rice. *Journal of Integrated Plant Biology*, 57: 969-979.
 26. Karagiannidis, N., Bletsos, F. & Stavropoulos, N. (2002). Effect of *Verticillium* wilt (*Verticillium dahliae* Kleb.) and mycorrhiza (*Glomus mosseae*) on root colonization, growth and nutrient uptake in tomato and eggplant seedlings. *Scientia Horticulturae*, 94: 145-156.

27. Krupnik, J. T., Shennan, C., Settle, H. W., Demont, M., Ndiaye, A. B. & Rodenburg, J. (2013). Améliorer la production du riz irrigué dans la Vallée du Fleuve Sénégal à travers l'innovation et l'apprentissage par l'expérience. *Agricultural systems*, 109: 101-112.
28. Leye, E. M., Ndiaye, M., Diouf, M. & Diop, T. (2015.) Etude comparative de l'effet de souches de champignons mycorhiziens arbusculaires sur la croissance et la nutrition minérale du sésame cultivé au Sénégal. *African Crop Science Journal*, 23: 211 – 219.
29. Lumini, E., Vallino, M., Alguacil, M. M., Romani, M. & Bianciotto, V. (2011). Different farming and water regimes in Italian rice fields affect arbuscular mycorrhizal fungal soil communities. *Ecological Applications*, 21: 1696-1707.
30. McKonigle, T. P. & Miller, M. H. (2000). The inconsistent effect of soil disturbance on colonization of roots by arbuscular mycorrhizal fungi in the field. *Apply Soil Ecology*, 12: 41-50.
31. Mosse, B. (1973). Advances in study of vesicular-arbuscular mycorrhiza. *Annual Review of phytopathology*. 11: 171-196.
32. Phillips, J. M. & Hayman, D. S. (1970). Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transaction of the British. Mycological Society*, 55: 158–160.
33. PNUD (2012). Rapport annuel 2011/2012. Programme des Nations Unies pour le développement. L'avenir durable que nous voulons. 44p.
34. Quinn, G. P. & Keough, M. J. (2002). *Experimental design and data analysis for biologists*. Cambridge University Press, Cambridge.
35. Raimam, M. P., Albino, U., Cruz, M. F., Lovato, G. M., Gaulart, T., Bernardi, C. M., Miyauchi, M., Nogueira, M. A. & Andrado, G. (2007). Interaction among free living N-fixing bacteria isolated from *Droseravilliosa var. villosa* and AM fungi (*Glomus clarum*) in rice (*Oryza sativa*). *Applied Soil Ecology*, 35: 25-34.
36. Rajeshkannan, V., Sumathi, C. S. & Manian, S. (2009). Arbuscular mycorrhizal fungi colonization in upland rice as influenced by agrochemical application. *Rice Science*, 16: 307–313.
37. Ren, L., Lou, Y., Sakamoto, K., Inubushi, K., Amemiya, Y., Shen, Q. & Xu, G. (2010). Effects of Arbuscular Mycorrhizal Colonization on Microbial Community in Rhizosphere Soil and Fusarium Wilt Disease in Tomato. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 41: 1399-1410.
38. Rincón, A., Parladé, J., Pera, J. (2007). Influence of the fertilization method in controlled ectomycorrhizal inoculation of two Mediterranean pines. *Annals of Forest Science*, 64: 577-583.
39. Rokhzadi, A., Asgharzadeh, A., Darvish, F., Nourmohammadi, G. &

- Majidi, E. (2008). Influence of plant growth-promoting rhizobacteria on dry matter accumulation and yield of chickpea (*Cicera rietinum* L.) under field condition. *American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences*, 3: 253-257.
40. Siddiqui, S. U., Kumamaru, T. & Satoh, H. (2007). Pakistan rice genetic resources-I: grain morphological diversity and its distribution. *Pakistan Journal of Botany*, 39: 841-848.
41. Sivaprasad, P., Sulochana, K. K. & Salam, M. A. (1990). Vesicular arbuscular mycorrhizae (VAM) colonization in lowland rice roots and its effect on growth and yield. *International Rice Research Newsletter*, 15: 14-15.
42. Smith, S. E., Read, D. J. (2008). *Mycorrhizal Symbiosis*, third ed. Academic Press, London, UK.
43. Solaiman, M. Z. & Hirata, H. (1995). Effect of indigenous arbuscular mycorrhizal fungi in paddy fields on rice growth and N, P, K nutrition under different water regimes *Soil Science Plant Nutrition*, 41: 505-514.
44. Solaiman, M. Z. & Hirata, H. (1996). Effectiveness of arbuscular mycorrhizal colonization at nursery-stage on growth and nutrition in wetland rice (*Oryza sativa* L.) after transplanting under different soil fertility and water regimes. *Soil Science Plant Nutrition* 42, 561-571.
45. Thongkhoun, S., Shinichi, H., Rie, T. K., Tanaka, A., Katsuya, Y., Takenaka, C. & Shingo, H., (2017). Varietal differences in the growth responses of rice to an arbuscular mycorrhizal fungus under natural upland conditions. *Plants signalling and behaviour*, 12: e1274483. doi: [10.1080/15592324.2016.1274483](https://doi.org/10.1080/15592324.2016.1274483).
46. Togola, A., Nwilene, F. E., Kone, B. & Chouqourou, D. (2011). Sédentarisation des populations des mouches Diopsides dans les agro-systemes rizicoles au Bénin. *Tropicultura*, 29 : 101-106.
47. Totin, E., van Mierlo, B., Saïdou, A., Mongbo, R., Agbossou, E., Stroosnijder, L. & Leeuwis, C. (2012). Barriers and opportunities for innovation in rice production in the inland valleys of Bénin. *NJAS, Wageningen. Journal of Life Sciences*, 60-63: 57-66.
48. USDA, (2013). Production, supply and distribution online. www.fas.usda.gov/psdQuery.asp.
49. Vierheilig, H., Schweiger, P. & Brundrett, M. (2005). An overview of methods for the detection and observation of arbuscular mycorrhizal fungi in roots. *Physiologia Plantarum* 125: 393–404.
50. Wang, Y., Li, T., Li, Y., Bjorn, L. O., Rosendahl, S., Olsson, P. A., Li, S. & Fu, X. (2015). Community dynamics of arbuscular mycorrhizal fungi in high-input and intensively irrigated rice cultivation systems. *Applied and Environmental Microbiology*, 81: 29-58.

51. Wardle, D. A., Bardgett, R. D., Klironomos, J. N., Setälä, H., van der Putten, W. & Wall, D. H. (2004). Ecological linkages between aboveground and below ground. *Biota Environmental science*, 304: 1629-1633.
52. Zhang, X. H., Zhu, Y. G., Chen, B. D., Lin, A. J., Smith, S. E. & Smith, F. A. (2005). Arbuscular Mycorrhizal fungi contribute to resistance of upland rice to combined metal contamination of soil. *Journal of Plant Nutrition*, 28: 2065–2077.