Journal of Applied Biosciences 135: 13750 - 13764

ISSN 1997-5902

Effet des champignons mycorhiziens Arbusculaires sur le phosphore des sols tropicaux et implication dans la biosynthèse du caroténoïde du manioc

Adrien NDONDA MALONDA[1], Timothée MAHUNGU NZOLA-MESO[1], Adrien MOANGO MANGA[2], Marie Claire YANDJU[3]

[1]International Institute of Tropical Agriculture (IITA). 4163, Avenue Haut-Congo, Kinshasa-Gombe, République Démocratique du Congo (RDC).

[2]Université de Kisangani, Faculté de Gestion de Ressources Naturelles Renouvelables, BP. 2012, Kisangani-Makiso, Province Orientale, RDC.

[3]Université de Kinshasa, Faculté des Sciences, Unité de Microbiologie, BP. 117, Kinshasa XI

Auteur correspondant : Adrien NDONDA MALONDA, A.Ndonda@cgiar.org , Téléphone : +243 81 96 44 630 et/ou +243 998879785, IITA - Kinshasa

Original submitted in on 6th December 2018. Published online at www.m.elewa.org/journals/ on 31st March 2019 **https://dx.doi.org/10.4314/jab.v135i1.2**

RESUME

Objectifs : Evaluer du point de vue agronomique les avantages attribués aux champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA) par rapport aux sols des zones des forêts humides et vérifier le rôle que le phosphore mobilisé par ces champignons jouerait dans la biosynthèse du caroténoïde.

Méthodologie et résultats : Deux variétés de manioc étaient soumises aux inoculations apportées seules ou combinées aux autres fertilisants. Les analyses de sol effectuées en amont et en aval du manioc ont permis de constater des changements significatifs en ce qui concerne l'acidité mesurée à 4,6 de pH avant le manioc et 6,3 après inoculation des CMA. Des changements sont également observés sur la structure du sol où on a observé des modifications partant de la structure particulaire au départ à une structure grumeleuse après application de fumier combiné aux inoculations des CMA. Ces inoculations ont fait augmenter la teneur du phosphore dans le sol à 7,5 %, l'azote à 4 % et le carbone à 13%. Le rendement du manioc a donné des moyennes de 55 t ha^{-1} de racines sous inoculation contre 21 t ha^{-1} de racines lorsque le sol n'était pas traité. On a noté des modifications significatives du caroténoïde total dans la racine de manioc lorsque le sol était inoculé et était plus pourvu en phosphore.

Conclusions et champs d'application des résultats : les champignons mycorhiziens sont présents dans les sols tropicaux des forêts humides et peuvent être multipliés sous le sorgho. Lorsqu'ils sont inoculés en champ de manioc, ils permettent à la fois des accroissements de rendement du manioc, la disponibilisation du phosphore autrefois complexé par les cations acides du sol et l'accélération de la biosynthèse du caroténoïde total du manioc jaune. La possibilité de réaliser des multiplications en cascade de ces champignons et leur conditionnement sur des substrats stériles permettra de fabriquer des inocula locaux qui pourront être utilisés comme fertilisant biologique en lieu et place des fertilisants minéraux conventionnels.

Mots clés : mycorhize, fumier, phosphore, acidité, caroténoïde

Effect of Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) on total phosphorus in tropical forest fallow soils and their involvement in carotenoid biosynthesis in cassava

ABSTRACT

Objectives: To evaluate agronomically the advantages attributed to Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) compared to soils in humid forest zones and verify the role that phosphorus mobilized by these fungi would play in the biosynthesis of carotenoid of yellow cassava.

Methodology and results: Two varieties of cassava were inoculated alone or in combination with other fertilizers. Soil tests carried out before cassava cultivation and after harvest showed significant changes in acidity measured at 4.6 pH before cassava and 6.3 after inoculation with AMF. Changes were also observed in soil grain size with 71% sand initially and 65.5% after application of manure combined with inoculations (LSD.05 = 2.7%). These inoculations increased the soil phosphorus content to 7.5%, nitrogen to 4% and carbon to 13%. Cassava yield averaged 55 t ha-1 under inoculation versus 21 t ha-1 when the soil was untreated. Significant changes in total carotenoid in the cassava root were noted when the soil was inoculated and had a higher phosphorus content.

Conclusions and application findings: Mycorrhizal fungi are present in tropical soils of moist forests and can be propagated under sorghum. When inoculated in the cassava field, they allow both increases in cassava yield, the availability of phosphorus once complexed by acidic soil cations and the acceleration of the total carotenoid biosynthesis of yellow cassava. The possibility of performing cascade multiplications of these fungi and their conditioning on sterile substrates will make local inocula that can be used as biological fertilizer instead of conventional mineral fertilizers.

Keywords: mycorrhiza, manure, phosphorus, acidity, carotenoids

INTRODUCTION

La couleur jaune ou orange de la pulpe des racines chez le manioc est attribuée à la présence du caroténoïde (Britton *et al.* 1995). Cette molécule joue plusieurs rôles chez l'homme et les animaux puisqu'il sert de précurseurs à la vitamine A, le rétinol (Armstrong, 1999 et Bauernfeind, 1981). En effet, la première étape dans la formation du rétinol est le clivage de la double liaison centrale du β-carotène, ce qui permet d'obtenir deux molécules de rétinal qui, après réduction, donnent la vitamine A (Morin-Savy, 2007). Les caroténoïdes seraient également impliqués dans la prévention de certaines maladies. Leur effet bénéfique a été montré dans les maladies de l'œil dont la DMLA (Dégénérescence Maculaire Liée à l'Age), les maladies cardiovasculaires, certains cancers et l'érythème induit par la lumière (Eisenreich *et al.,* 2001). L'action des caroténoïdes dans la prévention de ces maladies serait liée à leur pouvoir antioxydant (Bast *et al.,* 1998). Aussi, les caroténoïdes auraient un rôle dans la régulation du système immunitaire et dans la protection de la stabilité génomique (Fraser and Bramley, 2004). Par définition, les caroténoïdes sont des molécules lipidiques appartenant à la famille des terpènes qui représentent une grande classe de composés à fonctions très variées. L'appartenance à cette catégorie est alors établie sur les critères de structure et de biosynthèse. L'unité de base de ces structures est l'isoprène composé à 5 atomes de carbone (C5). Les terpènes sont issus de la condensation d'au moins deux isoprènes. La classification en monoterpène, diterpène ou tétraterpène dépend du nombre d'isoprène condensé. Les caroténoïdes sont dans la catégorie des tétraterpènes car, généralement issus de la condensation de 8 unités C5 et sont donc des composés à structure hydrocarbonée généralement composés de 40 atomes de carbone (structure en C40), mais il existe aussi des structures en C30 ou C50 (Armstrong, 1994). La couleur est l'élément caractéristique de ces molécules, elle peut varier du jaune au rouge (Morin-Savy, 2007). Aussi, il confirme l'importance du carotène dans la photosynthèse. Selon lui, le

carotène ne contribue pas activement à la photosynthèse mais absorbe le trop plein d'énergie de la chlorophylle afin d'éviter la formation d'espèces réactives oxygénées. En quelque sorte, il pense qu'une forte photosynthèse permet à la plante de synthétiser plus de carotènes pour jouer ce rôle. C'est alors qu'un bon contrôle du rapport Carbone/Azote (C/N) dans la plante en faveur de l'assimilation photosynthétique jouerait un rôle positif. Un apport en Azote par exemple permettrait un développement plus important de la biomasse foliaire et ainsi contribuerait à une synthèse plus importante du β-carotène (Kugler, 1986). L'importance des caroténoïdes dans la bio fortification du manioc fait l'objet de sélection génétique en République Démocratique du Congo (RDC) et vise la mise au point des variétés riches en β-carotène. Des progrès réels sont déjà observés avec cette démarche mais on pense aussi qu'avec une intégration d'autres méthodes visant des apports des certains éléments minéraux au sol, constituerait un véritable tournant pour parvenir à l'obtention des racines de manioc plus pourvue en caroténoïde. Duponnois *et al*., 2008 et Hecht *et al.,* 2001 avaient observé que le phosphore participait essentiellement dans la synthèse du β-carotène. Cependant, à cause de l'acidité qui caractérise les sols sous les tropiques, on retrouve que cette molécule est plus souvent sous une forme non assimilable par les végétaux car complexé par des cations acides du sol tels que l'Al^{3+}, le Fe^{3+}, le H^{+}, etc. Les CMA apparaissent comme des sites privilégiés d'absorption et d'accumulation de phosphore. Les phosphatases des mycosymbiotes jouent un rôle dans la mobilisation du phosphore interne par des hyphes mycéliens et dans le recyclage du phosphore immobilisé dans le sol sous forme organique par hydrolyse des esters phosphorylés (Bondonga *et al*., 2011*)*. Le phosphore des composés organiques peu solubles passe ainsi sous forme d'orthophosphate (Bolan, 1991), forme dont la concentration dans la solution du sol est très faible (un micro molaire = 1 µM) (Mousain, 1989). L'absorption du phosphore par les racines des plantes se fait essentiellement sous la forme d'orthophosphate ($H_2PO_4^-, HPO_4^{2-}, PO_4^{3-}$). On note en plus que les CMA (Champignons Mycorhiziens arbusculaires) sont des biotrophes obligatoires qui, sans l'interaction avec la plante hôte qui leur fournit des éléments carbonés, ne peuvent accomplir leur cycle de développement (Smith & Read, 2008). Les raisons du caractère obligatoire de cette biotrophie restent encore mal connues. Cependant les données de séquençage récentes suggèrent qu'elle ne serait pas liée à la perte de gènes essentiels, mais plutôt à un contrôle par la plante de l'activité métabolique du champignon (Tisserant *et al.,* 2012). Cette particularité ne permet pas d'obtenir des souches vivantes d'inoculum viables pendant une période relativement longue. Ainsi, les recours aux multiplications en cascade sous des espèces végétales identifiées et dites hôtes est la méthode qui conviendrait la mieux pour développer des inocula capables de capitaliser les rôles essentiels attribués aux CMA. Cette étude vise à vérifier l'efficacité des endomycorhizes locaux en zones forestières sur la mobilisation des éléments minéraux du sol et plus particulièrement sur le phosphore et aussi, établir une relation entre cette molécule et la concentration du caroténoïde dans la racine de manioc à chair jaune.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

L'étude ayant trait à une valorisation des organismes microscopiques exige du matériel approprié devant permettre d'identifier les champignons en présence et dans la mesure du possible le quantifier. La plupart des analyses portant tant sur le sol que sur les tissus végétaux ont été réalisées au laboratoire de Pédologie de la Faculté des Ressources Naturelles Renouvelables de l'Université de Kisangani en RDC. Le iCheck et ses divers équipements ont servi pour les analyses du bêta-carotène. L'accès à des logiciels utilitaires et spécifiques entre autres Fieldbook, GenStat, Statistic Analysis Software (SAS), LocClim Climate Estimator, a permis la gestion des données statistiques et climatiques.

Situation géographique des sites : Les essais étaient réalisés dans deux sites de la zone forestière de

Kisangani. Le premier dans les hinterlands de la ville de Kisangani et dont les coordonnées sont (00°31'57.82'' N, 025°12'00.41''E, Altitude : 455 m) et le second dans le site expérimental de Litoy (00°42'48.00'' N ; 025°14'32.13''E, Altitude : 423 m). La figure 1 présente la position de ces deux sites par rapport à la Province de la Tshopo et à la République Démocratique du Congo

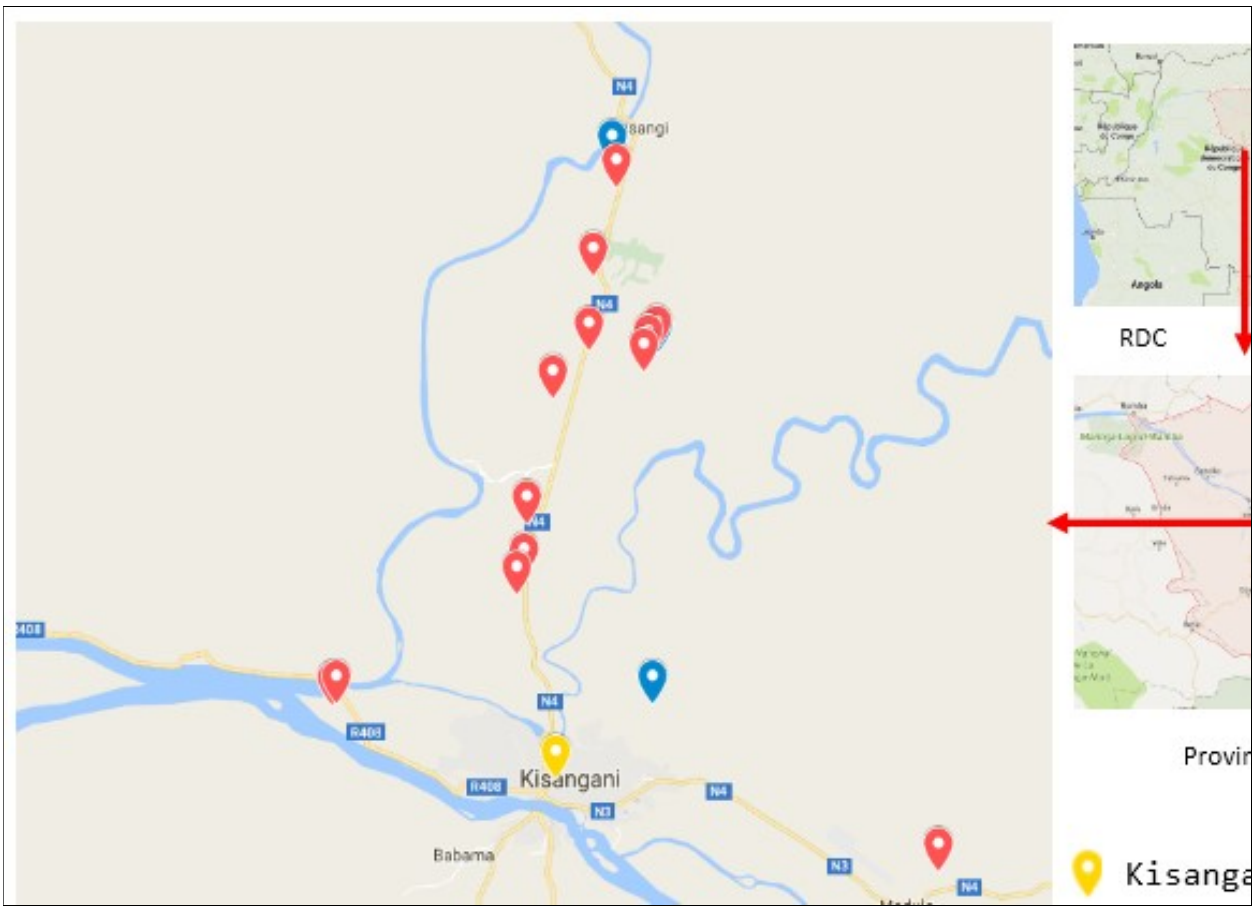

Figure 1 : Carte du site des expériences

Le climat : Les sites de Kisangani et Litoy sont situés dans la zone de forêt humide appartenant au régime climatique du type A_f dans la classification de Köppen.

Les pluies y sont abondantes et régulières durant toute l'année et ces périodes pluvieuses sont intercalées par des petites saisons sèches moins marquées partant de la deuxième moitié du mois de décembre jusqu'à la première moitié du mois de mars de l'année suivante puis de manière moins marquée encore entre la seconde moitié du mois de juillet jusqu'à la fin de la première moitié du mois de septembre. Durant l'expérimentation, les conditions des précipitations et des températures mensuelles sont présentées dans le diagramme ombrothermique à la figure 2. Dans cette figure, il apparait très clairement que les pluies se réduisent durant les périodes précitées. Les moyennes de températures durant la période du déroulement des expérimentations étaient de 25.6°C dans les hinterlands de Kisangani et 24.8°C à Litoy. Les conditions d'humidité de l'air ont oscillé autour de 85 % dans les deux sites. L'expérimentation était conduite durant deux années agricoles du manioc partant de Juillet 2014 à Août 2016. La lame annuelle des pluies était de 1671 mm entre juillet 2014 et juillet 2015 et 1837 mm entre Août 2014 et Août 2015 à Litoy. Les moyennes des températures dans ce site étaient de 25.5°C entre juillet 2014 et juillet 2015 puis de 25.7°C entre Août 2015 et Août 2016. Dans les hinterlands de Kisangani, on a obtenu des moyennes des pluies de l'ordre de 1580 mm entre Juillet 2014 et juillet 2015 et 1860 mm entre Août 2015 et Août 2016. Dans ce site les températures moyennes ont été de 25.6 °C entre juillet 2014 et juillet 2015 et 26°C entre Août 2015 et Août 2016.

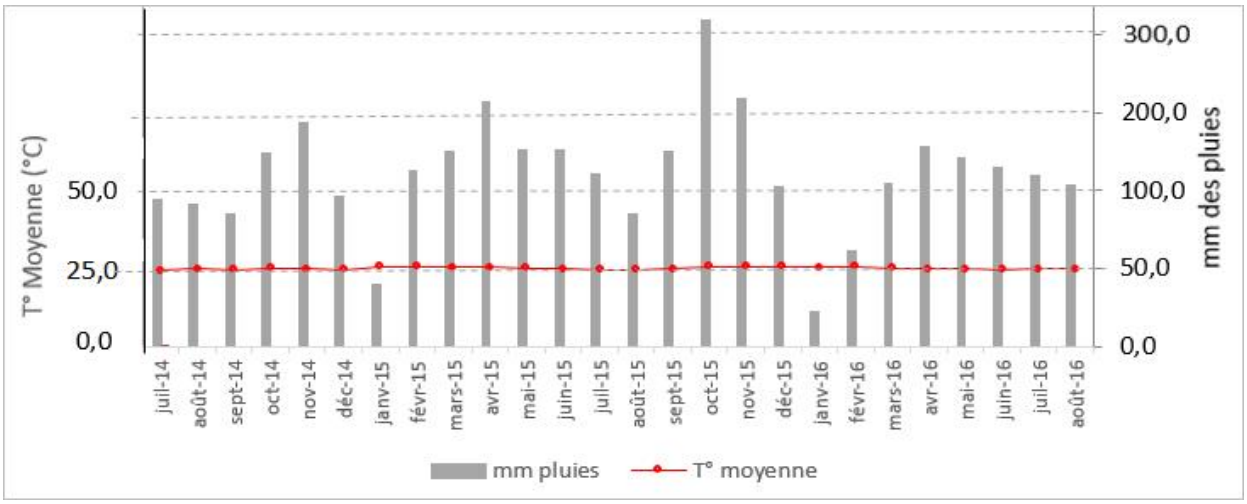

Figure 2 : Diagramme ombrothermique des moyennes des sites expérimentaux durant la période expérimentale

La végétation et le sol : Les essais étaient installés sur des friches herbeuses dominées par les espèces herbeuses telles que *Chromolaena odorata, Panicum maximum, Hypparhenia sp*. et les fougères. Dans l'hinterland de Kisangani, l'essai était installé sur un site où le précèdent cultural était un champ de manioc. Le champ de l'essai était installé juste à la récolte du champ précèdent. Pour le second champ expérimental à Litoy, le terrain était précédé durant quatre saisons consécutives par la culture successive de manioc. Une végétation faiblement touffue prédominée des graminées était la caractéristique de la végétation de ces sites. Le sol est de texture sable graveleuse selon la classification universelle des sols. Les proportions en sable sont les plus importantes et oscillent entre 60 à 80 %. La fraction des particules fines est faible et est évaluée entre 10 et 20 %. De la même manière, les proportions des particules graves sont situées entre 20 à 40 % en moyenne. Le pH moyen est de 4,6 indiquant des sols acides.

Dispositif expérimental : En bi-factoriel 2 x 9 avec split plot dans des blocs randomisés de 4 répétitions et l'essai était planté durant deux années culturales consécutives sur le même site. Les facteurs comparés étaient (i) Deux variétés de manioc entre autres Kindisa (riche en β-carotène) et Liyayi (pauvre en β-carotène).

Figure 3: Couleur de la chair de la racine tubéreuse de manioc de la variété Kindisa riche en bêta-carotène (à gauche) et la variété Liyayi pauvre en bêta-carotène (à droite)

Les caractéristiques de ces deux variétés sont résumées dans le tableau 1.

Tableau 1 : Quelques caractéristiques des variétés utilisées dans les expérimentations.

Genotypes	Teneur			Rendement en racines		Age de maturité (Mois après plantation = MAP)	Résistance	
	% Matière sèche des racines	% amidon	Caroténoide total (mg/g)	Station	Milieu paysan		Maladies	Ravageurs
Liyayi (I95/528)	31	21	3 à 4	35-40	20-25	12	Résistance à la mosaique et l'anthracnose, sensible à la bactériose surtout dans les zones de forte infection	Résistant à la plupart des principaux ravageurs du manioc (cochenille farineuse, acarien vert, etc.)
Kindisa (2001/1661)	27	19	7 à 9	25 - 30	15 - 20	10	Résistance à la mosaique et l'anthracnose et la Stiure brune	Résistant à la plupart des principaux ravageurs du manioc (cochenille farineuse, acarien vert, etc.)

Le deuxième facteur était constitué par (ii) Neuf traitements appliqués sur chaque variété de manioc. Ces traitements sont :
T0 = contrôle (sans apport de fertilisant) ;
T1 = Application de l'engrais NPK 50-75-50,
T2 = Apport du fumier de ferme comme matière organique à raison de 15 t. ha^{-1}. Le fumier prélevé dans une porcherie bien identifiée était bien séché au soleil jusqu'à la dessiccation complète. Il était ensuite pesé et conditionné dans des sacs en polyéthylène de 40 kg avant l'épandage au champ ;
T3 = Application de l'inoculum des Champignons Mycorhiziens (CM) ;
T4 = combinaison de l'engrais NPK + Fumier ;
T5 = Combinaison NPK + inoculum des CMA ;
T6 = Combinaison Fumier + inoculum des CM ;
T7 = Combinaison Fumier + NPK + Inoculum des CM ;
T8 = Association manioc + Sorgho. Le manioc était planté aux écartements de 1 x 1 m et la dimension de la parcelle élémentaire était de 10 x 6 m avec 60 pieds de manioc par parcelle. La parcelle utile comprenait 36 pieds. La répétition mesurait 22 m x 54 m et chaque essai avait une dimension totale de 70 x 54 m correspondant à 0.378 ha.

Echantillons des sols : Le sol était prélevé à l'aide d'une sonde hémicylindrique sur des sites couverts par une végétation dense de *Chromolaena odorata* qui présage une colonisation des spores mycorhiziennes. Les échantillons des sols prélevés étaient conditionnés dans des sachets en plastique puis marqués au marqueur noir indélébile pour des analyses futures de laboratoire. Le choix des sites de prélèvement des échantillons des sols tenait compte du type de végétation présent pendant l'échantillonnage et de sa vigueur. C'est sur des terrains sous couvert de *Chromolaena odorata* de bonne vigueur que la plupart des échantillons étaient prélevés à Simisimi, à Litoy, sur la Route Ituri (Point kilométrique 29), sur la route Banalia (Points kilométriques 12 et 14), à Bambaye et dans les hinterlands de la ville de Kisangani. Tous ces sites se trouvent dans la région équatoriale des forêts humides en République Démocratique du Congo. Des travaux préliminaires ont pu indiquer des prédominances de colonisation des champignons mycorhiziens sous *Chromolaena odorata* et sous *Ananas comosus* (Jolien *et al.* 2017). Avant la plantation du manioc dans les essais et après la récolte du manioc réalisée à 12 mois après plantation, des échantillons perturbés de sol étaient prélevés suivant la méthode de diagonales.

Extraction ex-*situ* des champignons mycorhiziens arbusculaires : Les échantillons de terre de 100 g prélevés sur chaque lot ont, après préparation au laboratoire, étaient observés sous binoculaire optique surmonté d'une caméra et un comptage des spores était réalisé suivant leur particularité morphologique. La

multiplication *ex situ* était réalisée sur une terre stérilisée faite à partir de l'eau bouillante qui était versée sur les planches qui devraient abriter la plante hôte des champignons mycorhiziens (*Sorghum bicolor* = Sorgho). Dans une série d'expériences menées par l'Unité de Recherche Agrosystèmes sur la multiplication ex-situ des spores mycorhiziennes sous diverses cultures, le sorgho s'est révélé comme la graminée dont les racines favorisent une multiplication plus importance des spores des champignons mycorhiziens (INRA, 2017). Après 24 heures, une couche de bagasse de canne à sucre utilisée comme support énergétique pour les champignons mycorhiziens avant la croissance du sorgho, était appliquée avant de poser deux jours après, la couche de sols contenant les spores d'endophytes. La culture du sorgho à forte densité (semis en ligne aux écartements 10 x 10 cm) intervint une semaine après stérilisation de la terre et application de la bagasse. Des précautions étaient prises contre la verse du sorgho. A cause de la forte densité de plantation, la tendance à l'étiolement était prévisible et ainsi les planches de multiplication étaient clôturées pour maintenir le sorgho debout même pendant des intempéries.

Préparation de l'inoculum : A l'issue de l'évaluation des spores sous sorgho, les terres plus infectées par des spores mycorhiziennes vivantes ont été conditionnées sans être perturbé dans des sachets du type « Ziplock bag » et marquées de manière indélébile au stylo marqueur noir. L'application au champ dans les poquets de manioc intervient 1 mois après plantation de manioc à raison de 20 g autour de chaque poquet concerné par ce traitement en prenant soin d'ouvrir un sillon à 10 cm autour du poquet. Les précautions consistant à ne pas perturber les échantillons contenant les spores mycorhiziens (inoculum) est de mise, cela vaut aussi autant dans la préparation du terrain destiné à l'application des inocula des champignons mycorhiziens arbusculaires. Les parcelles qui devaient recevoir les inocula n'était ni incinérée, ni labourée. Un supplément en thé de compost mycorhizien était aspergé 2 mois après la plantation de manioc à raison de 10 litres par parcelle de 40 m^2 grâce à l'arrosoir ordinaire. Le thé de compost est obtenu au laboratoire par compression de l'air dans l'eau mélangé aux spores mycorhiziennes.

Analyse des sols : Les analyses des sols concernaient les éléments suivants : le Carbone organique, l'Azote, le Phosphore, le Potassium, la granulométrie, le pH à l'eau et au KCl. Toutes ces analyses étaient faites en utilisant le pH-mètre pour la détermination de l'acidité, le jet des tamis pour la granulométrie, le spectrophotomètre et le Photomètre à flamme pour les dosages de carbone, d'azote, du phosphore total et de potassium.

Dosage du Caroténoïde, de la matière sèche et de l'amidon : Les analyses ont été effectuées sur des tissus végétaux frais principalement sur les racines tubéreuses et ont consisté au dosage de la teneur en caroténoïde totale (TCC) avec I-Check, de la matière sèche des racines et des feuilles par étuvage en prenant le poids frais du départ et en procédant au séchage par étude à 80°C jusqu'à poids constant. La détermination de la teneur en matière sèche des racines est obtenue par la formule :

$MS\ \% = \frac{PS}{PF} X100$ Avec MS = Matière sèche, PS = Poids sec (constant) et PF = Poids frais (de départ).

Prise des données et analyses statistiques : Les données sur terrain ont été prélevées à partir d'un logiciel utilitaire « Fieldbook » installé sur une tablette numérique. Ce logiciel permet de minimiser les erreurs d'inattentions qui surviennent souvent lors de la collecte des données au champ. Les analyses statistiques ont été effectuées à partir des logiciels GenStat Discovery New version, Statistix et PAlaeontological STatistics (PAST). La localisation des sites était faite grâce au GPS de marque Etrex 20. Le recours à Google Mymaps avait permis de cartographier les sites des essais et de prélèvement des échantillons des sols. Le détachement des cartes sur Google pour les fixer sur un fichier Word était réalisé à partir de l'Outil Capture. C'est à partir d'un pluviomètre ordinaire surmonté d'un capteur en verre, d'un thermomètre digital et du Logiciel New_LocClim Local Climate Estimator que les données climatiques étaient obtenues. Du logiciel GenStat et Statistix, des analyses de la variance étaient réalisés. Les comparaisons multiplies des moyennes statistiques étaient calculées avec LSD à 5 % d'erreur d'expérimentale. Le coefficient de variation devait permettre de dégager la marge de cette erreur. Ces analyses étaient possibles à réaliser grâce à GenStat discovery. Les calculs sur la covariance entre les saisons culturales, les corrélations entre les variables observées ainsi que les régressions linéaires simples ou multiples étaient trouvés utilisant PAST logiciel. Les estimations des données climatiques entre autres les températures et la pluviométrie étaient obtenues par des lectures en cascade des valeurs inscrites des sites localisés grâce aux coordonnées géographiques dans LocClim Climate Estimator. Le pluviomètre à verre et le thermomètre digital ont été installés au milieu de

chaque essai. Les données de température ont été prélevées quotidiennement 4 fois par jour respectivement le matin à 6 h, à 12 h, à 18 h et à 24 h.

Prise des données au champ et à la récolte : A l'aide du logiciel 'Fieldbook' préalablement programmé suivant le dispositif expérimental physique de l'essai, les mesures et les comptages effectués ont été enregistrés dans la tablette possédant le programme. Ces données ont été ensuite dépouillées et ont été organisées pour des analyses statistiques dans des logiciels appropriés (GenStat, PAST, Statistix). La récolte du manioc à 12 mois après plantation a consisté à déraciner les pieds intérieurs des parcelles avec 36 pieds au maximum pour chaque parcelle utile et à débarrasser les racines tubéreuses des particules lourdes des terres et les détacher des pédoncules.

La formulation suivante décrit la parcelle utile sur laquelle ont été faites les observations :

Parcelle utile = Parcelle totale – Les lignes qui bordent la parcelle

Ces racines groupées suivant les parcelles (variétés, traitements) où elles étaient récoltées, ont été pesées à l'aide d'une balance de précision de 50 kg maximum.

RESULTATS

Mobilisation des éléments du sol par les CMA : Il ne s'observe pas des différences statistiques pour le carbone total et les pH du sol (tableau 2). Cependant, des différences sont obtenues pour l'azote et le phosphore total du sol. Les deux variétés de manioc se sont comportées différemment en ce qui concerne l'azote. On a obtenu des moyennes de 3.6 ppm chez Liyayi et 3.08 ppm chez Kindisa. La mobilisation du phosphore total est bien observée entre les traitements comparés. Il ressort que lorsqu'on apporte l'inoculum des CMA, la concentration du phosphore est modifiée dans le sol. Les moyennes obtenues sont de 12.75 ppm dans le contrôle, elles vont en s'améliorant respectivement dans l'association du manioc au sorgho, dans le fumier seul, dans la combinaison engrais NPK + fumier, dans l'engrais seul, dans l'inoculum des CMA seul, dans la combinaison NPK + Inoculum CMA et dans la combinaison NPK + inoculum CMA + Fumier. Les moyennes respectives pour ces traitements sont de 14.84 ppm, 15.19 ppm ; 16.46 ppm, 16.72 ppm ; 16.91 ppm et 18.01 ppm (LSD.05 = 1.21 ppm).

Tableau 2 : Evaluation des éléments du sol suivant les divers traitements apportés au sol

Traitements	Azote (mg.g-1)		Phosphore (ppm)		Carbone total (% C0)		pH eau		pHKCl	
	Kindisa	Liyayi	Kindisa	Liyayi	Kindisa	Liyayi	Kindisa	Liyayi	Kindisa	Liyayi
Association Manioc - Sorgho	2,875	3,938	15,92	13,77	2,037	2,363	4,877	5,111	5,242	5,466
Témoin	2,5	3,125	13,03	12,48	2,106	2,015	4,818	5,032	5,152	5,436
Fumier + Inoculation des AMF	2,938	4	13,98	16,01	2,291	2,443	5,111	5,236	5,301	5,397
Fumier seul	2,938	4,25	15,52	14,17	2,323	2,636	5,396	5,244	5,472	5,335
Inoculation des AMF seule	3,312	3,625	17,18	16,26	2,234	2,17	5,46	5,116	5,66	5,27
Engrais (NPK)	3,812	2,625	16,52	16,4	1,992	2,278	5,557	5,133	5,604	5,199
Engrais (NPK) + Fumier	3,5	3,812	15,58	14,8	2,156	2,303	5,216	4,9	5,534	5,132
Engrais (NPK) + Fumier + inoculation AMF	2,625	3,938	19,37	16,76	2,351	2,342	5,03	4,87	5,462	5,082
Engrais (NPK) + inoculation AMF	3,188	3,125	16,86	16,95	2,465	2,435	5,219	4,854	5,515	5,046
Means	3,08	3,60	16,00	15,29	2,22	2,33	5,19	5,06	5,44	5,26
F.pr traitement (A)	1,09		13.09**		0,32		0,63		0,23	
F.pr Genotype (B)	10.31**		6,01		0,46		0,92		3,82	
F.pr (AxB)	0,01		2.45*		0,11		0,4		1,25	
LSD Traitement (A)	0,69		1,208		0,7049		0,577		0,377	
LSD Genotype (B)	0,3253		0,57		0,3323		0,272		0,1777	
LSD AxB	0,9758		1,709		0,9969		0,8159		0,5331	
CV %	2,4		0,8		7,9		0,6		6,5	

Les sols sont acides avec des moyennes de pH égale à 5.19 sous la variété Kindisa et 5.06 sous la variété Liyayi. Dans cette condition d'acidité de surface, on a observé effectivement que les apports d'engrais minéraux n'ont pas modifié de manière significative le rendement du manioc, on a obtenu en moyenne pour les deux variétés de manioc et dans les deux sites, 34,6 t ha^{-1} dans le témoin et 34,7 t ha^{-1} après application du NPK. Aussi, les accroissements en phosphore étaient observés lorsqu'on apportait les spores mycorhiziennes sous forme des inocula.

Evaluation du β-carotène et de la matière sèche dans les racines du manioc : Les comparaisons des traitements entre eux, entre les variétés de manioc et la combinaison de ces deux facteurs sont consignées dans le tableau 3. Les variables observées en plus du rendement, sont les teneurs en amidon, la matière sèche des feuilles et des racines et le caroténoïde total dans les racines.

Tableau 3 : Teneurs en amidon, en matière sèche des racines et des feuilles, en caroténoïde total et rendement suivant les variétés de manioc et les traitements appliqués.

Traitements	Amidon des racines (%)		Matière sèche des feuilles (%)		Matières sèches des racines (%)		Teneur en caroténoïde (mg.g -1)		Rendement (t. ha-1)	
	Kindisa	Liyayi	Kindisa	Liyayi	Kindisa	Liyayi	Kindisa	Liyayi	Kindisa	Liyayi
Association Manioc - Sorgho	13,42	13,58	20,72	18,63	24,63	24,93	6,616	4,853	15,2	18,7
Témoin	14,21	16,75	18,78	19,67	26,1	30,76	5,207	3,245	21,3	38,9
Fumier + Inoculation des CMA	11,16	12,21	20,99	18,58	20,48	22,41	6,822	5,307	32,2	61,1
Fumier seul	12,74	13,66	20,52	20,28	23,39	25,09	5,291	3,985	35,5	50,3
Inoculation des CMA seule	11,77	12,87	23,74	21,64	21,62	23,64	6,836	5,105	30,3	42,8
Engrais (NPK)	11,39	13,95	23,05	23,06	20,92	25,61	5,152	3,336	30,8	33,4
Engrais (NPK) + Fumier	12,32	14,12	22,25	21,9	22,62	25,92	5,952	3,622	28	47
Engrais (NPK) + Fumier + inoculation CMA	10,89	12,83	20,64	19,99	19,99	23,55	5,979	4,107	29,7	54,9
Engrais (NPK) + inoculation CMA	11,81	13,15	20,12	19,43	21,69	24,13	6,682	4,537	20,7	38,3
Means	12,19	13,68	21,20	20,35	22,38	25,12	6,06	4,23	27,08	42,82
F.pr traitement (A)	9.12**		1,67		9.12**		31.24**		4.62*	
F.pr Genotype (B)	35.16**		1,31		35.16**		453.05***		31.86**	
F.pr (AxB)	1,1		0,25		1,1		0,192		1,09	
LSD Traitement (A)	1,054		3,112		1,935		0,3603		11,72	
LSD Genotype (B)	0,497		1,467		0,912		0,1699		5,52	

Il ressort du tableau 3 que les traitements appliqués au sol ont influencé de manière hautement significative la teneur du β-carotène. Chez la variété Kindisa, des valeurs allant au-delà de 6.8 ppm sont obtenues lorsqu'on a induit l'inoculum des CMA dans le traitement. Ces valeurs sont faibles et sont autour de de 5.5 ppm lorsque l'inoculum des CMA n'est pas incorporé dans le traitement. De la même manière, il apparait aussi chez Liyayi (génétiquement pauvre en carotène) que les traitements ont produit une influence statistiquement significative sur le caroténoïde total. Les moyennes sont autour de 4.8 ppm lorsqu'il y a présence dans le traitement de l'inoculum des CMA. Les valeurs chez Liyayi décroissent autour de 3.5 ppm lorsqu'on n'incorpore pas l'inoculum des CMA dans le traitement (LSD.05= 0.36 ppm, $p < .001$). Suivant les variétés de manioc en présence, on constate chez Kindisa, variété actuellement en diffusion à cause de son caroténoïde élevé que la moyenne est de 6.06 ppm tandis que chez Liyayi, cette moyenne est de 4.23 ppm (LSD.05 = 0.17 ppm). Chez Liyayi, on constate aussi qu'en plus du patrimoine génétique de la variété, les traitements ont eu un effet relatif sur le TCC. Des différences hautement significatives sont obtenues en appliquant des traitements susceptibles de mobiliser le phosphore entre autres les inoculations des CMA et les apports du fertilisant phosphoré. En conséquence, ceci confirme l'implication du phosphore dans la synthèse du caroténoïde. Cependant, la teneur en matière sèche dans les racines a diminué lorsqu'on a appliqué l'inoculum des CMA. On a noté une bonne croissance végétative tout au long du cycle du manioc là où les inoculations des CMA combinées ou non à d'autres fertilisants étaient opérées. On a constaté que la teneur en matière sèche des racines est plus élevée dans le contrôle (26.1 % chez Kindisa et 30.76 % chez Liyayi). C'est lorsqu'on a incorporé les CMA que cette matière sèche s'est dévaluée de 26 à 19.9 % chez Kindisa et de 30.7 à 22.4 % chez Liyayi (LSD.05 = 1.935 %, $p < .001$). On sait comprendre que cette prédominance en eau dans les tissus végétaux, justifie la bonne turgescence observée et ainsi, la très bonne vigueur du manioc dans les traitements qui ont reçu l'inoculation aux CMA. La quantité de l'amidon dans la

racine du manioc est directement proportionnelle à celle de la matière sèche, les mêmes tendances ont donc été observées dans l'évaluation de la teneur en amidon. Les divers traitements apportés au sol ont eu une influence statistique significative sur le rendement du manioc en poids frais. Les différences apparaissent d'abord entre les variétés de manioc avec une moyenne de 27,1 t ha^{-1} pour Kindisa et 42,8 t ha^{-1} pour Liyayi (LSD.05 = 5,5 t ha^{-1}, p< .05). Ensuite s'observent des différences hautement significatives entre les traitements en ce qui concerne le rendement frais. Des accroissements de rendements de l'ordre de 42 % et 10% sont respectivement obtenus chez Kindisa et chez Liyayi grâce aux apports des inocula des CMA. Cependant, les réductions de la matière sèche observée lorsqu'on applique l'inoculum des CMA dans le sol, n'occasionnent pas des pertes significatives en ce qui concerne le poids sec des racines du manioc. A cause des augmentations importantes obtenues en poids frais, la diminution de la matière sèche dans les racines dues aux applications des CMA n'a pas significativement modifié le rendement du manioc en poids sec. On observe que le rendement en poids sec des racines demeure plus grand dans les parcelles ayant reçu l'inoculum des CMA. Les moyennes obtenues en poids secs sont de 8.6 t. ha^{-1} lorsqu'on a appliqué l'inoculum des CMA et 7.1 t ha^{-1} sans cette application chez Kindisa. Chez Liyayi, les moyennes en poids sec sont de 16.3 t ha^{-1} lorsque l'inoculum était apporté et 13.7 t ha^{-1} sans cet apport (LSD.05 = 2.01 t ha^{-1}).

Relations Phosphore- Acidité- caroténoïde total et Rendement chez le manioc : Le phosphore est plus mobilisé lorsque le traitement inoculum est mis en contribution. Cela est possible d'autant plus que les mycorhizes ont la capacité de solubiliser le phosphore indisponible dans le sol. Le rendement est bon dans les traitements avec fumier, Inoculum et Engrais et est plus favorable lorsque le pH est élevé. Il apparait aussi que le fumier combiné ou non aux inocula mycorhiziens baisse de manière considérable l'acidité du sol pendant que cette acidité augmente dans les parcelles non fertilisées (contrôle) et dans les parcelles avec fertilisants minéraux (NPK) apportés sans combinaison aux autres types de fertilisants. L'influence des CMA sur le TCC est très remarquable. On constate que l'association manioc – sorgho, l'inoculum des spores mycorhiziennes et le fumier apporte le phosphore au manioc et par conséquent entraîne une modification positive du TCC. Ainsi, il existe une corrélation positive entre la teneur en caroténoïde total des racines de manioc et la teneur du phosphore dans le sol. Les modifications du carotène dans la racine du manioc varient positivement de 31 % grâce aux apports de phosphore. On observe aussi que le phosphore apporte une correction sur l'acidité du sol avec une valeur (r) estimée à 98.7 %. Son effet ainsi influe sur le rendement du manioc allant jusqu'à 93.7 % de valeur corrélative. Si les apports des divers traitements ont eu un effet positif sur la concentration de la matière sèche dans les tissus du manioc, on a observé que la teneur en matière sèche des racines a aussi influencé le rendement du manioc (r = 64.8 %). L'acidité du sol est en relation avec la teneur en caroténoïde total. En sol moins acide, la concentration du TCC est relativement plus grande dans la racine du manioc jaune. Pour une évaluation plus complète de l'effet du phosphore sur la biosynthèse du caroténoïde, des apports variés de phosphore étaient effectués sur les deux variétés de manioc en condition de haute et faible acidité du sol.

DISCUSSION

Mobilisation des éléments minéraux en sol acide grâce aux CMA : Les applications de l'inoculum des CMA ont eu une action relativement positive sur les éléments minéraux du sol. On a observé des modifications dans la mobilisation du phosphore du sol lorsqu'on appliquait l'inoculum de CMA combiné ou pas à d'autres types de fertilisants. Ces modifications ont influencé certaines propriétés du sol telles que l'acidité et la structure (Calleja *et al.* 1980). Salvioli *et al.* 2008 avaient reconnu l'impact potentiel des CMA sur les cultures potagères et les avaient qualifiés de bio-engrais. Ils ont mené des études sur la culture de la tomate et ont observé des effets bénéfices sur la productivité de la tomate tant en quantité qu'en qualité grâce à l'application des CMA. En Espagne, Navarro-Fernandez *et al.* 2011 avaient réussi à planter *Thymus mastichina* en sol dolomitique grâce aux CMA. En effet, dans ce type de sols, cette espèce ne pousse pas naturellement mais pourtant, les applications des CMA avaient réussi à abaisser les concentrations excessives du Ca et du Mg et ainsi avaient permis une croissance normale de l'espèce. Les auteurs avaient même en fin de compte recommandé l'utilisation des CMA comme outil biotechnologique dans la restauration et la conservation des habitats dolomitiques méditerranéens. Grant *et al.* 2011 ont observé chez plusieurs cultures que l'association avec des mycorhizes à arbuscules améliorait l'absorption du phosphore. Les pratiques

agricoles et l'apport prolongé du phosphore résultant de l'application d'engrais et de fumier modifiaient la quantité de phosphore dont les plantes disposaient dans le milieu mais surtout le développement de la symbiose avec les mycorhizes. En 2015, Yagoob avait évalué l'effet des champignons mycorhiziens arbusculaires sur le taux du phosphore fixé sur les racines de concombre et a observé que le poids frais et sec avaient eu des accroissements respectifs de l'ordre de 53,2 et 44,6 % et aussi, des augmentations des teneurs en phosphore foliaire les plus élevées lorsque le sol était inoculé avec *Glomus mosseae* et *Glomus intraradices*. Il a obtenu des valeurs allant jusqu'à 486,06 mg / 100 g Phosphore du poids sec de la feuille (r = 0,62 **) et 477,60 kg/100 g Phosphore du poids sec de la racine (r = 0,79 **). D'autres éléments du sol tels que le carbone organique, l'azote etc. étaient aussi rendus plus disponibles pour les racines du manioc grâce aux CMA et ont eu à influencer le rendement. Kumar *et al.* 2013 ont trouvé une amélioration de l'absorption de nutriments minéraux par les plantes dans le sol grâce à plusieurs types de champignons mycorhiziens qui exécutent des tâches importantes dans la mobilisation de nutriments minéraux à partir d'un produit bio inaccessible sur le substrat, les particules minérales et les surfaces de roche. Les champignons de la mécano-rhizine adoptent diverses méthodes pour atteindre efficacement ce but. Dans une étude effectuée sur la laitue, Marouane *et al.* 2013 avaient conclu que La présence des CMA permettrait l'absorption de minéraux et de composés avec des antioxydants. Ils avaient même remarqué une augmentation de la quantité de métabolites secondaires qui aiderait la laitue à résister aux contraintes biotiques et abiotiques. Ils ont enfin conclu que les CMA exerçaient une influence sur les facteurs environnementaux et sur la bio-fixation de vitamines, des nutraceutiques et des minéraux dans les feuilles vertes et rouges des types de laitue.

La relation entre les CMA, le phosphore et l'eau du sol: Les champignons mycorhiziens arbusculaires sont capables de pousser leur mycélium plus profondément dans le sol et ainsi prévoir pour la plante la possibilité de constituer les économies en eau même durant les périodes sèches. Les filaments mycéliens couvrent des zones larges grâce à leur abondance et leur longueur. Ils donnent l'impression de faire passer le mode de nutrition des végétaux de l'autotrophie à une hétérotrophie relative. On a observé que la teneur en eau accroissait dans les tissus du manioc lorsqu'il y avait eu application des champignons mycorhiziens comme Inoculum. Ce facteur a fait qu'on ait observé une réduction de 23 % de la teneur de la matière sèche dans les racines de manioc lorsqu'on apportait l'inoculum des CMA. Matthias *et al.* 2010 avaient utilisé un système de bioréacteur in vitro dans lequel ils avaient cultivé *Glomus intraradices* dans un sol dépourvu de microbes vivants détectables, ils avaient enfin constaté que le mycélium de ce champignon contribuait efficacement au maintien d'agrégats de sol stables et à l'augmentation de la conservation de l'eau du sol. Après une série de recherche, Lazcano *et al.* 2014 accordent les avantages suivants à la symbiose des CMA aux racines des plantes à savoir : (i) une Augmentation de l'absorption et de l'assimilation de l'azote, (ii) le développement d'une zone d'absorption maximale avec un accès plus élevé aux nutriments du sol grâce au réseau mycorhizien, (iii) la tolérance accrue des plantes au stress hydrique, (iv) l'accès plus élevé à l'eau du sol, (v) la préférence d'absorption du NH_4^+ grâce au réseau mycorhizien, (vi) la régulation des hormones (ABA), (vii) la disponibilisation de l'azote dans le sol, (viii) l'immobilisation de la lixiviation et des émissions de gaz, (ix) les changements sur l'humidité du sol, sur la minéralisation, sur la nitrification et sur la dénitrification. Dans des expériences conduites sur le pois chiche, Farzane *et al*. en 2011 ont trouvé que les CMA mobilisaient le N, P, K, Ca, Mg, Fe, Ms, Cu et Zn dans le sol. Des valeurs non significatives pourtant étaient obtenues sur la mobilisation de la plupart des éléments minéraux observés à part le phosphore, l'azote et le carbone. Augé 2004 résume ces constatations en étayant l'affirmation selon laquelle la colonisation du sol pourrait s'avérer aussi importante que la colonisation des racines quant à l'incidence des CMA symbiotiques sur les rapports de la plante hôte avec l'eau. Il observe une légère mais significative incidence des CMA sur la courbe des paramètres hydriques après sept mois de colonisation d'un sol sablonneux sous *Vigna unguiculata*, par les mycorhizes du type *Glomus intraradices*. Ces résultats sont confirmés par Bondonga *et al.,* 2011, Mousain 1989 et Bolan 1991 qui estiment que les mycorhizes stimulent généralement la croissance des plantes-hôtes, en particulier dans des sols où la disponibilité en éléments minéraux dont principalement le phosphate est forte. Williamson *et al*. 2002 ont remarqué dans beaucoup d'expériences qu'ils ont menées que la fertilisation phosphatée a le même effet que les mycorhizes pour améliorer le comportement hydrique de jeunes plants. Cette tendance est confirmée par Matumoto Pinto 1996 qui a émis que les champignons mycorhiziens,

intimement associés aux tissus du végétal au niveau de stomatiques des racines, contribuent indirectement à la régulation hydrique en modifiant la nutrition minérale de l'arbre et son équilibre hormonal. Aussi, au Niger, Aboubacar *et al.* 2013 ont obtenu des augmentations de 51 % de rendement en grains de niébé grâce à la prédominance du phosphore dans le sol après co-inoculation des champignons mycorhiziens. Ces augmentations sont allées jusqu'à 74 % chez certaines variétés plus sensibles à la symbiose. Le premier mécanisme par lequel la symbiose est favorable à la régulation hydrique des arbres est donc son effet sur leur nutrition minérale. Si un champignon est particulièrement efficace pour la fourniture de phosphore (élément-clé des métabolismes énergétiques impliqués dans les ajustements actifs) ou de potassium (impliqué dans les changements osmotiques rapides), il permet indirectement à l'arbre de mieux gérer l'eau. La symbiose champignon – racine contribue donc, à partir des racines, de déterminer les concentrations en régulateurs hydriques dans l'arbre entier jusqu'aux feuilles qui sont le siège de la régulation stomatique (Bondonga *et al,* 2011). L'évaluation de la matière sèche dans les racines de manioc a donné un résultat qui confirme la modification du bilan hydrique chez le manioc. Une décroissance de 30,1 % en matière sèche est observée chez Liyayi et 20,7 % dans les racines de Kindisa par le fait des inoculations des CMA. À Ngaoundéré au Cameroun, Megueni *et al.* 2011 avaient observé que la forte densité des champignons mycorhiziens dans le sol tendait à augmenter la teneur en eau et la biomasse des feuilles de niébé. Ils ont par contre constaté une diminution de la concentration en éléments minéraux dans les feuilles qu'ils attribuaient à l'augmentation du bilan hydrique.

Le rôle du phosphore du sol et des CMA dans la biosynthèse du bêta-carotène : Il vient d'être observé que le phosphore du sol agit sur la biosynthèse du bêta-carotène mais cependant à cause des conditions acides des sols d'étude, le rôle du phosphore était moins perceptible. C'est lorsqu'on avait réduit le niveau d'acidité du sol par un chaulage préalable à la dolomite qu'on a eu des accroissements du caroténoïde évalués à 17.6 % chez Kindisa et 11.3 % chez Liyayi. De la même manière, les apports des CMA ont significativement influencé la teneur en caroténoïde total dans les racines du manioc. Stange et Flores 2010 ont attribué une importance particulière au Phosphore lors de l'accumulation du caroténoïde dans les chloroplastes des végétaux qui synthétisent cette molécule. Les champignons mycorhiziens peuvent augmenter la concentration des métabolites secondaires (Christian *et al.* 2008). Ces deux chercheurs ont eu à observer des teneurs élevées des composés antioxydants tels que le lycopène, le bêta-carotène et le contenu phénolique total dans les fruits de la tomate en inoculant les spores de *Glomus sp*. Il a été observé une amélioration de la disponibilisation du phosphore dans le sol à partir des apports d'inocula des CMA. En comparant les teneurs en phosphore dans les parcelles témoins et les parcelles amendées avec l'inoculum des CMA, on a eu des accroissements en phosphore de l'ordre de 26.1 % chez Kindisa et 30.8 % chez Liyayi. La concentration du β-carotène a montré qu'elle devient différente statistiquement lorsqu'il y a prédominance du phosphore dans le sol. Ceci confirme la théorie de Hecht *et al.* 2001 qui énoncent que le phosphore sous une forme moléculaire particulière participe essentiellement dans la synthèse du β-carotène. Les accroissements du caroténoïde sont importants lorsqu'on apporte les CMA au sol. Ils sont de 31.3 % et 57.3 % respectivement chez les variétés Kindisa et Liyayi. L'association symbiotique mycorhizienne apparaît donc comme une stratégie importante développée par les plantes afin d'assurer leur survie et leur croissance (Chidumayo, 1997).

CONCLUSION

Les CMA locaux peuvent être multipliés sous sorgho et conditionnés pour des applications sous forme d'inoculum en maintenant les spores efficientes pendant des périodes relativement longues. Ils permettent de mobiliser le phosphore du sol, de catalyser la biosynthèse du carotène et d'accroître le rendement du manioc. Une issue qui aboutirait à la production de ces champignons locaux commerciaux constituerait un tournant de leur l'utilisation effective. Etant assuré du taux de leur multiplication relativement grand sous le sorgho, la possibilité de produire les inocula capables de modifier les conditions des sols acides des tropiques et les rendements des cultures dont le manioc est évidente. La manipulation de l'inoculum nécessiterait cependant des précautions pour s'assurer de la vitalité des spores mycorhiziennes avant et pendant l'application sous la culture. La spécialité des champignons mycorhiziens n'est pas démontrée mais il a été constaté que les souches des spores provenant des divers milieux et ayant présenté

des morphologies distinctes ont été toutes efficaces et ont permis des augmentations réelles de rendement du manioc. Cette piste ouvrira certainement la voie qui permettra un usage effectif et efficient des CMA et les espoirs y sont donc permis. Cependant, des études complémentaires sur la validation des substrats les plus adaptés comme milieu de conservation des spores d'une part et l'identification des plantes hôtes capables d'occasionner des taux de multiplication plus élevés en spores mycorhiziennes devront constituer l'essentiel de ces travaux ultérieurs sur les applications des endophytes locaux sur les cultures vivrières dont le manioc. Une spécification par caractérisation moléculaire prenant en compte le taux de mycorhization de ces champignons suivant les spéculations culturales ouvrirait une voie plus complète et plus appropriée pour parvenir aux applications des CMA dans l'agriculture raisonnée et conservatrice de conditions environnementales suffisamment précarisées par l'action anthropique. Des études doivent être menées pour identifier les variétés de manioc susceptibles de maintenir la matière sèche dans les racines sans porter préjudice à la qualité organoleptique du manioc mais aussi, capable de maintenir l'eau dans les feuilles.

REFERENCES

Aboubacar K, Zakari Moussa Ousmane, Harouna Issa Amadou, Seydou Issaka, Alzouma Mayaki, Zoubeirou, 2013. Effet de la co-inoculation du rhizobium et de mycorhizes sur les performances agronomiques du niébé [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.] au Niger. Journal of applied biosciences 72 :5846– 5854, 9 p

Armstrong, G.A. (1999) Carotenoid genetics and biochemistry. In: Comprehensive natural products chemistry. (Barton, D.H.R. and Nakanishi, K., Eds.), pp. 321-352. Elsevier

Armstrong, G.A. (1994) Eubacteria show their true colors: genetics of carotenoid pigment biosynthesis from microbes to plants. J. Bacteriol. 176, 4795-4802. (Morin-Savy 2007)

Bast, A., Haenen, G.R., van den Berg, R. and van den Berg, H. (1998) Antioxidant effects of carotenoids. Internat. J. Vit. Nutr. Res. 68, 399-403.

Bauernfeind, J.C. (1981) Carotenoids as colorants and vitamin A precursors. 938 pp. Academic Press, New York

Bolan N.S. 1991. A critiqua review of the role of mycorrhizal fungi in the uptake of phosphorus by plants. Plant & Soil 134: 189-207.

Bondonga Mambomba Hervé, Baboy Longanza Louis, Kaumbu Jean-Marc 2011. Quantification de la symbiose mycorhizienne des essences de la forêt claire (miomboV) du Katanga : application au reboisement. Cas de Pteocarpus angolensis, P. tinctoruis, Uapaka kirkiana et U. pilosa. http://www.memoireonline.com/up/publication.html

Britton G., Liaasen-Jensen S. and Pfander H., 1995. Carotenoids. Volume 1B: spectroscopy, 360 p. Birkhaüser, Basel.

Calleja M., Mousain D., Lecouvreur B., Auzac, 1980. Influence de la carence phosphatée sur les activités phosphatases acides de trois champignons mycorhiziens. Hebeloma edurum Metrod., Suillusgranulatus (L. ex Fr.)

Chidumayo E.N., 1997. Miombo ecology and management an introduction. Stockholm environment institute (SEI). *Southampton Row, London, WC 1B HH, UK*, 166 p.

Christian Ulrichs, Gerhard Fischer, Carmen Büttner and Inga Mewis. 2008. Comparison of lycopene, β-carotene and phenolic contents of tomato using conventional and ecological horticultural practices, and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF). Agron. Colomb. Vol.26 n°1

Duponnois R., Bâ A.M., Prin Y., Baudoin E., Galiana A. and Dreyfus B. 2008. Laboratoire des Symbioses Tropicales et Méditerranéennes (LSTM). Campus International de Baillarguet. Montpellier. France

Eisenreich W., Rohdich, F. and Bacher, A. 2001. Deoxyxylulose phosphate pathway to terpenoids. Trends Plant Sci. 6, 78-84.

Farzane M., Vierheilig H., Löss A., Kaul1 H.P. 2011. Arbuscular mycorrhiza enhances nutrient uptake in chickpea. Plant Soil Environ., *57*, 2011 (10): 465–470

Fraser P.D. and Bramley P.M. 2004. The biosynthesis and nutritional uses of carotenoids. Prog. Lipid Res. 43, 228-265.

Grant Cynthia, Shabtai Bittman, Marcia Montreal, Christian Plenchette and Christian Morel, 2011. Effects on plant P supply and mycorrhizal development; Soil and fertilizer phosphorus.

INRA-Centre : Inra Antilles-Guyane – ASTRO – Service Communication/GS - Édition 2017

Jolien Venneman, Kris Audenaert, Jan Verwaeren, Geert Baert, Pascal Boeckx, Adrien M. Moango, Benoît D. Dhed'a, Danny Vereecke, and Geert Haesaert. 2017. Congolese Rhizospheric Soils as a Rich Source of New Plant Growth-Promoting Endophytic *Piriformospora* Isolates, Frontiers in Microbiology

Morin-Savy S., 2007. Biosynthèse de caroténoïdes aromatiques hydroxylés par des bactéries non photosynthétiques des carotènes aux xanthophylles. Ecole Doctorale. Sciences de la Matière, de l'Information et de la Santé. Thèse de doctorat. Université de Bretagne Occidentale, mention microbiologie. 174 p.

Kugler Marianne, 1986. Les Mycorhizes : des engrais qui poussent comme des champignons. Le CRDI explore, janvier 1986. Université Laval, Québec

Kumar M. R., Prasad V., Kumar N., Tuteja A., Varma. 2013. Mobilization of Micronutrients by Mycorrhizal Fungi. Priyanku Amity Institute of Microbial Technology (AIMT), Amity University Uttar Pradesh, Block 'E-3', 4th Floor, Sector-125, Noida, Gautam Buddha Nagar, Uttar Pradesh 2013 13, India e-mail: kumar51@amity.edu ; vivekbps@gmail.com © Springer International Publishing AG 2017

Marouane Baslam, Idoia Garmendia and Nieves Goicoechea, 2013. Enhanced Accumulation of Vitamins, Nutraceuticals and Minerals in Lettuces Associated with Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF): A Question of Interest for Both Vegetables and Humans. *Agriculture* 2013, *3*, 188-209.

Matthias C., Rillig Noor F., Mardatin, Eva F. Leifheit, Pedro M. Antunes, 2010. Mycelium of arbuscular mycorrhizal fungi increases soil water repellency and is sufficient to maintain water-stable soil aggregates, Soil Biology & Biochemistry 42 (2010) 1189-1191

Matumoto-Pintro, 1996. Rôle des phosphatases dans l'utilisation du phosphore organique par les champignons ectomycorhiziens et leurs associations avec le Pin laricio de Corse. Influence des surfaces adsorbantes sur l'activité des phosphatases. Thèse doctorat, Montpellier : École Nationale Supérieure Agronomique

Megueni Clautilde, Awono Enama Tomas et Ndjouenkeu Robert, 2011. Effet simultané de la dilution et de la combinaison du Rhizobium et des mycorhizes sur la production foliaire et les propriétés physico-chimiques des jeunes feuilles de Vigna unguiculata (L.) Walp. Journal of applied biosciences 40 : 2668 - 2676, 9 p.*économique*. Edition totalement révisée. Mexico, D.F., Mexique : CIMMYT p.12, 34-35 et 52

Mousain M., 1989. Étude de la nutrition phosphatée de symbiotes ectomycorhiziens. Thèse de Doctorat d'État en Sciences, Montpellier. Université des Sciences et Techniques du Languedoc.

Navarro-Fernandez C.M., Aroca R., Barea J.M. 2011. Influence of arbuscular mycorrhizal fungi and water regime on the development of endemic Thymus species in dolomitic soils Applied Soil Ecology 48 (2011) 31–37

Salvioli, A., Novero M., Lacourt, Bonfante, 2008. P.1 The impact of mycorrhizal symbiosis on tomato fruit quality. 16th IFOAM Organic World Congress, Modena, Italy, June 16-20, 2008

Smith SE, Read DJ. 2008. Mycorrhizal Symbiosis (AP London, Ed.). New York.

Stange Claudia and Carlos Flores 2010. Carotenoids and Photosynthesis - Regulation of Carotenoid Biosyntesis by Photoreceptors. www.intech open.com Advances in Photosynthesis – Fundamental Aspects

Tisserant E, Kohler A, Dozolme-Seddas P, Balestrini R, Benabdellah K, Colard A, Croll D, Da Silva C, Gomez S K, Koul R. 2012. The transcriptome of the arbuscular mycorrhizal fungus Glomus intraradices (DAOM 197198) reveals functional tradeoffs in an obligate 1. Symbiont. The New phytologist 193: 755–69.

Yagoob Habibzadeh, 2015. Academic journals vol. 9 (2). Pp. 65-70, February 2015 DOI: 10.5897/AJEL2014. 1691 Article Number: C4EI81849785 ISSN 1996-0786 Copyriht @ 2015 Auiho (s) relation the copyright of this article.