



HAL
open science

**ÉVALUATIONS AGRONOMIQUES DES
CHAMPIGNONS MYCORHIZIENS LOCAUX SUR
LA PRODUCTIVITÉ DU MANIOC (*Manihot esculenta*
Crantz) EN SOLS DÉGRADÉS DES JACHÈRES
HERBEUSES À KISANGANI/ R.D Congo**

Adrien Malonda Ndonga

► **To cite this version:**

Adrien Malonda Ndonga. ÉVALUATIONS AGRONOMIQUES DES CHAMPIGNONS MYCORHIZIENS LOCAUX SUR LA PRODUCTIVITÉ DU MANIOC (*Manihot esculenta* Crantz) EN SOLS DÉGRADÉS DES JACHÈRES HERBEUSES À KISANGANI/ R.D Congo. Agronomie. Université de Kisangani, 2018. Français. NNT : . tel-02010741

HAL Id: tel-02010741

<https://hal.science/tel-02010741>

Submitted on 7 Feb 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ DE KISANGANI
FACULTÉ DE GESTION DE RESSOURCES
NATURELLES RENOUVELABLES
B.P. 2012 KISANGANI

Département des Sciences agronomiques



**ÉVALUATIONS AGRONOMIQUES DES CHAMPIGNONS
MYCORHIZIENS LOCAUX SUR LA PRODUCTIVITÉ DU MANIOC
(*Manihot esculenta Crantz*) EN SOLS DÉGRADÉS DES JACHÈRES
HERBEUSES À KISANGANI/ R.D Congo**



Par

Adrien NDONDA MALONDA

Diplôme d'Études Supérieures en Sciences Agronomiques

Thèse soutenue le 20 Décembre 2018 pour l'obtention du titre de **Docteur en Sciences Agronomiques**

Jury :

Pr Ferdinand KOMBELE : Président

Pr DHED'A DJAILO (Membre)

Pr OKUNGWO LOTOKOLA (Secrétaire)

Pr EWANGO EKOKINYA (Membre)

Pr Adrien MOANGO MANGA (Promoteur)

Pr Thimothée MAHUNGU NZOLA (Co-Promoteur)

Dédicace

A toi ma tendre épouse Safi-Joséphine NDONDA MONGOTANE, une vraie 'femme vertueuse' qui fait réellement mon bonheur.

A vous mes adorables enfants. Le fruit de mes entrailles, vous êtes la concrétisation de ma bénédiction.

A mes regrettés,

Papa Jules NTINU NDONTONI, mon affectueux père. Tu fus un homme de beaucoup de biens et de vertus.

Maman Thérèse MPAKA LOTUTALA grâce à toi, j'ai vu le jour, ton souvenir restera indélébile dans ma vie. Une 'sainte' femme et très différente des autres. Tu nous as quitté sans nous voir parvenir au bout de cet effort.

Pr Alphonse LEMA GWETE, mon regretté Oncle maternel et mon tuteur depuis mon jeune âge. J'ai tout copié de toi.

A maman

Valentine MBENGO NSANGA grâce à toi, j'ai performé dans ma vie. Il était difficile ou même impossible de me distinguer de tes propres enfants. Voici l'exaucement de ta prière de tous les jours maman.

A vous mes Beaux parents

Papa Joseph MONGOTANE MAYAMBA et Maman MELAMBO Léontine, vos prières ont été exaucées.

Remerciements

J'ouvre cette dissertation par cette expression de reconnaissance à plusieurs personnes pour lesquelles je ne suis pas capable de passer outre leur implication dans la réalisation de cette œuvre.

D'abord et avant toute chose, une gloire méritée à l'Éternel Dieu le Tout Puissant par son fils Jésus Christ, le Roi de tous les rois pour m'avoir accordé et de manière gracieuse, son souffle de vie. Il a pourvu suffisamment de forces et d'intelligence sans lesquelles je ne serai pas en mesure de réaliser cette thèse qui constitue au fait une ultime consécration de ma vie scientifique. Que son nom donc soit toujours exalté au travers de ma vie et tant que je vivrai.

Je pense aux responsables de l'Université de Kisangani qui ont à leur charge la gestion académique, scientifique et administrative. Ils ont fait montre de leur magnanimité en acceptant sans atermoiement mon inscription au programme doctorale de la Faculté de Gestion de Ressources Naturelles Renouvelables. Qu'ils trouvent au travers de ces lignes, l'expression de ma déférence la plus méritée.

Les Professeurs Adrien MOANGO MANGA et Timothée MAHUNGU NZOLA MESO, Deux grandes personnalités scientifiques dont la renommée n'a nullement besoin d'être vantée et tous deux, épris de bonne foi et de grande rigueur scientifique, ont malgré leurs innombrables occupations, suivi la réalisation de cette thèse et en ont même assuré la direction. La célérité avec laquelle les travaux ont été réalisés ne peut me laisser indifférent. Ils ont beaucoup pris de leur expertise scientifique pour imprimer à cette œuvre une formulation digne d'une thèse de doctorat de grande facture et dans toute son originalité. Je pense qu'ils doivent se rassurer qu'ils n'aient pas semé en sol aride et qu'ils mériteraient à chaque pas de mon cheminement dans la science, ma reconnaissance la plus méritée.

Quatre autres professeurs m'ont aussi accompagné, il s'agit des Professeurs Billy-Antoine BOLAKONGA ILYE, Marie-Claire YANDJU, Félicien NSALAMBI VAKANDA NKONGOLO et Hippolyte NSHIMBA SEYA. Ce sont ceux-là même qui se sont déployés avec toute leur expertise scientifique pour suivre de près cette recherche dont la thématique exigeait effectivement une compétence scientifique pertinente et avérée et dont, ils ont été les mieux indiqués. Ils n'ont ménagé aucun effort pour faire de cette recherche, un chef d'œuvre

différent et dont la qualité n'est pas à négocier. Aucune pesanteur n'a reçu à freiner leur élan scientifique jusqu'à la concrétisation effective de cette thèse.

A l'Institut International d'Agriculture Tropicale (IITA) dans sa station de la République Démocratique du Congo (RDC) à Kinshasa, les collègues sont restés mes principaux conseillers scientifiques. Qui celui-ci ne pouvait hésiter de m'apporter un logiciel pour les analyses statistiques et qui celui-là, une documentation scientifique, toujours dans le souci de me voir accomplir ce devoir scientifique et surtout atteindre le cap. L'Institution a aussi mis des moyens matériels et financiers conséquents qui m'ont permis de mener cette recherche jusqu'à bon port. Toute ma reconnaissance aux autorités scientifiques de l'IITA en RDC.

A mon aîné et grand frère Dr KASU TOMBO Yatessi, je ne sais comment lui exprimer ma gratitude pour tous ses bienfaits pour moi. Il n'y a certainement pas eu un autre comme lui qui m'a soutenu alors que je décrochais à peine mon diplôme d'Etat des humanités scientifiques. Puisse-t-il trouver au travers de cette thèse le couronnement de sa ténacité et de ses sages conseils sur moi ?

Une équipe bien rodée composée des jeunes universitaires a accepté de rester à mes côtés et je dois reconnaître que son implication dans les différentes étapes a été pour beaucoup dans la mise sur pied et l'aboutissement de cette thèse. Je resterai reconnaissant vis-à-vis de vous Emmanuel BOLINGOLA, Modeste MASKOTI, Patrick BATSUMIRWA, Trésor YAYINGO, Vincent BOYELA, Emile AKIEMALI, Reagan ELOLI et Ali LIKULIA.

Aussi, les ingénieurs agronomes du PRONAM/INERA à Yangambi sont restés attentifs à cet effort et à leur souci de voir se développer un leadership scientifique de bon calibre pour le manioc à Yangambi, je dois avouer que cela m'a beaucoup stimulé pour faire mieux et vite. Je vous encourage vous aussi Ir François WEMBONYAMA SHAKO à aller de l'avant. Ir KAYUMBA a vu ce travail commencer mais le destin en a décidé autrement car il nous a quitté aux fleurs de l'âge au courant de l'année 2017. Paix donc à son âme.

Il y a deux professeurs de grand renom à la Faculté des Sciences Agronomiques de l'Université de Kinshasa (UNIKIN) et transfuge de l'Institut Facultaire des Sciences Agronomiques (IFA)-Yangambi qui resteront à jamais mes pères scientifiques. Je pense au Professeur émérite Pierre NSUMBU NLANDU et au Pr Albert LEMA-ki-MUNSEKI.

Il y a des amis que je considère comme des 'plus que frères'. Là, je pense à John KIAZAYAWOKO MAMBWENE, Jacques LIFENDI LABAMA, Antoine FRANGOIE

NGOIE, Janvier NGAMBE MOKUMOLI et Ghislain MAKELELA tous ingénieurs agronomes. Ils doivent être très fiers de cette thèse car elle est à vrai dire la leur aussi. Je les ai vu tous parfois très soucieux de voir cette œuvre atteindre son point ultime c'est-à-dire sa soutenance en bonne et due forme.

Mes frères, mes sœurs, mes oncles et tantes, mes cousins et cousines dans ma famille comme dans ma belle-famille, c'est vous au fait qui êtes honorés. Je ne saurai pas du tout vous citer un à un mais du moins vous comprendrez que je me souviendrai toujours de votre soutien familial digne d'un 'enfant gâté' par les siens.

Certainement, je serai incapable de citer tous ceux qui ont contribué d'une manière ou d'une autre dans la réalisation de cette œuvre scientifique. Je prierai donc ceux dont je n'ai pas pu citer nommément de croire à ma reconnaissance et que leur part est bien mentionnée dans mon *ego*.

Grand merci à vous tous. Cette thèse est à vrai dire le fruit de votre contribution.



Et si cela pouvait vraiment se dire :

Très 'mycorhiziennement' votre

Adrien NDONDA

Résumé

Les terres infectées par les Champignons Mycorhiziens Arbusculaires (CMA) ont été appliquées comme inoculum dans des sols marginaux épuisés après quatre saisons consécutives de manioc dans les jachères herbeuses des zones de forêts tropicales humides. Deux essais expérimentaux conduits suivant un dispositif factoriel avaient permis de comparer deux variétés de manioc se distinguant par leur capacité de synthétiser le caroténoïde dans les racines et étaient soumises aux inoculations des CMA apportées seules ou combinées au fumier de ferme et/ou à l'engrais minéral. Le deuxième essai avait pour objectif de vérifier le rôle que jouerait le phosphore dans la biosynthèse du caroténoïde et comportait 3 facteurs entre autres l'apport ou non de la dolomite, les deux variétés de manioc et 6 doses croissantes de phosphore allant de 0 kg à 125 kg/ha avec une raison de 25 kg. Les analyses de sol ont été effectuées en amont et en aval de l'essai et des changements significatifs étaient notés en ce qui concerne l'acidité de surface mesurée à 4,6 de pH en moyenne avant la mise en place du manioc. Ce pH s'est vu augmenter lorsque l'inoculum aux spores de CMA était combiné au fumier de ferme (pH 6,3) ou lorsque l'inoculum était appliqué seul (pH = 5,96) ou encore lorsque le fumier de ferme était apporté seul (pH = 4,93).

Des changements étaient également observés sur la dimension des particules du sol avec la diminution du pourcentage du sable à 65,5% lorsque le sol était traité au fumier de ferme et inoculé aux CMA. Le sable était à 70,9 % dans le contrôle (LSD.05 = 2,7 %). Les contributions des doses d'engrais minéraux ont donné une tendance à augmenter la fraction du sol en sable (entre 72 et 76 %). Les combinaisons de l'inoculum des CMA aux doses d'engrais et/ou au fumier ont montré une augmentation significative de la teneur en phosphore dans le sol et était évaluée à 7,5 % d'augmentation, de l'azote dans la fourchette de 4 % et du carbone jusqu'à 13 %. Les conditions générales du sol étaient modifiées grâce aux apports de l'inoculum des CMA et ces tendances ont également été observées sur la production obtenue sur les racines de manioc avec des moyennes de 55 t. ha⁻¹ de racines sous inoculation contre 21 t. ha⁻¹ de racines sur le témoin. Les CMA ont aussi favorisé la conservation de l'eau dans les tissus végétaux entraînant des réductions de la teneur en matière sèche dans les racines mais avec un effet positif sur la quantité et la qualité des feuilles de manioc même pendant les périodes austères des faibles précipitations.

Aussi, il était question de vérifier si les applications de la symbiose mycorhizienne avaient une influence sur la disponibilité du phosphore dans les sols acides des forêts tropicales et ainsi, dégager leur rôle dans la biosynthèse du bêta-carotène chez le manioc jaune. Des analyses statistiques faites à l'issue de l'étude, on a observé que les apports des CMA sous forme d'inoculum combinés ou non aux fertilisants conventionnels, influencent la teneur du bêta carotène du manioc jaune et la disponibilité de certains éléments minéraux dans le sol. On a obtenu d'une part des accroissements de rendement de l'ordre de 42 % chez la variété *Kindisa* (2001/1661) et 10 % chez *Liyayi* (MM 96/0287) grâce aux CMA. D'autre part, des modifications statistiquement significatives étaient aussi obtenues sur la mobilisation du phosphore assimilable dans le sol partant de 12,75 ppm dans le contrôle jusqu'à 18.07 ppm dans la combinaison CMA + NPK + Fumier (LSD.05 = 1,21 ppm, $p < .001$). Ces modifications du phosphore occasionnée par les CMA, ont influé sur la concentration du caroténoïde total dans les racines de manioc. Elle était passée de 5,2 à 6,8 mg.kg⁻¹ chez la variété *Kindisa* et de 3,2 à 5,1 mg.kg⁻¹ chez la variété *Liyayi* (LSD.05 = 0,36 mg.kg⁻¹, $p < .001$). Le rôle catalytique du phosphore dans la biosynthèse du caroténoïde est donc vérifié à ce stade. Aussi, une décroissance de l'ordre de 23 % de la matière sèche utile est observée dans les racines de manioc lorsqu'on apporte les inocula des CMA. Cette condition aurait favorisé la bonne concentration des caroténoïdes dans ces racines. L'acidité du sol indisponibilise l'absorption du phosphore par les racines et par conséquent, réduit l'effet catalytique du phosphore dans la biosynthèse du caroténoïde. A cause de cette acidité donc, les valeurs sont passées de 6,65 µg/g à 7,82 µg/g (LSD.05 = 1,05 µg/g) chez *Kindisa* et de 3,62 µg/g à 4,03 µg/g chez *Liyayi*.

La rentabilité économique de divers traitements appliqués était évaluée et il était ressorti que l'amendement des sols par inoculation des CMA permet d'obtenir des taux marginaux de rentabilité (TMR) supérieurs au taux de référence de 0,5 et évalués en moyenne à 1,39. Les apports des engrais minéraux par exemple se sont avérés non rentables avec un taux de 0,45.

Mots clés : champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA), phosphore, Sol acide, Teneur en caroténoïde total (TCT), Manioc

Abstract

Infected soils with arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) were applied as inoculums in marginal soils exhausted after four consecutive seasons under cassava in a grassy fallow land of humid tropic forest areas. Two experimental trials conducted using a factorial device before comparing two cassava varieties distinguished by their ability to synthesize carotenoid in cassava root and were subjected to mycorrhizal inoculums either combined or not to farmyard manure and mineral fertilizer. The second trial aimed to verify the role of phosphorus in the biosynthesis of carotenoid and included 3 factors, including whether or no dolomite was added, the two varieties of cassava and 6 increasing doses of phosphorus ranging from 0 kg to 125 kg per ha with a reason of 25 kg. Soil tests were done before and after planting and significant changes were noted with regards to the surface acidity measured at pH 4.6. The pH increased when mycorrhizal spores were combined to farmyard manure (pH 6.3) and when manure was brought alone (pH = 4.93) or when single inoculum (pH = 5.96).

Changes were also observed on sand particle size where their percentage decreased to 65.5 % when soil was amended with manure inoculated with mycorrhizal and 70.9 % in the control (LSD.05 = 2.7 %). Contributions of micro doses of mineral fertilizers showed a trend in sandy soil fraction increases (ranging between 72-76%). Combinations of inoculated to micro doses of fertilizer and/or manure indicated significantly increases of phosphorus content in the soil to about 7.5 % for nitrogen in the range of 4% and carbon up to 13%. General soil conditions were improved by inoculum inputs from AMFs and these trends were also observed on cassava root productivity with root yield of 55 t. ha⁻¹ under inoculation against 21 t. ha⁻¹ of the control. AMFs also induced water conservation in plant tissues, leading to reductions in dry matter content in roots and leaves.

It was also observed that the applications of mycorrhizal symbiosis had an influence on the availability of phosphorus in acidic soils in tropical forests. This revealed their role in the biosynthesis of beta-carotene in yellow cassava. The study indicated that the intake of AMFs in the form of inoculum, when combined with conventional fertilizers or not, influenced the behavior of yellow cassava and the availability of certain minerals in the soil. On one hand, yield increased by 42 % with variety *Kindisa* and 10% with variety *Liyayi* due to AMFs inoculation; while on the other hand, statistically significant changes were obtained on the phosphorus mobilization in the soil from 12.75 ppm in the control up to 18.07 ppm in the

combination of AMF + NPK + Manure (LSD.05 = 1.21 ppm, $p < .001$). These changes in phosphorus influenced TCC of cassava roots from 5.2 to 6.8 mg. g⁻¹ in *Kindisa* and 3.2 to 5.1 mg. g⁻¹ in *Liyayi* (LSD.05 = 0.36 mg.kg⁻¹, $p < .001$). Also, a decrease in order of 23% of useful dry matter is observed in the cassava roots when inoculums of AMFs are brought. This condition would have favored the good concentration of carotenoids in these roots. Soil acidity makes root phosphorus uptake unavailable and therefore reduces the catalytic effect of phosphorus in carotenoid biosynthesis. Values increased from 6.65 µg / mg to 7.82 µg / mg (LSD.05 = 1.05 µg / mg) in *Kindisa* and from 3.62 µg / mg to 4.03 µg / mg in *Liyayi*.

The economic viability of these various treatments was evaluated, and it was found that the soil amendment under AMF inoculum makes it possible to obtain marginal rates of return (MRR) higher than the reference rate of 0.5 and evaluated at 1.39. The inputs of mineral fertilizers for example have proved unprofitable with a rate of 0.45.

Key words: arbuscular mycorrhizal fungi (MAC), phosphorus, acidic soil, total carotenoid content (TCC), cassava

Liste des abréviations et des sigles

AIB :	Agriculture Itinérante sur brulis	
Al ³⁺ :	Ion Aluminium	
AMF:	Arbuscular Mycorrhizal Fungi	
ANOVA :	Analysis of variance	
B :	Bore	
Br :	Brome	
C :	Carbone	
Ca :	Calcium	
Cl :	Chlore	
CMA :	Champignon Mycorrhizien Arbusculaire	
CO :	Carbone Organique	
Co :	Cobalt	
CO ₂ :	Gaz carbonique (Dioxyde de carbone)	
Cr :	Crome	
Cs :	Césium	
Cu :	Cuivre	
CV :	Coefficient de Variation	
Fe :	Fer	
Fe ³⁺ :	Ion Fer	
F pr :	Valeur F probable de la table	
FGRNR:	Faculté de Gestion de Ressources Naturelles Renouvelables	
G :	Groupe	
ha :	Hectare	
H ₂ CO ₃ :	Acide carbonique	
H ₃ PO ₄ :	Acide phosphorique (Phosphate d'Hydrogène)	
H ⁺ :	Ion Hydrogène	
IITA :	International Institute of Tropical Agriculture	
IFA :	Institut Facultaire des Sciences Agronomiques	
INERA :	Institut National pour l'Etude et la Recherche Agronomiques	
K :	Potassium	
KCl :	Chlorure de Potassium	
LMD :	Licence-Master-Doctorat	LSD
:	Least Significant Difference (La plus petite différence Significative)	
Mg :	Magnésium	
mg.kg-1 :	milligramme par kilogramme	
Mn :	Manganèse	
Mo :	Molybdène	
MO :	Matière Organique	
MRR :	Marginal Rate of Return	
MS % :	Pourcentage de la matière sèche	
N :	Azote	

Na :	Sodium
Ni :	Nickel
NPK :	Engrais minéraux avec Azote – Phosphore – Potassium
PaST :	PAleontological STatistics
P :	Phosphore
p :	Probabilité de l'erreur expérimentale
PC :	Paroi du Champignon
PCA :	Principal Component Analysis
pH :	Potentiel Hydrogène
PH :	Paroi de l'Hôte
PP :	Période de Récupération
PPA :	Appareil de Pré-pénétration
ppm :	Partie pour million
Pr :	Professeur d'Université
PRONAM :	Programme National Manioc de l'INERA
RDC :	République Démocratique du Congo
RD Congo :	République Démocratique du Congo
RAC :	Ratio Avantages-Coûts
S :	Soufre
Si :	Silicium
t. ha ⁻¹ :	Tonne par ha
TCC :	Total Carotenoïd Content
TCT :	Teneur en Carotène Total
TMR :	Taux Marginal de Rentabilité
TRI :	Taux de Rentabilité Interne
UNIKIN :	Université de Kinshasa
UNIKIS :	Université de Kisangani
USDA :	United States Department of Agriculture
VA :	Vésicule-Arbuscule
VAN :	Valeurs Actualisées Nettes
Zn :	Zinc
β-carotène :	Béta- carotène
µg/g :	Micron gramme par gramme

Liste des figures

Figure 1 : Les différents types de mycorhizes.....	25
Figure 2: Coupe descriptive d'une racine endomycorhizée	27
Figure 3 : Symbiose racinaire des endos et ectomycorhizes. (A gauche) une coupe transversale et (à droite), une coupe longitudinale d'une racine mycorhizée.....	29
<i>Figure 4: Pénétration de l'hyphe dans la cellule et formation des arbuscules</i>	<i>30</i>
Figure 5 : Symbiose ectomycorhizienne	32
Figure 6: Schéma des différentes étapes de colonisation des champignons MA (adapté d'après Bonfante & Genre 2010)	39
Figure 7 : Sites expérimentaux	55
Figure 8: Conditions des précipitations mensuelles durant la période expérimentale.....	57
Figure 9: Diagramme ombrothermique des moyennes des sites expérimentaux durant la période expérimentale	58
Figure 10: Triangle de classification de la texture du sol de l'USDA sur la base de la taille des grains.....	59
Figure 11: Multiplication ex situ des spores mycorhiziennes sous sorgho à forte densité.....	62
Figure 12: Schéma du dispositif expérimental de l'essai comparant les effets des inocula mycorhiziens	73
Figure 13: Dénombrement des spores mycorhiziennes avant et après la culture sous sorgho	80
Figure 14 : Spore mycorhizienne développant un hyphe (à gauche) et un nématode à côté d'une spore (à droite).....	81
Figure 15: Diagramme des populations des spores mycorhiziennes dans le sol en rapport avec les traitements apportés.....	83
Figure 16: Diagramme d'analyse des variables des sols et des tissus végétaux sur le rendement en racine tubéreuse chez la variété Kindisa à Kisangani.....	84
Figure 17 : Diagramme d'analyse des variables des sols et des tissus végétaux sur le rendement en racine tubéreuse chez la variété Kindisa à Kisangani.....	86
Figure 18: Diagramme d'analyse des variables des sols et des tissus végétaux sur le rendement en racine tubéreuse chez les variétés Kindisa et Liyayi à Kisangani	88
Figure 19: Diagramme d'analyse des variables des sols et des tissus végétaux sur le rendement en racine tubéreuse chez les variétés Kindisa et Liyayi à Kisangani	88
Figure 20: Diagramme d'analyse des variables des sols et des tissus végétaux sur le rendement en racine tubéreuse chez les variétés Kindisa à Litoy.....	90
Figure 21: : Diagramme d'analyse des variables des sols et des tissus végétaux sur le rendement en racine tubéreuse chez les variétés Liyayi à Litoy	92
Figure 22: Diagramme d'analyse des variables des sols et des tissus végétaux sur le rendement en racine tubéreuse chez les variétés Liyayi à Litoy	94
Figure 23: PCA établissant la relation entre la teneur en phosphore dans le sol et le rendement du manioc	97
Figure 24: Les rendements du manioc en racines tubéreuses fraîches (t. ha ⁻¹) dans les deux sites et durant deux saisons culturales du manioc	105
Figure 25: Les moyennes des rendements du manioc en racines fraîches suivant les saisons culturales et les sites expérimentaux.....	107
Figure 26: Accroissement du rendement de manioc en tonnes de racines fraîches après 4 saisons consécutives de manioc.....	111
Figure 27: Calibre de manioc dans les parcelles avec apport des inocula des champignons mycorhiziens	112

Figure 28: Vigueur du manioc en saison sèche. Champ (A) avec apport des CMA et (B) sans apport	113
Figure 29: Le cycle du phosphore dans le sol	117
Figure 30: Schéma du dispositif expérimental sur l'évaluation du phosphore sur lacaroténoïde du manioc	124
Figure 31: Toile présentant la matière sèche (en %) suivant les traitements appliqués au sol	129
Figure 32 : Toile présentant le Rapport entre le rendement frais ($t\ ha^{-1}$) et le rendement sec ($t\ ha^{-1}$) des racines tubéreuses suivant les traitements appliqués au sol	130
Figure 33 : Biplot des principales variables observées (rendement du manioc, TCC, pH, matière sèche et Phosphore).....	132
Figure 34: Régressions linéaires entre les variables observées	134
Figure 35: Teneur en caroténoïde total sous l'application de la chaux (dolomite) et des doses variées de phosphore. A gauche avec la variété de manioc Kindisa et à droite avec la variété de manioc Liyayi	138
Figure 36: Amplitudes des Taux marginaux de rentabilité économique suivant les apports de fertilisants	145
Figure 37: Photo d'un seedling de <i>Pinus sylvestris</i> indiquant le volume de sol colonisé par les champignons ectomycorhiziens (mycélium en blanc) et le volume de sol colonisé par les racines (en jaune).....	152

Liste des tableaux

Tableau 1 : les coordonnées géographiques des sites d'échantillonnage et d'installation des essais expérimentaux	56
Tableau 2 : Quelques caractéristiques des variétés utilisées dans les expérimentations...	68
Tableau 3 : Comptage des spores mycorhiziennes avant extraction suivant les échantillons des terres prélevés sous <i>Chromolaena odorata</i> dans différents sites autour de Kisangani.....	75
Tableau 4 : Analyses des éléments du sol après les cultures du manioc en première saison expérimentale (2015)	92
Tableau 5 : ANOVA de covariance entre les variables rendement et teneur du sol en phosphore pour les deux saisons expérimentales.....	98
Tableau 6 : Les données des caractéristiques agronomiques et de rendement du manioc sous divers traitements du sol.....	107
Tableau 7 : Besoins en engrais suivant les traitements à observer.....	120
Tableau 8 : Besoins en engrais par type d'engrais et par essai.....	121
Tableau 9 : 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.....	126
Tableau 10 : Evaluation des éléments du sol suivant les divers traitements apportés au sol.....	129
Tableau 11 : Corrélations entre les variables observées.....	131
Tableau 12 : Rendement, teneur en caroténoïde total et matière sèche des racines de manioc après apports des doses croissantes de phosphore et de la chaux calcaire sur deux variétés de manioc.....	134
Tableau 13 : Calcul du taux Marginal de rentabilité économique des systèmes de production testés	144

INTRODUCTION GÉNÉRALE

En agriculture tropicale, la gestion de la fertilité naturelle des sols est l'un des défis majeurs auquel les opérateurs agricoles doivent faire face au quotidien pour faire passer cette agriculture qui demeure empirique et basée sur la subsistance, vers une agriculture économique, plus rationnelle et génératrice de revenus. Actuellement d'ailleurs, les conditions vitales des opérateurs agricoles dans leur ensemble laissent à désirer étant donné que les rendements qu'ils obtiennent en culture restent au plus bas et ne leur permettent pas de relever le défi de l'insécurité alimentaire laquelle en principe est un facteur de très grande importance si on veut sortir de la pauvreté à laquelle se confrontent de manière régulière et permanente les populations des zones rurales des régions cibles de cette étude.

1. Problématique

Les causes de faible productivité agricole sont connues et peuvent être groupées en deux grands ensembles qui sont (i) les causes génétiques attribuées à la mauvaise qualité du matériel végétal utilisé par la majorité des exploitants essentiellement constituée des paysans et (ii) les causes agronomiques qui ressortent les pratiques agricoles irrationnelles et non appropriées, utilisées dans des sols appauvris des zones des tropiques. Ces zones sont soumises aux particularités naturelles des climats marginaux qui font prévaloir des températures diurnes excessives et des précipitations diluviennes régulières et battantes. Ces conditions donc suffisent pour entraîner un appauvrissement accéléré des sols destinés à l'agriculture. Les périodes pluvieuses sont réputées agressives parce qu'à cause de fortes précipitations, elles entraînent dans leur parcours, des fortes migrations des éléments minéraux du sol. On assiste à des phénomènes tels que le lessivage et la lixiviation dans les terres arables. Ces mouvements effrénés des particules essentielles pour la constitution des sols fertiles laissent la place aux cations acides à faible capacité d'échange et responsable de la faible mobilité des molécules telle que le phosphore pourtant essentiel dans la composition et la nutrition minérale des plantes. La conséquence la plus immédiate est donc l'acidification des sols qui entraînent des effets néfastes sur l'agriculture. D'une part, on note que l'action des ions H^+ dans le sol est rarement directe étant donné que les plantes sont très plastiques et d'autre part, on reconnaît que le pH faible doit être considéré comme une indication du volume des anions sur le complexe absorbant et sur l'activité biologique du sol (nitrification, fixation d'azote atmosphérique). Les répercussions et les effets pervers de cette acidité sont

synonymes de perte de rendement et de la qualité de la production car elle cause la baisse de l'assimilation des engrais (Adjanooun, 2006), la mauvaise nutrition minérale (Lopez *et al.*, 1994), le ralentissement de l'activité biologique (Troupa et Koné, 2003), la faible disponibilisation des éléments pour les plantes (Palm *et al.*, 1997), la concurrence des mauvaises herbes et parfois s'installent aussi la phytotoxicité, l'asphyxie des racines et la perte de levée qui elle, entraîne l'hétérogénéité du peuplement (Kami, 1994).

Paradoxalement à la touffe végétale protubérante que renferment les forêts équatoriales humides, les sols de ces zones sont particulièrement fragiles et relativement instables. Ils perdent rapidement leur fertilité à cause du climat caractérisé par des températures et des humidités élevées en plus d'une pluviométrie intense. Ces conditions comme dit ci-haut, favorisent une migration permanente des éléments minéraux du sol. Ceux-ci sont les plus fréquemment entraînés dans les horizons profonds du sol (lessivage) et/ou sont déplacés vers les dénivellations les plus basses (lixiviation) par les eaux de ruissellement. La forte densité de la litière sous la forêt a donc pour conséquence le développement d'une biodiversité microbienne tellurique importante et ainsi, occasionne une intense activité de celle-ci qui minéralise de manière effroyable cette biomasse grâce aux conditions plus favorables d'humidité et de température (Bonifas, 2006 ; Bâ *et al.*, 1999).

En zone forestière donc, la tendance qu'on observe est qu'à l'ouverture des champs, des productions plus importantes sont obtenues puis se suivent de manière graduelle celles de plus en plus faibles (Tollens, 2010). Les exploitants abandonnent ainsi très vite ces espaces pour ouvrir des nouvelles forêts. C'est dans ce contexte d'ailleurs qu'on parle de l'agriculture itinérante sur brûlis (AIB) avec tous les effets négatifs que cette pratique agricole entraîne sur l'environnement, sur la biodiversité forestière et sur les productions agricoles futures. Les jachères sont courtes et ne permettent pas une restauration convenable des sols épuisés par les cultures successives et deviennent au fil de temps, de plus en plus herbeuses. Les gros arbres pourtant, qui occupaient ces espaces autrefois puisaient plus bas les minéraux lixiviés des horizons superficiels pour le recycler au sol à l'issue de leur métabolisme et cela grâce au volume et à la profondeur de leur enracinement.

(Jackson et Piper, 1989) avaient constaté que la pratique de l'Agriculture Itinérante sur Brulis allait jusqu'à affecter le climat et ainsi, réduisait le rendement des cultures vivrières en Afrique jusqu'à 30 %. Cette pratique est en quelque sorte responsable de plusieurs phénomènes caractérisant les sols sous la forêt entre autres, l'acidité de surface, les carences

en éléments minéraux et en matières organiques, la destruction de la biodiversité tellurique, etc. Le corollaire qui s'en suit est la baisse rapide de la fertilité de sols qui favorise des systèmes agricoles nomades débouchant sur une dévastation irrationnelle des forêts pour des raisons d'agriculture et donc, contributrices des changements climatiques déjà très perceptibles au courant de ces dernières décennies (Karsenty, 2012).

Les éléments minéraux et la matière organique du sol sont perdus par minéralisation par les microorganismes du sol et/ou par calcination à partir du feu d'incinération qui demeure à ce jour la pratique agricole usuelle et empirique dans les zones tropicales. Il s'ajoute aussi les feux de brousse intempestifs dans les espaces herbeuses (très fréquents dans les zones savaniques). Si l'eau des pluies torrentielles fréquentes provoquent le transport de la matière essentielle à la nutrition des plantes vers des horizons inaccessibles par la plupart des racines des cultures vivrières, d'autres éléments pourtant restent présents dans le sol mais sont rendus inassimilables aux végétaux parce que complexés par les cations acides du sol. C'est le cas du phosphore qui bien qu'étant un élément majeur dans la nutrition des plantes, ne puisse toujours pas être disponible dans les sols acides des zones tropicales.

Les pertes de production deviennent fréquentes dans ces zones où les exploitants sont conscients de ne pas normalement produire sans recourir à l'ouverture des nouvelles forêts. Entretemps, la pression démographique est de plus en plus croissante dans ces zones et contribue à la destruction systématique et effrénée des écosystèmes. Cela est une cause importante des perturbations climatiques qui ne permettent pas de maîtriser un calendrier agricole convenable. On assiste à des successions des canicules durant l'année agricole (pluies en saison sèche et sécheresse en saison de pluie, pluies battantes entraînant des inondations, etc.). Ces anomalies deviennent imprévisibles et influent sur la production végétale. Dans une étude récente conduite dans les hinterlands de Kisangani, il a été observé que la production du manioc était affectée jusqu'à 46 % de décroissance de rendement juste après que le moment de plantation ait été suivi par une période de sécheresse de 1 à 2 mois (Ndonga, 2014).

Il faudra donc que plusieurs scénarii soient imaginés pour continuer à produire normalement en présence des aléas du climat qui surviennent pendant une saison culturale (sécheresse, inondation, etc.) en prenant des précautions adéquates susceptibles de réduire la pression anthropique sur la forêt et en utilisant des pratiques qui font recours de moins en moins au feu de l'incinération (Mahungu *et al.*, 2015). Les réductions de rendement obtenues chez le manioc par (Ndonga, 2014) étaient plus occasionnées par des pertes de densité lors de la

reprise du manioc dues aux températures élevées, aux carences en eau dans le sol et aussi certainement à la modification des propriétés du sol à partir des mauvaises pratiques culturales utilisées dans la zone forestière. Cependant, puisqu'il est clairement établi que l'agriculture en régions tropicales est aujourd'hui victime des perturbations climatiques, il y a aussi lieu de mettre en évidence les possibilités culturales qui peuvent assurer une production végétale pendant ces périodes austères qui dans la plupart de cas, apparaissent de manière inattendue et sont malheureusement souvent fréquentes dans les zones forestières à forte démographie.

La possibilité de maintenir la fertilité et l'eau dans le sol pendant des périodes marginales constituerait un tournant favorable qui permettrait aux exploitants agricoles de produire normalement la nourriture même lorsque le bilan hydrique des sols serait au plus bas niveau. Ainsi, réaliser une pareille performance permettrait aux agriculteurs de produire même en contre saison et assurerait une plus-value pour leurs ménages (agricoles) qui dans leur majorité vivent d'une agriculture de subsistance et sont dépourvus des revenus nécessaires pour subvenir aux besoins les plus élémentaires de leur famille. Dans cette étude, on vise un maintien et une amélioration durable de la fertilité et du bilan hydrique des sols appauvris par des pratiques irrationnelles très courantes en milieu réel, à partir des applications des endophytes locaux qui sont présents dans les écologies des zones forestières de la République Démocratique du Congo (Jolien *et al.*, 2017).

Le choix porté sur les champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA) constituerait une alternative de maintien de la fertilité et de l'économie en eau de ces sols dégradés des hinterlands de Kisangani. Certes, une maîtrise de la production dans ces espaces agricoles relativement appauvris à cause des pratiques décriées ci-dessus, serait un atout de grande importance qui permettra aussi d'épargner la forêt des effets pervers de l'agriculture.

En outre, on note aussi que le bêta-carotène (*β -carotène*) est un précurseur de la provitamine A et est présent dans le manioc jaune. Il serait même impliqué dans la prévention de certaines maladies. Cet effet bénéfique a été montré dans les maladies de l'œil dont la Dégénérescence Maculaire Liée à l'Age (DMLA), 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 apprend-t-on que les caroténoïdes auraient un rôle dans la régulation du système immunitaire

et dans la protection de la stabilité génomique (Fraser and Bramley, 2004). (Hecht *et al.*, 2001) avaient observé que le phosphore sous forme de diphosphate cyclique en 1-hydroxy-2-méthyl-2-(E) - butenyl 4-diphosphate participait essentiellement dans la synthèse du β -carotène. Cependant, à cause de l'acidité qui caractérise les sols des tropiques, on retrouve que le phosphore est souvent présent dans le sol mais se trouve pour la plupart de cas sous une forme non assimilable par les végétaux parce qu'il est complexé par les cations acides tels que l' Al^{3+} , le Fe^{3+} , le H^+ , etc. et en même temps, (Mousain *et al.*, 1989) ont confirmé le rôle des mycorhizes dans la disponibilisation pour les végétaux du phosphore encastré dans les feuillets argileux et acides du sol. Les mycorhizes donc contribueraient à une synthèse plus importante du β -carotène grâce à la mobilisation du phosphore dans le sol. Il revient par ailleurs à croire que ce champignon agirait sur les propriétés du sol et les composants des rendements du manioc. Déjà la longueur importante des filaments mycorhiziens laissent entrevoir la possibilité de recyclage des éléments du sol autrefois lixiviés vers les horizons profonds du sol. Doit-on penser que les champignons mycorhiziens soient capables de ramener dans la rhizosphère du manioc, les éléments minéraux et l'eau perdus dans les profondeurs du sol ? Cette contribution permettra de modifier de manière significative les conditions de ces sols et par ricochet, les rendements des cultures sous-jacentes.

Aussi, nous faudra-t-il vérifier les effets qu'entraîneraient les combinaisons des divers apports entre autres les inocula mycorhiziens combinés ou non à la matière organique et/ou aux engrais minéraux dans l'exploitation du manioc sur l'amélioration de ces divers composants comme l'amidon, la matière sèche, le bêta-carotène et bien d'autres composants des tissus de la racine et des feuilles de manioc ? Toutes ces conditions laissent présager une possibilité de soutenir la production agricole même lorsque les conditions édapho-climatiques posent réellement des problèmes. Le maintien de l'eau et d'une fertilité optimale dans le sol permettrait aussi d'obtenir des productions désirées même en contre saison et feront face aux aléas des changements climatiques.

2. Les questions de recherche

Comme alternative à cette problématique, des questions de recherche ont été émises à partir des observations des phénomènes quasi-réels. Ces phénomènes donc peuvent constituer les termes de cette recherche et ainsi, il y a lieu de se poser les questions suivantes :

a. Question principale

Les implications et applications des champignons mycorhiziens dans la fertilisation des sols appauvris des jachères herbeuses en zones forestières sont-elles susceptibles d'améliorer les conditions de ces sols, apporter des modifications dans le métabolisme des tissus végétaux des cultures sous-jacentes et jouer un rôle dans le contrôle des pathogènes du sol ?

b. Questions spécifiques

- 1) Les champignons mycorhiziens sont-ils présents dans les sols des Hinterlands de Kisangani ?
- 2) Est-ce que les apports des champignons mycorhiziens sous forme contrôlée (inoculum, combinés ou non à d'autres types de fertilisants) permettraient-ils la reconstitution de sols appauvris après des pratiques agricoles irrationnelles réalisées par les exploitants agricoles des zones de forêt à forte démographie ?
- 3) Les champignons mycorhiziens combinés ou non aux fertilisants (minéraux et/ou organiques) sont-ils susceptibles d'améliorer l'assimilation du phosphore des sols acides des régions tropicales et ainsi favoriser la biosynthèse du bêta-carotène chez le manioc jaune ?
- 4) Les champignons mycorhiziens parviennent-ils à contrôler les pathogènes des racines de manioc entre autres les nématodes ?
- 5) La production de manioc obtenue à partir des apports des champignons mycorhiziens en combinaison ou pas aux autres fertilisants, favoriserait des accroissements des revenus susceptibles de modifier les conditions de pauvreté qui caractérisent les ménages des exploitants agricoles ?

3. Les hypothèses

A partir de ces questions, les hypothèses ci-dessous sont émises :

2.1. Hypothèse générale

Les effets positifs sur les conditions du sol et dans les tissus végétaux attribués aux champignons mycorhiziens arbusculaires sont susceptibles d'apporter des modifications sur la productivité du manioc produit dans les jachères herbeuses en zone forestière

2.2. Les hypothèses spécifiques sont les suivantes :

- 1) Les champignons mycorhiziens arbusculaires sont présents dans les sols des Hinterlands de Kisangani.

- 2) Les apports contrôlés des champignons mycorhiziens arbusculaires sous forme d'inoculum, combinés ou non à d'autres types de fertilisants permettent la reconstitution de sols appauvris après des pratiques agricoles irrationnelles réalisées par les exploitants en zone de forêt à forte démographie.
- 3) Les mycorhizes combinés ou non aux fertilisants (minéraux et/ou organiques) sont susceptibles d'améliorer l'assimilation du phosphore en sols acides des régions tropicales et ainsi favoriser la biosynthèse du bêta-carotène chez le manioc jaune.
- 4) Les champignons mycorhiziens contrôlent les pathogènes des racines de manioc entre autres les nématodes
- 5) La production de manioc obtenue à partir des apports des champignons mycorhiziens arbusculaires en combinaison ou pas aux autres fertilisants, favorise des accroissements des revenus susceptibles de modifier les conditions de pauvreté qui caractérisent les ménages des exploitants agricoles.

4. Objectifs

Pour répondre aux questions de recherche posées, nous nous sommes proposé d'atteindre les objectifs suivants :

a. Objectif général

Evaluer du point de vue agronomique les avantages attribués aux champignons mycorhiziens arbusculaires par rapport aux conditions des sols dans les jachères herbeuses en zone forestière et évaluer leurs effets dans les tissus végétaux du manioc.

b. Les objectifs spécifiques consistent à :

- 1) Vérifier la présence des champignons mycorhiziens dans les sols de zones des hinterlands de Kisangani.
- 2) Evaluer les effets des apports des champignons mycorhiziens combinés ou non à d'autres types de fertilisants sur la reconstitution des sols appauvris après des pratiques agricoles irrationnelles réalisées par les exploitants en zone de forêt à forte démographie
- 3) Vérifier si l'inoculation des CMA combinés ou non aux fertilisants (minéraux et/ou organiques) est susceptible d'améliorer l'assimilation du phosphore en sols acides des

régions tropicales et s'il est capable de favoriser l'accroissement de la biosynthèse du bêta-carotène chez le manioc jaune.

- 4) Vérifier si les champignons mycorhiziens parviennent à contrôler les pathogènes des racines de manioc entre autres les nématodes
- 5) Evaluer si la production de manioc obtenue à partir des inoculations des champignons mycorhiziens arbusculaires en combinaison ou pas aux autres fertilisants, favorise des accroissements de revenus susceptibles de modifier les conditions de précarité dans les ménages des exploitants agricoles.

5. Intérêt du travail

Cette recherche se veut être une alternative à l'épineux problème de perte permanente de la fertilité des sols forestiers à cause des pratiques agricoles non appropriées et des conditions climatiques particulièrement agressives. Elle veut faire contribuer les avantages attribués aux mycorhizes dans la gestion de la fertilité des sols à partir des champignons mycorhiziens locaux

6. Subdivision de la thèse

Cette thèse comprend 4 parties : la première traite sur une brève revue de la littérature sur les champignons mycorhiziens et le manioc dans le contexte des zones forestières, la deuxième parle du milieu, matériels et méthodes utilisés durant les expérimentations, la troisième partie présente les résultats sur les effets des inoculations des CMA sur la reconstitution des sols pauvres et appauvris, la mobilisation du phosphore indisponible du sol et le rôle de celui-ci (Phosphore) sur la biosynthèse du caroténoïde. Il présente aussi quelques résultats sur les effets des applications de CMA sur le contrôle des nématodes de racines de manioc et sur une évaluation agroéconomique des quelques résultats obtenus. La quatrième partie s'étale sur une discussion générale de la thèse et une conclusion générale assortie de quelques recommandations clôture cette thèse.

Première partie : Revue de la littérature

I. Les Champignons mycorhiziens

1.1. Brève historique

Il y a de cela environ 400 millions d'années que les premières plantes quittaient les milieux aquatiques pour venir coloniser la terre ferme (Galbrun et Charles, 2010). Ce changement ne s'était pas fait d'un seul coup et sans aide. Au contraire, les plantes avaient eu besoin des alliés pour réussir ce tour de force et parmi ceux-ci, il y avait eu des champignons. C'est grâce donc à leur association avec certains champignons que les plantes avaient réussi à survivre dans des milieux offrant peu d'humidités et de nutriments. Cette association ou symbiose entre la plante et le champignon se nomme 'mycorhize'.

1.2. Quelques notions sur les mycorhizes

Les mycorhizes (du grec *myco* = champignon et *rhiza* = racine) sont des « unions durables » résultant de l'association entre les racines des végétaux et certains champignons du sol. Chaque union est basée sur des échanges réciproques. Les mycorhizes constituent des partenaires essentiels dans la relation sol – plante – microorganisme. En effet, certaines espèces végétales ne peuvent croître normalement sans leur symbiote fongique dont elles sont fortement dépendantes et avec lequel elles co-évoluent (Lachance, 2012 ; Brundrett, 1991). Le nouvel organe mixte est formé de tissus de la plante hôte et du champignon mycorhizien et chaque partenaire optimise son développement grâce à cette symbiose.

Les racines de plus de 80% des espèces de plantes vasculaires présentent ou sont susceptibles de présenter des symbioses mycorhiziennes (Duponnois *et al.*, 2008). La symbiose mycorhizienne est donc un phénomène général chez les plantes à l'exception de quelques familles comme les *Brassicaceae*, les *Caryophyllaceae*, les *Cyperaceae*, les *Juncaceae*, les *Chenopodiaceae* et les *Amaranthaceae* qui présentent très peu d'associations mycorhiziennes (Strullu, 1986 ; Maede, 1954). La fonction du mycorhize est primordiale dans tout ou une partie du cycle de la plante hôte surtout mais non exclusivement pour la nutrition. Le champignon profite des ressources carbonées synthétisées par la plante *via* la photosynthèse et qui sont indispensables à son métabolisme, à son cycle de développement et à sa fructification. En retour, les hyphes fongiques améliorent la nutrition hydrique et minérale de la plante hôte grâce à l'augmentation du volume de sol prospecté et à la production de divers

enzymes extracellulaires (phosphatase, phytase) susceptibles de mobiliser du phosphore à partir de composés complexes du sol (Munns *et al.*, 1981 ; Malaisse, 1973). La présence des mycorhizes entraîne l'apparition des nouveaux compartiments biologiques dans la rhizosphère. En modifiant la physiologie de la plante et donc la sécrétion des exsudats racinaires, les mycorhizes induisent des modifications significatives dans la structure des communautés bactériennes au voisinage de ces racines mycorhizées : le terme mycorhizosphère a été utilisé pour désigner ce volume de sol sous influence des mycorhizes (Chen *et al.*, 2000a). Des études réalisées en milieu naturel sur des plantes colonisées par des champignons mycorhiziens ont montré qu'environ 10 à 20% du carbone fixé au niveau du végétal sont transférés aux symbiotes fongiques. Ceci représente une entrée significative d'énergie dans ce compartiment, et ce carbone jouera un rôle crucial dans la dynamique de nombreux microorganismes associés à cette mycorhizosphère (Lopez *et al.*, 1994). Par ailleurs, les hyphes mycéliens des champignons formant les associations mycorhiziennes peuvent s'étendre jusqu'à plusieurs centimètres au-delà de la surface racinaire (Pichot & Roche, 1972). Outre leur rôle dans le prélèvement des nutriments, ces hyphes favorisent la formation d'agrégats dans le sol notamment par leur exsudation. Ces structures stimulent la prolifération de microorganismes bien distincts : l'hyphosphère désigne ainsi le sol conditionné par ce réseau d'hyphes (Malaisse, 1973). La richesse du sol en phosphore est un facteur déterminant dans la mise en place de la symbiose mycorhizienne. (Chen *et al.* 2007) ont proposé que le mécanisme par lequel le phosphore contrôlerait la formation de cette symbiose soit lié à la perméabilité membranaire des racines. En effet, en condition de sol riche en phosphore, les métabolites nécessaires à l'initiation et à la formation de l'association plante – champignon mycorhizien ne seraient pas exsudés en quantités suffisantes par suite d'une baisse de la perméabilité membranaire des racines due à leur teneur élevée en phosphore. De même, Graham *et al.* 1981 ont indiqué que les champignons mycorhiziens, en améliorant la nutrition phosphatée de la plante, réduisaient également les quantités d'exsudats racinaires libérées dans la rhizosphère du fait d'une diminution de la perméabilité des membranes racinaires. En revanche, Strullu, 1986 observe plutôt une augmentation de l'exsudation racinaire en présence des mycorhizes. Différentes hypothèses ont été avancées pour expliquer ce mécanisme : une plus grande allocation de photosynthétats au symbiote fongique (Koch & Johnson, 1984), la production par les mycorhizes d'hormones augmentant la perméabilité racinaire (Bowen, 1994), etc. Selon le type de champignons symbiotiques et les critères morpho-anatomiques du nouvel organe formé, deux principaux types de

mycorhizes ont majoritairement été décrits en zone tropicale (Sandmann *et al.*, 1990) : les endomycorhizes à vésicules et/ou à arbuscules et les ectomycorhizes.

1.3. Les types des mycorhizes

Quel que soit le type mycorhizien, le champignon reste confiné dans le cortex racinaire et ne franchit jamais la barrière endodermique (Figure 1).

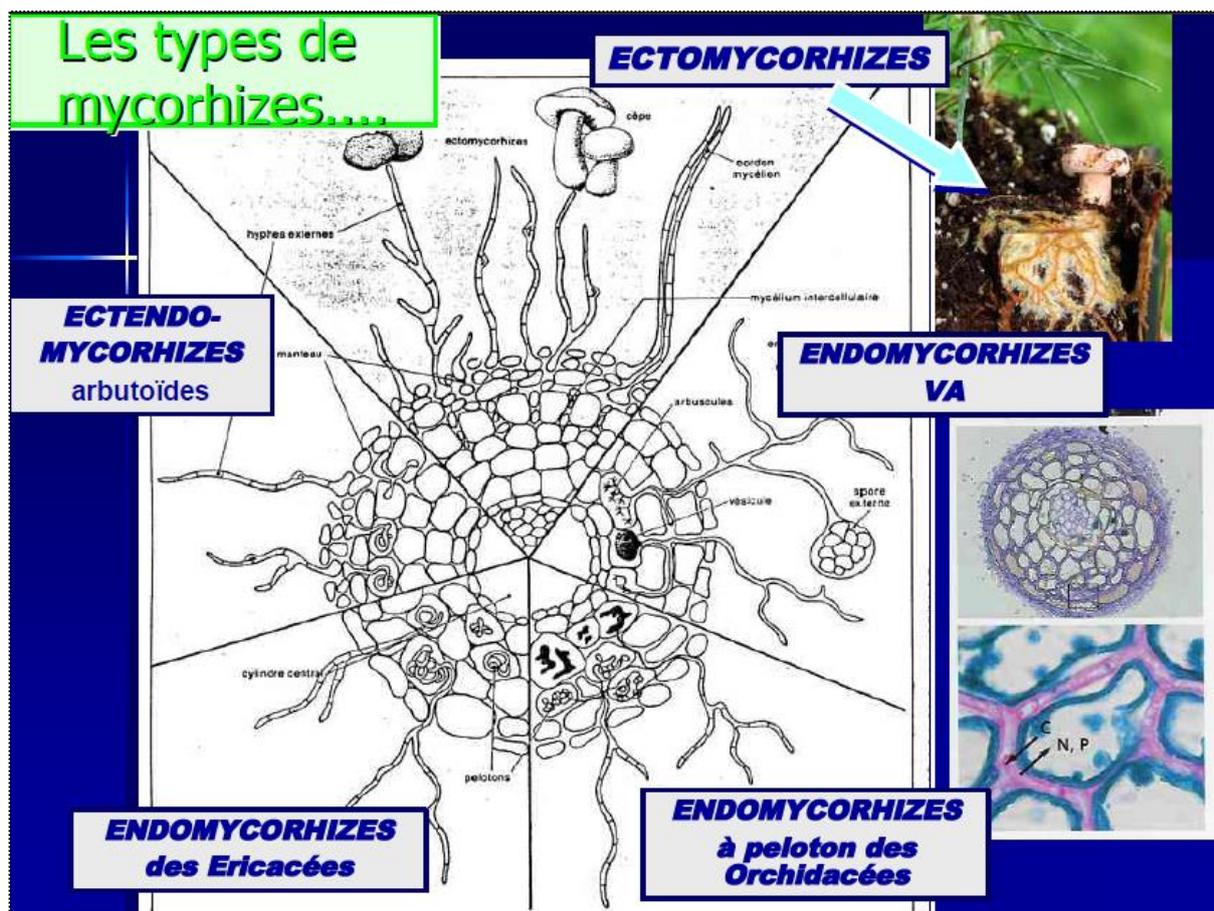


Figure 1 : Les différents types de mycorhizes

Source : J. GUINBERTEAU, INRA, 2017. Bordeaux - Unité de recherche MycSA. Mycologie & Sécurité des aliments. Mycorhization contrôlée : actualités & limite.

1.3.1. Les endomycorhizes à vésicules et arbuscules (VA)

Elles concernent environ 95% des taxons végétaux à mycorhizes et ce type est non visible à l'œil nu (Sandmann *et al.*, 1990). Les champignons mycorhiziens arbusculaires colonisent environ 80 % des plantes vasculaires terrestres, c'est-à-dire plus de 400 000 espèces. Il existe cependant moins de 200 espèces de champignons endomycorhiziens. Ces champignons ne

sont donc pas très spécifiques dans leurs relations de symbiose (Khasa *et al.*, 1990). Ils sont associés avec les plantes herbacées et ligneuses (aussi appelés mycorhizes à vésicules et arbuscules), tirent leur nom des structures formées à l'intérieur des cellules rappelant un petit arbre (figure 2). Ils sont aussi uniques au point de vue génétique puisque leurs spores possèdent plusieurs noyaux génétiquement différents (Matumoto, 1996).

Les symbiotes fongiques sont classés dans quatre ordres : Archéosporales (Salvioli *et al.*, 2008), Diversisporales (Salvioli *et al.* 2008), Glomerales (Pichot & Roche, 1972) et Paraglomerales (Vallerie, 1980) appartenant à la classe des Glomeromycètes (Trapnell, 1959) et à l'Embranchement des Glomeromycota (Vallerie, 1980). Ils sont distingués par leurs caractères morphologiques et structuraux ou par analyse moléculaire. Le genre *Glomus* est généralement le plus représenté en termes d'espèces dans les sols des agrosystèmes en Afrique de l'Ouest, probablement à cause de sa capacité d'adaptation aux sols dégradés (Bâ *et al.*, 1996 ; Björkman, 1960). Ces champignons sont des symbiotes obligatoires non cultivables en l'absence de la plante hôte (biotrophie). Après la germination de la spore et la formation d'un tube germinatif, l'hyphe qui en résulte entre en contact avec la racine de la plante hôte et différencie un appressorium. À son tour, l'appressorium différencie un hyphe d'infection qui s'insinue entre les cellules épidermiques et corticales de la racine où des structures d'échange (arbuscules) et de réserve (vésicules) se développent (figure 2). Néanmoins, la formation de vésicules n'est pas observée chez tous les groupes développant ce type de symbiose. Des spores sont également différenciées dans le sol et dans les racines, et sont utilisées comme structure de référence pour l'identification morpho-anatomique des espèces. Ce sont des structures unicellulaires, de forme généralement globoïde, à paroi épaisse formée de plusieurs couches de différentes textures, reliées au réseau filamenteux par un hyphe suspenseur. L'infection par les endomycorhizes ne modifie pas la morphologie globale des racines.

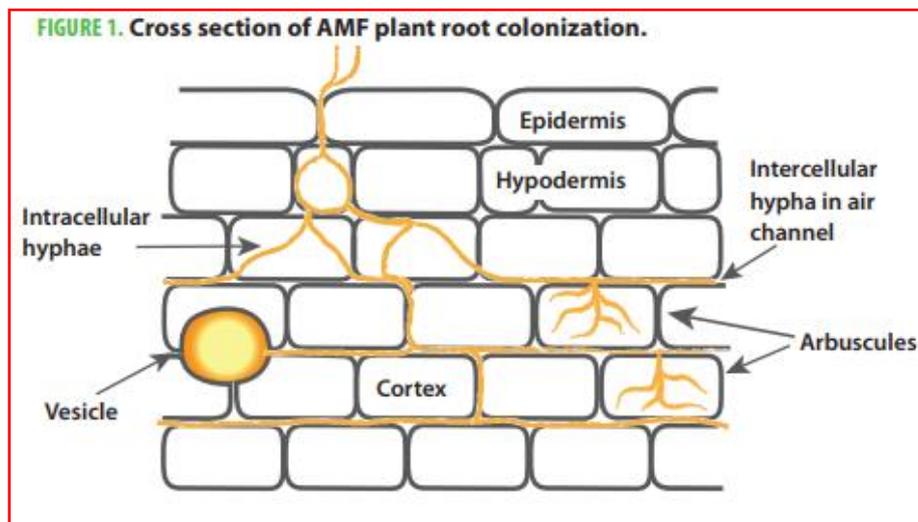
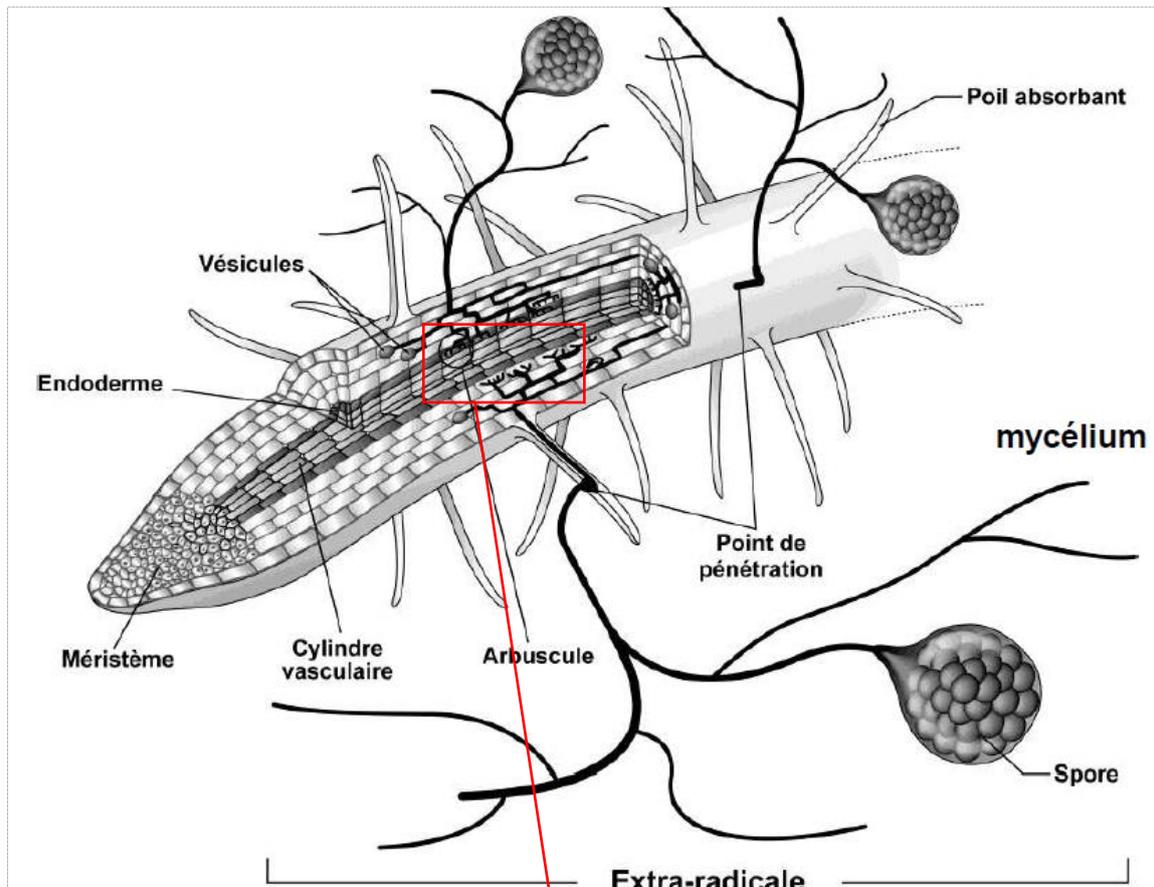


Figure 2: Coupe descriptive d'une racine endomycorhizée

Source : André FORTIN, 2000 (Diner botanique, Université Laval, Canada)

C'est le type mycorhizien le plus largement répandu. Les plantes endomycorhizées peuvent être des végétaux herbacés (par exemple la plupart de nos plantes cultivées : tabac, tomate, blé, maïs.) ou ligneux (Érable, Merisier, Frêne, If). Ces mycorhizes se trouvent aussi chez des Ptéridophytes y compris leurs prothalles (Lycopode) ou même chez certaines Hépatiques.

Dans ce cas, comme le végétal n'a pas de vraies racines et que la structure symbiotique est formée à l'intérieur du thalle, on parle de mycothalle.

Bien que très répandues, ces mycorhizes sont formées par des champignons appartenant à la seule famille des Endogonacées. Les représentants de cette famille ont des hyphes qui ne possèdent pas de cloisons et nous mentionnerons particulièrement les 55-s *Glomus*, *Gigaspora*, *Acaulospora*. L'organisation de l'endomycorhize est bien différente de celle d'une ectomycorhize (figure 3). Le champignon ne forme pas de manchon équivalent d'un manteau et des hyphes isolés pénètrent dans la racine en s'insinuant entre les cellules corticales (Bakshi, 1966). Ces hyphes intercellulaires progressent au niveau de la lamelle moyenne et, surtout, dans les méats où la résistance est moindre. Elles édifient un réseau lâche d'hyphes qui est bien moins structuré qu'un réseau de *Hartig*. Les CMA ne présentent pas de manteau fongique ni de modification morphologique. Le mycélium pénètre entre les cellules du cortex des racines ou franchit les parois de ces cellules en repoussant leur plasmalemme sans le traverser. Ces mycorhizes se caractérisent par la présence constante d'arbuscules intracellulaires qui sont un lieu d'échange entre la plante-hôte et le champignon. Le mycélium intra matriciel est connecté avec un réseau d'hyphes externes dont le développement est souvent considérable (Troupa et Koné, 2003).

À partir de ces hyphes, des ramifications perforent la paroi cellulaire et pénètrent à l'intérieur de la cellule. L'hyphe de pénétration se ramifie un grand nombre de fois pour réaliser une structure rappelant un petit arbre avec un tronc, des grosses branches et des ramifications de plus en plus fines. C'est l'arbuscule, structure caractéristique de ce type de mycorhize

Le grand hyphe intercellulaire a donné naissance à des arbuscules intracellulaires. Certains hyphes se dilatent à leur extrémité pour former d'énormes ampoules inter- ou intracellulaires : Ce sont les vésicules. Dans certains mycorhizes à vésicules et arbuscules et notamment les mycorhizes des végétaux ligneux, les arbuscules sont observés dans les cellules corticales profondes à proximité du cylindre central. Dans les cellules corticales périphériques envahies par le champignon, l'hyphe ne se ramifie pas et s'enroule sur elle-même, formant un peloton. Il a été montré que cette structure est différenciée dans des cellules dégénérantes et qu'elle n'est probablement pas fonctionnelle. La durée de vie d'un arbuscule est relativement brève et est évaluée à quelques dizaines d'heures. Après ce temps, les structures cytoplasmiques du champignon dégèrent et il ne persiste plus que des débris de parois dans la cellule-hôte vivante. Compte tenu du nombre considérable d'espèces endomycorhizées VA, il est évident

que cette structure classique présente des variantes. Ainsi, le réseau intercellulaire peut ne pas se former et le champignon se propage d'une cellule à l'autre en perforant les parois ou bien l'arbuscule peut naître à partir d'un peloton (mycorhizes de certaines Liliacées). Contrairement aux ectomycorhizes, le champignon endomycorhizien ne forme jamais de « chapeau » et les hyphes ne forment pas de manchon autour des racines.

L'avantage de la mycorhization est de permettre à l'arbre (en passant par le réseau d'hyphes du champignon) d'augmenter sa capacité à puiser des ressources minérales en couvrant un très grand territoire, comparativement aux seules racines des végétaux et, en ayant accès à des nutriments inaccessibles aux racines. En fait, les champignons ont besoin de 100 fois de matériel biologique qu'un végétal pour couvrir la même zone d'absorption. De plus, les hyphes accélèrent l'altération des roches, permettant ainsi d'augmenter la disponibilité en minéraux. Ils peuvent s'attaquer aux minéraux insolubles du sol comme le phosphore. Cette dernière action se fait généralement en association avec les bactéries. La figure 3 présente deux coupes (transversale et longitudinale) des racines mycorhizées par les endos et ectomycorhizes.

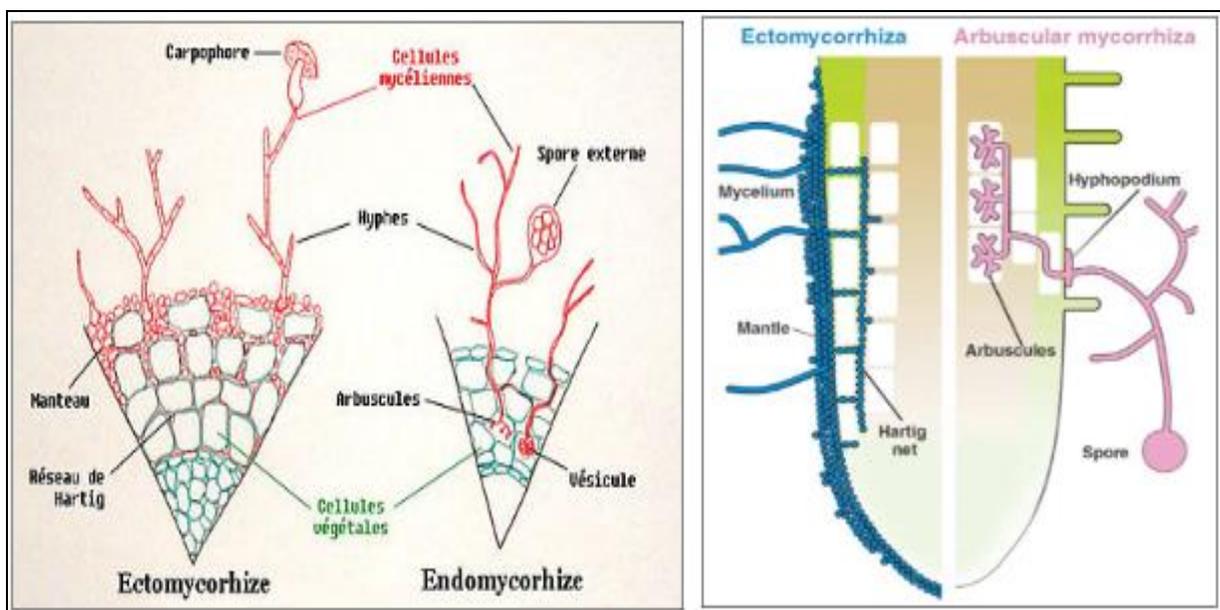


Figure 3 : Symbiose racinaire des endos et ectomycorhizes. (A gauche) une coupe transversale et (à droite), une coupe longitudinale d'une racine mycorhizée.

Source : www.Wikipedia.net, Les champignons mycorhiziens

1.3.2. Les endomycorhizes à pelotons intracellulaires

Chez ce type d'endomycorhizes, les hyphes forment des amas dans les cellules corticales et pénètrent à travers la paroi à l'intérieur des cellules du cortex racinaire (figure 4) en repoussant la membrane plasmique (Matumoto, 1996). Dans ce type de mycorhizes, le champignon pénètre dans les cellules de la racine mais forme très rarement un réseau intercellulaire. L'infection se propage directement d'une cellule à l'autre. Lorsqu'un hyphe pénètre dans une cellule du cortex racinaire, elle s'enroule sur elle-même pour former un peloton comme dans certaines cellules des mycorhizes VA. Toutefois, contrairement au type mycorhizien précédent, c'est le seul type de formation intracellulaire et elles sont établies dans des cellules actives.

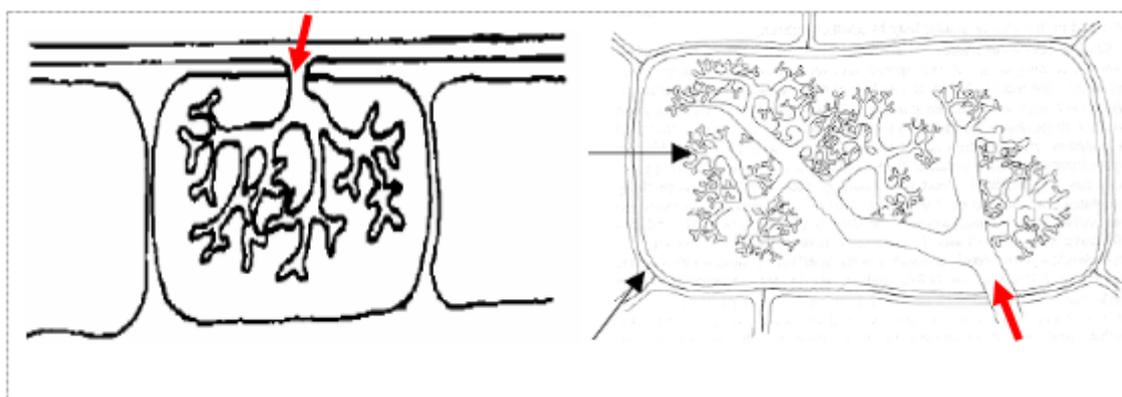


Figure 4: Pénétration de l'hyphe dans la cellule et formation des arbuscules

Source : Morin-Savy S., 2007. Thèse de doctorat. Université de Bretagne Occidentale

1.3.3. Les ectomycorhizes

La symbiose ectomycorhizienne concerne 3 à 5% des plantes vasculaires et se rencontre principalement chez les dicotylédones. Dans ce cas, les partenaires fongiques sont des champignons supérieurs, Basidiomycètes et Ascomycètes, qui peuvent fructifier et une première identification peut être basée sur la morphologie des carpophores. Certains de ces champignons sont cultivables en l'absence de leur plante hôte (Strulu, 1986).

La symbiose ectomycorhizienne entraîne d'importantes modifications dans la morphologie racinaire : les poils absorbants disparaissent et un manteau d'hyphes, appelé « manteau fongique », entoure les racines nourricières. De ce manteau partent des hyphes qui s'insèrent entre les cellules corticales de la racine pour former le « réseau de Hartig ». Vers l'extérieur, des hyphes prolifèrent à partir du manteau fongique et colonisent le milieu environnant en formant le « réseau extra matriciel » (Delwaule *et al.*, 1987). Dans les écosystèmes tropicaux,

au sud du Sahara en particulier, les associations endomycorhiziennes sont majoritaires (Cornet & Diem, 1982) et le type ectomycorhizien se retrouve principalement chez les *Caesalpinioideae*, les *Dipterocarpaceae*, les *Euphorbiaceae*, les *Fabaceae*, les *Proteaceae*, les *Gnetaceae*, les *Sapotaceae*, les *Sarcolaenaceae*, etc. (Thoen, 1993). Des auteurs ont observé que les Acacias sahéliens (*Faidherbia albida*, *Acacia nilotica*, *Acacia raddiana*, *Acacia senegal* et *Acacia seyal*) ne formaient que des associations mycorhiziennes à arbuscules (Barbosa *et al.*, 2012 ; Bâ *et al.*, 1990).

Elles sont nommées « ecto » parce que ce champignon ne pénètre pas dans les cellules de l'hôte. Leur structure est complexe et comprend plusieurs zones. Le champignon forme un manchon dense autour de la racine, c'est le manteau. Puis les hyphes du champignon s'insinuent entre les cellules du cortex racinaire et édifient une sorte de réseau entre les cellules, c'est le réseau de *Hartig*. Ce réseau peut, suivant les partenaires en présence, être très développé et s'étendre jusqu'au cylindre central, ou au contraire rester limité aux premières assises cellulaires. En général, la racine qui héberge le champignon est profondément transformée. Son allongement est réduit et elle présente la morphologie d'une racine courte. Ces mycorhizes sont surtout observés chez les végétaux ligneux. La plupart des arbres de nos forêts, aussi bien feuillus que conifères, sont ectomycorhizés.

L'ectomycorhize naît de la rencontre entre les hyphes d'un champignon mycorhizien et des racines d'un arbre. L'ectomycorhize ne se forme qu'avec des arbres forestiers. Chez les ectomycorhizes, les hyphes s'infiltrant dans les racines de l'arbre, entourant les cellules sans y pénétrer, et forment, au pourtour de la racine, un amas d'hyphes qui s'appelle un manchon (figure 5). Les échanges symbiotiques entre les partenaires se font au niveau intercellulaire. Le manchon fait par les hyphes du champignon joue aussi un rôle protecteur contre des organismes pathogènes. De plus, plusieurs champignons ectomycorhiziens forment les « chapeaux » ou « carpophores » que l'on voit sur les sols et certains d'entre eux sont comestibles.

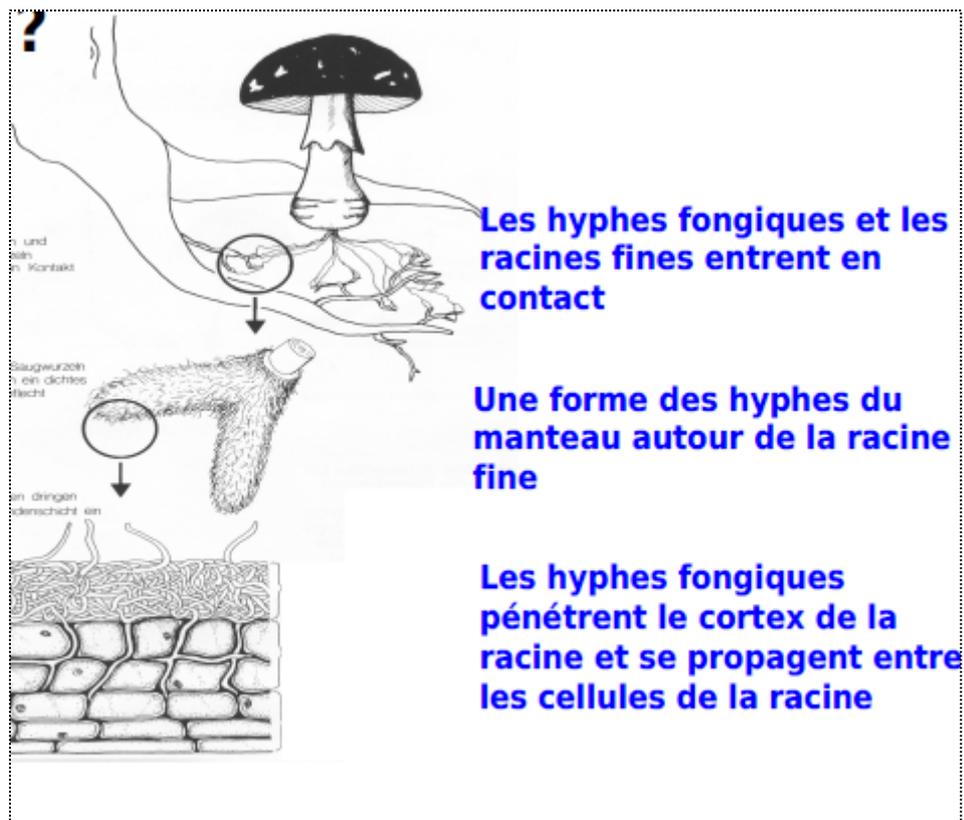


Figure 5 : Symbiose ectomycorhizienne

Source : Dr Jiirgen Kutscheidt, 2016 (Importance des mycorhizes lors de la plantation des grands arbres. Des mycorhizes pour le développement des arbres)

1.3.4. Les ectendomycorhizes

Ce sont des mycorhizes présentant à la fois des structures d'ectomycorhizes et des structures d'endomycorhizes. C'est ainsi que chez l'Éricacée *Arbutus unedo*, le champignon forme un manteau, un réseau de *Hartig* et des pelotons intracellulaires (Münzenberger *et al.*, 1992). Chez les Éricacées, ce type de mycorhizes est qualifié de mycorhizes arbutoïdes.

Parfois, les ectendomycorhizes montrent des organisations beaucoup plus insolites. C'est le cas des mycorhizes monotropoïdes (*Monotropa hypopitys*). Le champignon forme un manteau, un réseau de *Hartig*. À partir des hyphes de la base du manteau ou des hyphes du réseau de *Hartig*, une ramification en forme de coin très aigu perfore la paroi cellulaire et représente la formation endomycorhizienne. Cette formation intracellulaire si particulière est qualifiée par les Anglo-Saxons de "cheville" (peg). L'hyphe ne se ramifie pas, mais la surface de contact avec l'hôte est accrue par le développement très important de digitations pariétales (Dexheimer, 1993). (Björkman, 1960) a montré que, par l'intermédiaire de ces mycorhizes si

particuliers, les monotropes se comportent comme des parasites des racines d'arbres (Dexheimer, 1993).

1.4. Les champignons mycorhiziens dans les agrosystèmes : leur rôle écologique

Le rôle majeur des mycorhizes est le prélèvement et le transport vers la plante des éléments nutritifs très peu mobiles dans le sol, principalement le phosphore (Chen *et al.*, 2007 ; Duponnois *et al.*, 2008). En effet, selon le pH du sol, cet élément se retrouve en grande partie associé au fer, à l'aluminium ou au calcium sous des formes de phosphates difficilement disponibles pour les plantes (Caris *et al.*, 1998 ; Bâ *et al.*, 1987). L'exploration d'un plus grand volume du sol et la possibilité de solubilisation des minéraux primaires par les mycorhizes devraient ainsi permettre une meilleure nutrition phosphatée des plantes (Anino, 1992). Cette amélioration de l'acquisition des nutriments inorganiques par les mycorhizes concerne également N, K, Mg, Na, S, B, Br, Cl, Cu, Cr, Cs, Co, Fe, Mo, Mn, Ni, Si, Zn (Duponnois *et al.*, 2008 ; Burgess *et al.* 1994). Par ailleurs, il a été démontré que les associations mycorhiziennes pouvaient jouer un rôle significatif dans la décomposition et la minéralisation des matières organiques végétales et mobiliser les nutriments au bénéfice de la plante hôte (Singh & Jones, 1976).

(Anderson, 1967) a même pensé que les mycorhizes joueraient un rôle fondamental dans la réduction de la malnutrition humaine du fait que de nombreux nutriments se retrouvaient dans la biomasse des plantes mycorhizées (bio-fortification) et pourraient alimenter l'organisme humain. L'amélioration de la nutrition hydrique des plantes par l'intermédiaire des mycorhizes a aussi été notée *via* ce plus grand volume de sol exploré par les hyphes mycorhiziens (Salvioli *et al.*, 2008 ; Augé, 2004 ; Bâ *et al.* 2002). Des nombreux autres résultats indiquent par ailleurs, un effet bio-protecteur des mycorhizes : une réduction ou même une inhibition de l'effet négatif de certains agents phytoparasitaires (Duponnois *et al.*, 2008 ; Azcon-Aguilar, 2003) et une meilleure survie des plantes mycorhizées sur les sols pollués par les éléments traces métalliques ou par les hydrocarbures aromatiques polycycliques (Tisserant *et al.*, 2012). De même, une nette amélioration de la structure du sol a souvent été notée en présence des mycorhizes. Le vaste réseau d'hyphes extra matriciels et la libération dans le sol par les hyphes mycorhiziens d'une glycoprotéine, la glomaline, entraîneraient une meilleure stabilisation du sol par la formation d'agrégats beaucoup plus stables (Salvioli *et al.*, 2008 ; Bâ *et al.*, 1999).

Les associations mycorhiziennes jouent également un rôle clé dans le fonctionnement et la stabilité des écosystèmes terrestres en intervenant fortement dans les relations plante - plante. En effet, l'existence d'arbres adultes supportant déjà des structures mycorhiziennes a été décrite comme un moyen très efficace dans l'établissement des jeunes plants en favorisant notamment l'infection de ces jeunes plants par les champignons mycorhiziens, donc leur survie (Chilvers, 1972). En outre, les champignons mycorhiziens favorisent la coexistence entre plusieurs espèces végétales, améliorant ainsi la productivité et la biodiversité végétales dans ces écosystèmes (Burgess *et al.*, 1994). Des auteurs ont même parlé d'une translocation de métabolites *via* un pont mycélien créé par le réseau d'hyphes connectant plusieurs plantes de la même espèce et/ou d'espèces différentes (Read, 2011), avec le cas particulier de la myco-hétérotrophie où des plantes non chlorophylliennes (Orchidées, Ericacées) sont nourries par leurs congénères photosynthétiques *via* ce réseau mycélien (Selosse & Le Tacon, 2006). Par ailleurs, les associations mycorhiziennes sont fortement impliquées dans les successions végétales : ainsi, sur certains sols pauvres aussi bien en éléments nutritifs qu'en propagules mycorhiziennes, les espèces végétales dépendant peu de cette symbiose. Par la suite, avec l'enrichissement du sol en structures mycorhiziennes, les espèces plus mycotrophes prennent la relève avec une forte corrélation positive entre la biodiversité fongique et végétale (Gould *et al.*, 1996). En revanche, il faut aussi noter que certaines espèces pionnières très mycotrophes s'installent en début de succession végétale sur des sols dégradés et favorisent par la suite le développement d'autres espèces végétales *via* un effet « plante nurse » (Azcon-Aguilar *et al.*, 2003).

1.5. Les partenaires à la mycorhization, leurs rôles dans la symbiose et la biotrophie chez les CMA

1.5.1. Les partenaires à la mycorhization

1.5.1.1. La plante

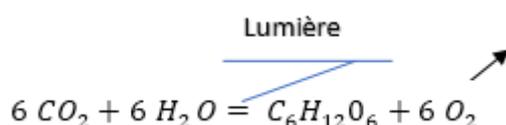
Les plantes font partie du règne végétal et elles se divisent en différentes espèces tout comme les animaux et les champignons.

Comme tout être vivant, les plantes ont besoin d'énergie pour vivre. Pour en obtenir, elles transforment l'énergie lumineuse (provenant de certaines ondes lumineuses du soleil ou d'autres sources lumineuses) en énergie chimique.

L'énergie chimique sera emmagasinée dans les sucres que les plantes forment elles-mêmes grâce au processus de photosynthèse. Plus particulièrement, c'est dans les liaisons unissant tous les atomes des sucres que les plantes emmagasinent leur énergie. Donc, lorsqu'une plante aura besoin d'énergie, elle brisera des liaisons présentes dans les molécules de sucre, ce qui libérera de l'énergie utilisable pour les réactions métaboliques (les réactions chimiques qui permettent la vie). En langue courant, on dit que la plante brûle ses sucres.

La photosynthèse s'effectue à l'intérieur de structures caractéristiques des cellules végétales : les chloroplastes. Ces structures sont présentes dans toutes les cellules végétales, mais on les retrouve en plus grande quantité à l'intérieur des cellules formant les feuilles. Les chloroplastes contiennent un pigment vert essentiel pour la photosynthèse : la chlorophylle ($C_{55}H_{72}O_5N_4Mg$). C'est la chlorophylle qui donne la couleur verte aux feuilles.

La photosynthèse est un processus qui fait en sorte que les végétaux soient capables de transformer l'énergie provenant de la lumière du soleil et le gaz carbonique en sucre et en oxygène. C'est pour cette raison qu'on dit que les végétaux sont autotrophes, c'est-à-dire qu'ils sont capables de synthétiser leur propre énergie (sous forme de sucre, des composés de carbone) à partir de l'énergie lumineuse et du carbone retrouvés dans l'air et dans les minéraux, donc sans avoir à ingérer d'autres organismes vivants. La photosynthèse peut ainsi se résumer par la formulation simple suivante :



Outre la lumière et le CO₂, les plantes ont besoin de nutriments, d'oxygène et de l'eau pour vivre. Les nutriments sont des éléments que l'on retrouve dans le sol et dans l'air et ceux dont ont besoin les végétaux sont catégorisés en macroéléments, microéléments et oligo-éléments selon qu'ils soient ingérés en grande, moyenne et faible quantité par les plantes. Puisque les plantes ont de nombreux besoins en éléments, il est souvent nécessaire d'ajouter des engrais étant donné que le sol n'est pas une ressource inépuisable de ces substances. Les engrais sont des produits minéraux ou organiques incorporés au sol afin d'améliorer la fertilité, c'est-à-dire conserver ou augmenter les éléments essentiels à la croissance des organismes végétaux. Cela peut se faire en ajoutant directement des nutriments (engrais minéraux), en ajoutant des substances organiques qui en se décomposant vont libérer des éléments minéraux ou encore, en utilisant des organismes capables d'aller chercher les nutriments à des endroits inaccessibles par les plantes. C'est ce dernier rôle que s'attribue le champignon mycorhizien.

1.5.1.2. Le champignon

Les champignons ne sont pas tous mycorhiziens. De fait, certains ne forment pas de symbiose avec les plantes, on parle alors de champignons saprophytes ou pathogènes, selon qu'ils se nourrissent des cellules végétales mortes ou vivantes. Tout comme ces autres champignons, les champignons mycorhiziens ont une forme dite mycélienne, constituée d'un réseau d'hyphes qui ressemble en fait à un amas de filaments. Ces hyphes leur permettent de parcourir des distances beaucoup plus longues que les racines des plantes, ce qui leur donne accès à des nutriments inaccessibles par les plantes.

Il existe sept ou huit groupes de champignons mycorhiziens, chacun étant caractérisé par un type de mycorhize bien particulier. Les mycorhizes les plus communs sont celles qui colonisent le grand nombre de plantes. Ce sont les ectomycorhizes (mycorhizes externes) et les endomycorhizes (mycorhizes internes).

1.5.1.3. L'organisation fine des interfaces

Pour les informaticiens, une interface définit une frontière entre deux systèmes ou deux unités permettant des échanges d'information. Cette définition peut s'appliquer quasiment sans modification aux interfaces des symbioses mycorhiziennes. En effet, une mycorhize résulte de l'association de deux organismes présentant des zones de contact plus ou moins développées et cette interface constitue un site privilégié pour les échanges entre les deux partenaires. Il apparaît donc comme particulièrement important, pour comprendre le fonctionnement d'un

mycorhize, de bien connaître l'organisation fine des interfaces. Avant d'aborder l'analyse de la structure fine des interfaces, il est indispensable de rappeler l'organisation de base des cellules des végétaux vasculaires et des cellules fongiques.

Dans toute cellule, le cytoplasme et le noyau constituent la partie vivante de la cellule, c'est le symplasme. À l'extérieur, le cytoplasme est limité par une membrane continue, la membrane plasmique ou plasmalemm. Chez les végétaux vasculaires et la plupart des champignons, la cellule est entourée d'une paroi rigide, c'est l'apoplasme. La cellulose est un des composants majeurs, mais il s'y ajoute ou s'y substitue des polymères divers : substances pectiques, hémicelluloses, et chez les champignons, chitine et callose. Chez les végétaux vasculaires, la paroi primaire présente une structure relativement simple et homogène. Au contraire, chez les champignons, la paroi est formée des plusieurs couches.

1.5.1.4. Le fonctionnement des symbioses mycorhiziennes

L'interaction entre les champignons MA et les plantes est extrêmement ancienne puisqu'elle date d'environ 450 millions d'années, moment de l'apparition des premières plantes terrestres. En effet, plusieurs études de fossiles montrent des structures fongiques très semblables à celles typiquement observées chez les champignons MA actuels. Parmi ces fossiles, certains datent du Dévonien inférieur (environ 415 Ma) et montrent notamment des structures ressemblantes à des arbuscules (Remy *et al.*, 1994) et d'autres présentent des spores datent de l'Ordovicien (environ 460 Ma) (Redecker *et al.*, 2000). Il est généralement admis que l'interaction entre les premières plantes primitives et les champignons MA de l'époque a participé à la colonisation du milieu terrestre par les plantes (pour revues voir : (Humphreys *et al.*, 2010 ; Bonfante & Genre, 2008 ; Raven & Edwards, 2001). Encore aujourd'hui, la grande majorité des espèces de plantes terrestres (environ 80 %, y compris chez les mousses et les hépatiques) sont capables d'effectuer une symbiose MA, indiquant un incroyable succès évolutif concernant cette interaction symbiotique. Il existe malgré tout plusieurs familles de plantes incapables de réaliser cette symbiose, dont certaines s'engagent dans d'autres relations symbiotiques et d'autres sont totalement non mycotrophes. En dehors de ces exceptions, les plantes sont donc normalement en interaction avec un champignon MA, la condition non mycorhizée restant inhabituelle (Smith & Smith, 2011).

Les intérêts de la symbiose MA pour les plantes sont nombreux. Tout d'abord, le champignon se développe dans les racines mais aussi au niveau extra-racinaire dans le sol. Le nom de

mycorhizosphère est attribué à la zone explorée par les deux partenaires (Linderman, 1988). Grâce à son réseau mycélien, le volume de sol exploré par le champignon est bien plus grand que celui parcouru par les racines seules. Il peut donc avoir accès à des ressources supplémentaires en eau et en éléments minéraux qui sont transmis ensuite à la plante hôte au niveau des racines. Le principal avantage pour la plante est donc une meilleure nutrition hydrique et minérale en particulier en phosphate (pour revue : Smith & Read, 2008). Les plantes mycorhizées reçoivent du phosphate de la part du champignon et cela se traduit le plus souvent par une augmentation de la biomasse par rapport à des plantes non colonisées (l'effet est d'autant plus net que les plantes sont en conditions de carence phosphatée), ceci s'accompagnant parfois de teneurs internes en phosphate supérieures chez les plantes mycorhizées. De plus, l'état mycorhizé fournit aussi à la plante une meilleure résistance aux stress abiotiques comme le stress hydrique, salin ou la présence de métaux lourds (exemples : Aroca *et al.*, 2007 ; Hildebrandt *et al.*, 2007 ; Al-Karaki, 2000) mais aussi aux stress biotiques. En effet, des plantes mycorhizées sont plus résistantes à certains pathogènes racinaires (Whipps, 2004) mais aussi foliaires (exemples : Campos-Soriano *et al.*, 2011 ; Liu *et al.*, 2007).

L'association symbiotique entre les champignons MA et les plantes est dite mutualiste, c'est-à-dire que les deux partenaires tirent profit de l'interaction. Les champignons MA (biotrophes obligatoires) reçoivent de la plante des éléments carbonés issus de la photosynthèse. L'interaction représente donc un coût pour le partenaire végétal.

La part de photosynthétats transférée au champignon est non négligeable puisqu'elle peut atteindre jusqu'à 20 % du carbone fixé lors de la photosynthèse, soit environ 5 milliards de tonnes de carbone par an (Bago *et al.*, 2000). Les différents stades de développement de l'interaction Il existe tout d'abord une phase dite a-symbiotique sans contact ni échange entre les deux partenaires (Figure 6). Dans des conditions favorables, les spores peuvent germer spontanément et produire un tube germinatif et quelques ramifications primaires sans même avoir besoin de puiser dans leurs réserves lipidiques (Bécard *et al.*, 2004).

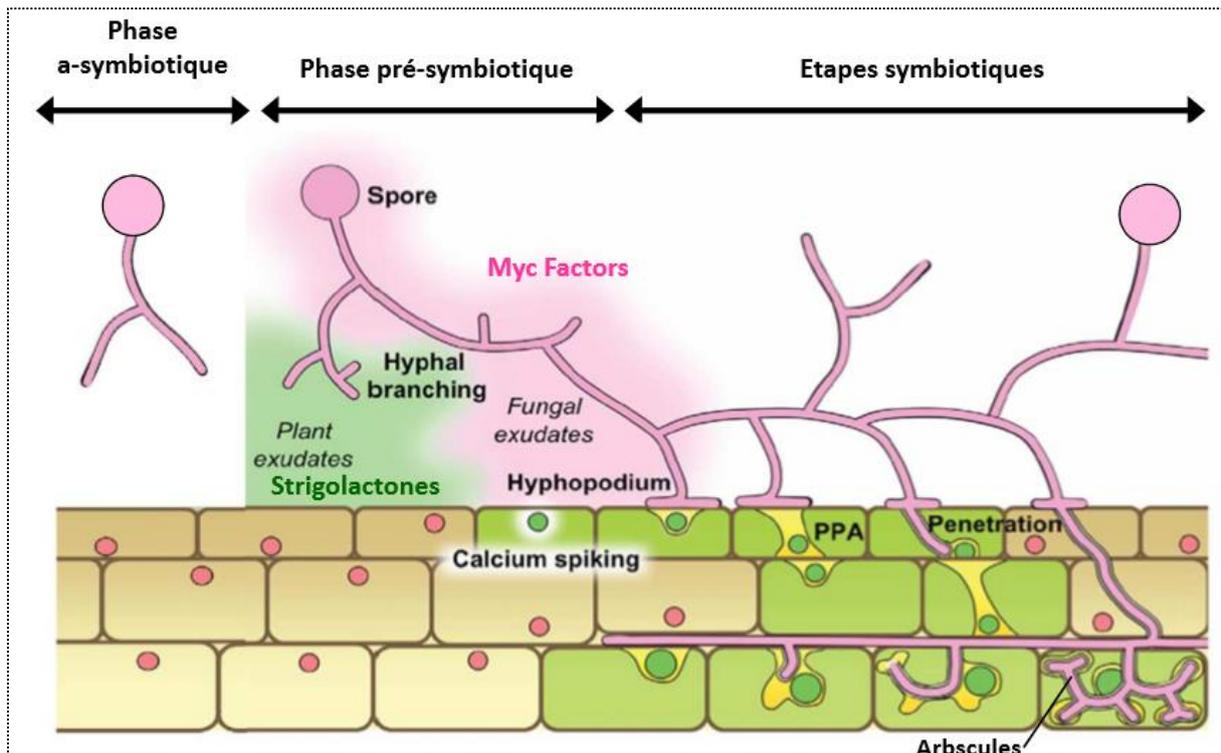


Figure 6: Schéma des différentes étapes de colonisation des champignons MA (adapté d'après Bonfante & Genre 2010)

Source : Morin-Savy S., 2007. Thèse de doctorat. Université de Bretagne Occidentale

La phase a-symbiotique : le champignon germe et forme quelques ramifications sans l'aide ou la présence du partenaire végétal.

La phase pré-symbiotique : échanges de signaux diffusibles sans contact direct entre les deux partenaires. La plante sécrète des exsudats perçus par le champignon, induisant sa ramification et son activité métabolique. Le champignon produit lui aussi des signaux perçus par les cellules racinaires, induisant des variations de teneurs en calcium dans le cytoplasme et les noyaux, ainsi que l'activation de gènes végétaux.

La phase symbiotique : le champignon forme un hyphopode à la surface de l'épiderme, la plante met en place un appareil de pré-pénétration (PPA) pour guider le développement du champignon à travers les différentes couches de cellules jusqu'aux cellules du cortex interne où sont mis en place les arbuscules et où ont lieu les échanges.

Ensuite le champignon peut finir son cycle de développement et former une nouvelle génération de spores.

Lorsqu'aucun partenaire végétal n'est à proximité, selon les espèces fongiques, les hyphes germinatifs peuvent alors s'enkyster et le cytoplasme peut se rétracter dans la spore initiale. Ils peuvent aussi sporuler en formant des spores plus petites (Hildebrandt *et al.*, 2002). Dans tous les cas, l'essentiel des réserves énergétiques des spores initiales est conservé. De

nouvelles germinations peuvent alors être observées, augmentant ainsi les chances du champignon de rencontrer une racine (Bécard *et al.*, 2004).

Avant même le premier contact entre les deux partenaires, se déroule un échange de signaux diffusibles produits par chacun des partenaires. Cette phase est dite pré symbiotique. Les plantes produisent des exsudats racinaires capables d'activer l'activité métabolique et une ramification intense des hyphes du champignon. Les champignons sécrètent eux aussi des signaux diffusibles induisant notamment dans les cellules végétales des variations de concentration en calcium dans le cytosol et le noyau, la régulation transcriptionnelle de gènes et la ramification des racines. La nature et l'importance de ces signaux symbiotiques seront abordées ultérieurement dans une partie spécifique. La germination des spores se fait de façon asynchrone, l'ensemble des étapes qui suivent sont donc elles aussi non synchronisées à l'échelle de la plante. Viennent ensuite les étapes symbiotiques à proprement parler :

- Le champignon forme un hyphopode au contact de l'épiderme. Ce dernier représente le point d'accroche du champignon à la racine et son futur point de pénétration.
- Dans la cellule épidermique située sous l'hyphopode, un appareil de pré pénétration (PPA) est mis en place qui correspond à un réarrangement polarisé du cytoplasme et du cytosquelette. Il permet la formation d'un pont apoplasmique endocellulaire à travers lequel le champignon va se développer pour traverser les différentes couches cellulaires jusqu'aux cellules corticales (Genre *et al.*, 2008 ; 2005).
- Le champignon pénètre dans les cellules corticales sans en traverser la membrane plasmique et forme des structures hyper-ramifiées appelées arbuscules. Les arbuscules sont entourés d'une membrane plasmique péri-arbusculaire séparant le champignon du cytoplasme végétal. C'est au niveau des arbuscules qu'ont lieu les échanges carbone phosphate/azote entre le champignon et la plante grâce à des transporteurs spécifiques. Les arbuscules ont une durée de vie limitée (en moyenne 8,5 jours). Ils atteignent une taille maximale dans la cellule puis rentrent en sénescence et le champignon peut être complètement éliminé de la cellule végétale qui revient à son état initial (Javot *et al.*, 2007a). Une cellule peut ainsi accueillir plusieurs arbuscules successifs. De plus, un grand nombre d'espèces de champignons MA comme *Rhizophagus irregularis* (synonyme *Glomus irregulare*) produisent des structures de réserves lipidiques à l'intérieur des racines au niveau dans les cellules ou au niveau de l'apoplaste, ce sont des vésicules (Smith & Read, 2008).

Parallèlement à son développement intra-racinaire, un mycélium se développe à l'extérieur de la racine capable de prélever des minéraux et de l'eau dans des zones de sol (Heike *et al.*, 2012)

1.5.1.5. Rôle des mycorhizes dans la nutrition organo- minérale des végétaux

Le système racinaire des arbres à mycorhizes présente une morphologie particulière très hiérarchisée : des racines longues plus ou moins ramifiées s'allongent par des apex en croissance continue (bouts blancs ou mâchon mycorhizien) et portent des racines courtes à croissance limitée à quelques millimètres qui seules sont le siège de la symbiose ectomycorhizienne (Hogberg, 1986).

L'eau et les minéraux sont essentiellement absorbés au niveau des « bouts blancs » et des racines courtes mycorhizées ou non. Comme les ectomycorhizes sont réparties tout le long des racines longues et sont beaucoup plus nombreuses que les Bouts Blancs (Frazer & Bramley, 2004). L'explication est naturellement que l'eau et les minéraux transitent par le champignon. Ceci explique déjà en partie pourquoi la symbiose mycorhizienne joue un rôle-clé dans l'alimentation des arbres (spécifiquement les ectomycorhizes) (Frazer & Bramley, 2004).

Le champignon n'est pas réduit au seul manteau et à ses extensions intercellulaires dans le cortex de la racine. Il en émane de nombreux filaments (les hyphes mycéliens) qui explorent le sol à grande distance de la racine (de quelques centimètres à plusieurs décimètres selon le sol, l'espèce de champignon et l'état physiologique du couple symbiotique). Le champignon symbiotique, incapable de photosynthèse, reçoit de l'arbre le carbone nécessaire à sa croissance sous forme de sucres et vitamines. En échange, le champignon absorbe les éléments minéraux et les transfère à la plante-hôte (Thoen, 1993 ; Mousain, 1989).

La symbiose peut donc s'interpréter en termes de bilan, et il est prévisible que le bénéfice qu'en retire la plante pour sa croissance sera d'autant plus grand que le champignon détourne moins de sucres ou que les « services » qu'il procure en retour (éléments minéraux, eau, protection contre les pathogènes, etc.) seront importants par rapport à la quantité de carbone consommée (Mousain, 1989).

Les mycorhizes stimulent généralement la croissance des plantes-hôtes, en particulier dans des sols où la disponibilité en éléments minéraux est faible (Bolan, 1991 ; Mousain, 1989).

L'association symbiotique mycorhizienne apparaît comme une stratégie importante développée par les arbres afin d'assurer leur survie et leur croissance (Akinnifesi *et al.*, 2001 ; Harley et Smith, 1983).

1.5.2. La nutrition azotée

L'azote organique peut se trouver principalement sous deux formes : insoluble (les protéines) ou soluble (les peptides et les acides aminés solubles). Dans le cycle de l'azote, les acides aminés issus de la protéolyse vont être utilisés par différents microorganismes du sol pour produire de l'ammonium (ammonification) qui peut être à son tour oxydé par la microflore pour produire le nitrate (nitrification), forme ultime de l'azote minéral. Ces deux sources d'azote minéral vont ensuite être absorbées par les racines, assimilées et incorporées dans des squelettes carbonés produits par la photosynthèse, pour réaliser la synthèse des protéines et bien mettre en évidence le rôle que peuvent jouer les champignons mycorhiziens dans l'utilisation de l'azote minéral par les plantes (Frazer & Bramley, 2004).

Après absorption par les cellules fongiques et/ou racinaires, les deux formes d'azote minéral vont être assimilées par différents systèmes enzymatiques. Le nitrate va être réduit en ammonium et l'ammonium provenant de la réduction du nitrate ou du milieu extérieur va être incorporé à des squelettes carbonés pour produire les acides aminés nécessaires à la synthèse protéique (Alexander, 1983).

Il est clair que le partenaire fongique est capable de mobiliser de l'azote à partir de sources azotées organiques (protéines, peptides, acides aminés) ou minérales (nitrate, ammonium) et qu'il possède généralement tout l'équipement enzymatique nécessaire pour absorber et assimiler l'azote provenant de ces différentes sources qui vont être disponibles soit au niveau du mycélium extra radiculaire, soit au niveau des ectomycorhizes (Palm *et al.*, 1997 ; Mousain, 1989).

Et finalement, l'efficacité d'un partenaire fongique dépendra en grande partie de sa capacité à transférer à sa plante-hôte l'azote qu'il aura préalablement mobilisé, prélevé et/ou assimilé. Cette capacité de transfert est sans aucun doute un des éléments « clés » de la compréhension du fonctionnement symbiotique (Palm *et al.*, 1997 ; Mousain, 1989).

1.5.3. La nutrition phosphatée

Les mycorhizes 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 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. (Hecht *et al.*, 2001 ; Bolan, 1991 ; 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-} et PO_4^{3-}) dont la concentration dans la solution du sol est très faible (un micro molaire = 1 μM). Selon la réaction du sol, en milieu acide, c'est essentiellement la première forme qui est prépondérante (Bondonga *et al.*, 2011).

Les échanges entre les formes solubles et insolubles de phosphore dans le sol sont lents (Harley et Smith, 1983). L'absorption de phosphore par les racines étant plus rapide que la diffusion de phosphore dans le sol, il se forme très rapidement une zone d'épuisement autour de la racine. D'importantes réserves de phosphates, organiques ou minéraux, sont toutefois immobilisées dans le sol (Harley et Smith, 1983)

Parmi elles, les phosphates organiques, représentés par les phosphates d'inositol, les phospholipides, les acides nucléiques et d'autres formes difficilement identifiables, constituent une fraction très importante du phosphore des horizons superficiels du sol (Anderson, 1967). Les phosphates d'inositol représentent parfois plus de 50 % des phosphates organiques du sol (Harley et Smith, 1983). Ces phosphates sont susceptibles d'être dégradés par des phosphatases, enzymes qui catalysent l'hydrolyse de liaisons organiques en libérant de l'orthophosphate.

La carence en phosphore du milieu stimule les activités phosphatases (Mousain, 1989). Elle traduit une adaptation à un environnement limitant en phosphore soluble que l'on rencontre dans la plupart des sols forestiers (Calleja *et al.*, 1980).

L'effet de la carence en phosphore soluble est considérablement plus marqué sur les activités phosphatases des *Mycelia* des champignons ectomycorhiziens que sur celles des racines de leurs plantes-hôtes (Chen *et al.*, 2007).

Le marquage cytochimique des phosphatases montre une localisation essentiellement à la surface externe des filaments (Lachance, 2012 ; Dexheimer *et al.*, 1993). Une variabilité

importante, inter- et intraspécifique, est observée dans le niveau des activités phosphatases des champignons ectomycorhiziens (Matumoto, 1996 ; Mousain, 1989) ; cette variabilité pourrait être mise à profit pour sélectionner des associations mycorhiziennes efficaces dans l'utilisation des phosphates organiques du sol.

En effet, les activités des phosphatases mesurées dans les racines mycorhizées sont très supérieures à celles des racines non infectées (Williamson *et al.*, 2002, Mousain, 1989) au voisinage de la racine par l'excrétion d'enzymes (phosphatases) dégradant les phosphates organiques, ou par la mise en œuvre de divers mécanismes modifiant les conditions physico-chimiques de la rhizosphère (excrétion de H^+ ou HCO_3^- , et d'acides ou d'anions organiques ayant des propriétés complexantes, etc.) et la présence d'une microflore synergique, solubilisatrice de phosphates minéraux (Matumoto, 1996).

L'augmentation de l'orthophosphate absorbé par les racines mycorhizées, qui résulte principalement de l'accroissement du volume de sol exploré par ces systèmes et de la translocation du phosphore du sol vers la racine *via* le réseau mycélien extra matriciel, ainsi que de la présence de transporteurs d'orthophosphate est plus efficace dans les racines mycorhizées que dans les racines non infectées (Mousain, 1989).

L'acidification du milieu augmente la disponibilité en ortho phosphate de la rhizosphère ; elle favorise le passage du phosphore sous la forme H_3PO_4 ; Cette forme semble être plus facilement absorbée par les champignons que la forme HPO_4 (Bondonga *et al.*, 2011).

La signification écologique des activités phosphatases des champignons mycorhiziens ne peut toutefois être réellement établie que dans la mesure où elles s'exercent vis-à-vis de phosphates organiques réellement présents dans les sols forestiers (Garbaye, 1987).

La solubilisation des phosphates minéraux complexes résulterait des actions chimiques exercées dans la rhizosphère par les champignons mycorhiziens et les plantes-hôtes par excrétion de H^+ ou de HCO_3^- (Mousain, 1989). Ces polyphosphates constituent une réserve de phosphore mobilisable dans le manteau des ectomycorhizes (Harley et Cready, 1981).

1.5.4. La nutrition hydrique

Chez toutes les plantes vasculaires terrestres, l'eau nécessaire aux processus vitaux est puisée dans le sol par les racines et la plus grande partie est évaporée (transpirée) dans l'atmosphère à

travers les stomates des feuilles après avoir transité par les vaisseaux ligneux des racines, du tronc et des branches sous forme de sève brute. Une très faible proportion seulement de cette eau est incorporée à la biomasse ou redistribuée dans les différents organes de l'arbre sous forme de sève élaborée (Plassard *et al.*, 2000 ; Mousain, 1989).

L'arbre fonctionne donc grossièrement comme une mèche conduisant l'eau du sol vers l'atmosphère, la force motrice du flux étant la différence de potentiel de l'eau entre le sol (positif) et l'atmosphère (très fortement négatif).

La disponibilité de l'eau est le premier facteur de l'environnement qui limite la production forestière. Or, les associations mycorhiziennes, qui impliquent des modifications profondes des caractéristiques structurales et fonctionnelles des racines, sont *à priori* susceptibles de modifier l'efficacité d'acquisition et d'utilisation de l'eau par les plantes (Harley et Smith, 1983).

Les champignons mycorhiziens, intimement associés aux tissus du végétal au niveau des racines, contribuent indirectement à cette régulation en modifiant la nutrition minérale de l'arbre et/ou son équilibre hormonal (Matumoto, 1996).

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 permettra indirectement à la plante de mieux gérer l'eau (Bondonga *et al.*, 2011).

La symbiose contribue donc, à partir des racines, à déterminer les concentrations en régulateurs hydriques dans la plante entière, jusqu'aux feuilles qui sont le siège de la régulation stomatique. Dans beaucoup d'expériences, on remarque d'ailleurs que la fertilisation phosphatée a le même effet que le recours aux endophytes pour améliorer le comportement hydrique de jeunes plants (Megueni *et al.*, 2011 ; Mousain, 1993).

Le but de ce point est de comprendre comment la symbiose mycorhizienne influence l'utilisation de l'eau par les plantes et les conséquences sur la conservation et la gestion des sols. Cependant, lorsque l'eau est facilement disponible dans le sol, que la demande transpiratoire existe et que les apex et les ectomycorhizes sont temporairement inactifs.

En fait, il a été démontré que l'ajout des champignons permet de diminuer les apports d'engrais chimiques de 15 à 25 % (Khasa, 1990). Ces engrais sont nuisibles à la biodiversité des sols (certains détruisent les mycorhizes) et en l'occurrence, à la diversité végétale surtout lorsqu'ils sont mal gérés. De plus, cette réduction fait baisser les coûts relatifs aux entretiens des champs et à l'exploitation des sols et ce, pour des meilleurs rendements. Les champignons mycorhiziens sont aussi utilisés pour restaurer des sols perturbés, car ils protègent les racines contre la sécheresse et fournissent des nutriments et de l'eau aux plantes, même dans des sols très pauvres comme les sables bitumeux exploités pour le pétrole. L'utilisation de champignons mycorhiziens permet également de réduire l'utilisation de pesticides, car leur présence protège les racines contre les organismes pathogènes. A long terme, leur utilisation réduit les divers coûts associés à l'enrichissement des sols destinés à la culture. Ainsi, ces champignons sont une excellente alternative aux produits chimiques, autant dans les pays en voie de développement que dans les pays industrialisés.

1.6. Intérêt de mycorhizes dans la lutte biologique

En conditions naturelles, la très grande majorité des végétaux, y compris les plantes vivrières, vivent en association symbiotique avec des champignons mycorhiziens qui, non seulement, approvisionnent leurs hôtes en eau et en éléments minéraux, mais assurent une protection des racines contre les champignons pathogènes (Read, 2011).

Le premier symptôme d'une maladie des racines est souvent une perte de vigueur suivie d'une chlorose. Ces premiers symptômes peuvent être suivis de flétrissement puis de la mort. Les attaques de racines peuvent parfois être sous-estimées en raison du fait que les dommages ne sont visualisés que par les symptômes affectant les parties aériennes. Beaucoup de ces champignons sont opportunistes. Ce sont souvent des composants normaux de la rhizosphère. Ils deviennent pathogènes seulement lorsque la plantation subit un stress : pH élevé, mauvais drainage, basse température, lumière insuffisante, etc. (Read, 2011). Les maladies dues aux pathogènes des racines sont habituellement traitées par la mise en œuvre de pratiques culturales adéquates ou par la désinfection des sols. Les champignons mycorhiziens peuvent protéger les racines par différentes voies (Kluger, 1986).

Le manteau des spores mycorhiziennes agit comme une barrière mécanique contre les pathogènes qui tenteraient de pénétrer dans la racine. De plus, la partie active du manteau agit

aussi comme une barrière physiologique en dégradant les toxines et les enzymes produites par les pathogènes pour dégrader les tissus des racines (Harley et Smith, 1983).

Les champignons mycorhiziens peuvent produire des substances antibiotiques et peuvent agir par compétition contre les pathogènes dans l'utilisation des substances carbonées exsudées par la racine. La plupart des exsudats de la racine doivent passer par le réseau de *Hartig* et le manteau chez les ectomycorhizes (Harley et Smith, 1983).

Les mycorhizes pourraient stimuler le développement d'une microflore protectrice dans la rhizosphère. Après la colonisation des racines par les champignons mycorhiziens, l'hôte peut produire des inhibiteurs contre les pathogènes (Harley et Smith, 1983).

1.7. La biotrophie chez les champignons mycorhiziens

Les champignons MA sont des organismes particuliers pour plusieurs raisons :

i) Ce sont des biotrophes obligatoires : sans l'interaction avec la plante hôte leur fournissant des éléments carbonés, ils ne peuvent accomplir leur cycle de développement (Smith & Read, 2008). Les raisons du caractère obligatoire de la 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).

ii) Les études en laboratoire ne montrent pas de spécificité d'hôte forte : un même champignon peut coloniser de nombreuses espèces végétales. Réciproquement, une plante peut être colonisée par plusieurs espèces de champignons MA (parfois en même temps). Il existe néanmoins des associations préférentielles, ce phénomène étant sans doute plus important dans la nature qu'au laboratoire. Ces préférences pourraient être liées au contenu des exsudats racinaires de différentes espèces végétales (Steinkellner *et al.*, 2007), ou bien aux modes de colonisation différents des champignons (type Arum ou Paris) (Smith & Read, 2008), ou bien encore au caractère plus ou moins mutuel et donc durable de l'interaction entre les partenaires (Kiers *et al.*, 2011).

iii) La génétique de ces champignons reste encore mal comprise. Le degré de ploïdie, le nombre de chromosomes, la ségrégation des noyaux, l'existence ou non de méiose, sont autant de sujets non résolus et faisant parfois l'objet de controverse (Sanders & Croll, 2010).

La reproduction sexuée n'a jamais été observée chez ces champignons, même si les gènes nécessaires semblent présents (Tisserant *et al.*, 2012 ; Corradi & Bonfante, 2012). Les champignons MA semblent ainsi se développer de manière clonale, les hyphes sont cœnocytiqes (sans septa séparant les différents noyaux) et donc multinucléés, les spores contiennent des centaines (voire milliers) de noyaux associés à un grand polymorphisme génétique. La communauté scientifique spécialiste est encore divisée sur la question de la ploïdie et de la caryotie. Les champignons MA pourraient être homocaryotes (noyaux génétiquement identiques) et plutôt polyploïdes, ou être homocaryotes et haploïdes, ou encore hétérocaryotes (noyaux génétiquement différents) et haploïdes (Sanders & Croll, 2010). De plus, les champignons MA ont un pourcentage en bases A-T inhabituellement élevé (environ 70 % chez *R. irregularis*), qui complique le séquençage et l'assemblage du génome, en cours depuis plusieurs années (Martin *et al.*, 2008).

iv) Un aspect important du développement du champignon est que certaines espèces peuvent réaliser des fusions d'hyphes entre individus génétiquement proches, phénomène appelé anastomose. Ce processus permet l'échange de nutriments (Mikkelsen *et al.*, 2008) mais aussi de noyaux (Giovannetti *et al.*, 1999 ; Croll *et al.*, 2009) compliquant encore plus la structure/plasticité génétique de cet organisme.

L'ensemble de ces caractères rendent la production des champignons MA à grande échelle difficile. La mise en place d'un système de culture *in vitro* de champignon sur des racines « hairy-roots » en boîte de Petri (Bécard & Fortin, 1988) permet cependant de produire du champignon en conditions axéniques et d'étudier d'un peu plus près l'interaction. De plus, la transformation génétique stable des champignons MA est pour le moment impossible et les exemples de transformations transitoires restent rares et difficile à mettre en œuvre (Harrison *et al.*, 2002). Ceci limite ainsi souvent les possibilités d'étude du champignon ou de l'interaction. Une meilleure compréhension de la génétique de ces champignons nous permettra peut-être un jour de réaliser de telles approches.

2. Quelques généralités sur le manioc

Le manioc est la sixième culture la plus importante au monde, après le blé, le riz, le maïs, la pomme de terre et l'orge, et constitue l'aliment de base de 800 millions de personnes dans le monde, principalement dans les régions les plus pauvres. Il est cultivé dans près de 100 pays (tous en voie de développement), dont plus de 30 de ces pays sont africains (Djilemo, 2007). Le manioc joue un rôle essentiel pour la sécurité alimentaire, car ses racines tubérisées peuvent se conserver longtemps dans le sol, jusqu'à 36 mois. La culture représente donc une banque alimentaire pour de nombreux ménages qui peut être exploitée lorsque des conditions climatiques défavorables limitent la disponibilité d'autres nourritures. La variété des aliments qui sont fabriqués à partir des racines et les feuilles expliquent les raisons pour lesquelles la culture de manioc se répand dans toutes les régions tropicales du monde (Lebot, 2009).

2.1. Origine et Histoire

Le manioc, espèce du genre *Manihot*, est originaire d'Amérique tropicale, ou toutes ses formes sont spontanées. C'est au milieu du XVI^{ème} siècle qu'il a été introduit en Afrique par les Portugais (Bombily, 1995). Cependant, il semble que ce ne soit qu'à la fin du XIX^{ème} que la culture et la consommation de manioc se soit développée réellement (Silvestre et Arraudeau, 1983).

2.2. Description botanique

Le genre *Manihot* est une phanérogame angiosperme dicotylédone appartenant à la famille des Euphorbiacées, caractérisée, entre autres par la présence d'un latex dans ses différentes parties. C'est en 1776 que *CRANTZ* avait publié pour la première fois une description de l'espèce la plus communément cultivée de nos jours, sous le nom de *Manihot esculenta* *Crantz*.

Le manioc est une plante arbustive pérenne, semi-ligneuse, pouvant atteindre de 1 à 5 mètres de haut. Malgré le fait qu'elle soit pérenne, elle est en général cultivée comme plante annuelle ou bisannuelle (Ministère des Affaires étrangères françaises, 2006 ; Silvestre et Arraudeau, 1983).

2.2.1. Tiges

Les tiges, dont le diamètre peut aller de 2 à 4 cm, sont en grande partie remplies de moelle conférant une certaine fragilité à la plante tant que la lignification n'est pas complète. Ce n'est qu'après une lignification suffisante que les boutures pourront être prélevées sur les plants (Ministère des Affaires étrangères françaises, 2006 ; Silvestre et Arraudeau, 1983).

2.2.2. Racines

En culture, le manioc est multiplié par boutures de tige, les racines sont alors tout d'abord traçantes puis s'enfoncent ensuite dans le sol (Silvestre et Arraudeau, 1983). Le bon enracinement des boutures est primordial. Effectivement, les racines émises doivent assurer les fonctions classiques d'un système racinaire, à savoir l'ancrage du plant dans le sol, l'absorption hydrique et l'alimentation minérale. Elles doivent aussi accumuler dès les premières semaines, et tout au long de la période de croissance les hydrates de carbone élaborés par les parties aériennes, sous la forme de racines amylacées (Ministère des Affaires étrangères françaises, 2006 ; Raffailac, 1992 ; Silvestre et Arraudeau, 1983). Seulement une faible partie des racines fibreuses peut devenir des racines tubéreuses, les autres gardent leurs fonctions d'absorption de nutriments (Lebot, 2009). Les racines sont disposées soit horizontalement, soit de façon oblique dans le sol. Ils sont reliés à la base de la plante par une section ligneuse appelée le « cou ». (Lebot, 2009). Leurs poids peuvent varier entre 1 et 4 kg selon les variétés. Ils peuvent mesurer entre 20 et 60 cm de longueur et 5 à 15 cm de diamètre selon les variétés. D'allure fusiforme, leur surface externe peut être soit rugueuse, soit lisse, et de couleur variant entre le brun et le jaune (Ministère des Affaires étrangères françaises, 2006 ; Silvestre et Arraudeau, 1983). La section interne de la racine est composée de 3 parties (Lebot, 2009 ; Silvestre, 1983) à savoir :

- L'écorce, aussi appelée périderme, qui est la partie la plus externe et qui représente 0,5 à 2,0 % du poids totale de la racine et qui peut être enlevé assez facilement par grattage.
- Juste sous le périderme se situe la couche épluchable, aussi appelée phelloderme. Elle a une épaisseur de 1 à 2 mm, et peut représenter entre 8 et 15% du poids total de la racine. Elle se sépare facilement du cylindre central par arrachage.
- Le cylindre central représentant la majeure partie de la racine est le parenchyme. La chair se compose essentiellement de cellules parenchymateuses, stockant de grandes quantités d'amidon : c'est la partie comestible de la racine.

2.2.3. Feuilles

Les feuilles sont alternes, simples et caduques. Disposées en spirales autour de la tige, elles peuvent avoir entre 1 et 13 lobes, parfois sur une même plante, on parle de polymorphisme foliaire (Ministère des Affaires étrangères françaises, 2006 ; Silvestre et Arraudeau, 1983).

Les feuilles de manioc peuvent être consommées comme légumes, sans subir de transformation avant leur commercialisation (Beltchika, 1989). Ce sont les jeunes pousses qui sont prélevées pour la préparation du plat appelé *pondu* en RDC : Les feuilles sont alors trempées dans l'eau chaude, pressées, puis pilées dans un mortier. De l'huile végétale y est ensuite incorporée. Elles sont riches en protéines, vitamines A et B, et minéraux (Atibu, 2004 ; Latham, 1979;).

2.2.4. Inflorescence

Le manioc est une espèce monoïque produisant donc à la fois des organes mâle et femelle sur la même plante. Les inflorescences sont composées de 20 à 60 fleurs unisexuées et monopérianthées (Ziegler, 2012). L'inflorescence est un racème terminal et se forme en général au point d'insertion des ramifications. Les fleurs femelles, moins nombreuses que les fleurs mâles se situent en général à la base de l'inflorescence alors que les organes mâles se développent plutôt au sommet (Ministère des Affaires étrangères françaises, 2006 ; Silvestre et Arraudeau, 1983). Sur la même inflorescence, les fleurs femelles s'ouvrent 1 semaine à 10 jours avant les fleurs mâles, on parle de protogynie. Ce phénomène a pour avantage de pouvoir favoriser la pollinisation croisée par les insectes.

Les fleurs ne disposent pas de calice mais elles ont une structure de type périanthe composée de cinq sépales jaunes, rougeâtres ou pourpres (Lebot, 2009 ; Ministère des Affaires étrangères françaises, 2006 ; Silvestre et Arraudeau, 1983).

2.2.5. Fruits et graines

Les fruits du manioc sont des capsules déhiscents de diamètre compris entre 1 et 1,5 cm, à trois loges comportant en général chacune une graine. Les graines sont ellipsoïdes, et peuvent mesurer 10 à 12 mm (Ziegler, 2012). Elles possèdent un renflement ou caroncule bien développé, typique de la famille des euphorbiacées (Ministère des Affaires étrangères françaises, 2006 ; Silvestre et Arraudeau, 1983).

3. Multiplication

Dans la quasi-totalité des systèmes de culture de manioc, le mode de propagation est la bouture de tige. En effet, bien que la reproduction sexuée soit tout à fait possible, les graines ne sont utilisées que dans les stations de recherche pour l'amélioration variétale, ceci à cause de leur pouvoir germinatif relativement faible, de l'ordre de 20% à 50 % et de la grande ségrégation des caractères observés dans la descendance d'une même plante (Ministère des Affaires étrangères françaises, 2006). Une même bouture peut donner un nombre variable de tiges, allant de 1 à 3 en fonction du nombre de nœuds initialement présents sur la bouture, ainsi que de la disposition de la bouture par rapport au sol lors de la plantation (Ndonga, 2014 ; Ministère des Affaires étrangères françaises, 2006 ; Silvestre et Arraudeau, 1983).

Le choix des boutures est primordial pour assurer une bonne récolte de racines. Les facteurs dont va dépendre la qualité d'une bouture sont sa dimension et son âge physiologique. Ainsi, les boutures les plus grosses ayant des réserves plus importantes que les petites s'installeront mieux. Du fait du plus grand nombre de nœuds qui les composent, les boutures longues auront une meilleure faculté pour démarrer leur croissance. De plus, il sera préférable de ne pas choisir des rameaux trop jeunes et trop sensibles aux agents pathogènes (Silvestre et Arraudeau, 1983).

4. Exigences écologiques

Le manioc possède la faculté de pouvoir s'adapter dans un nombre très important de situations écologiques. Ainsi, on peut le retrouver entre 30° de latitude Nord et Sud, et dans cette zone, jusqu'à 2 000 m d'altitude malgré que sa croissance y soit ralentie (Silvestre et Arraudeau, 1983).

Les températures annuelles moyennes pour une croissance idéale se situent entre 25°C et 29°C. Sous 10°C, la croissance est stoppée, et elle est très fortement ralentie au-dessus de 40°C (Barampama, 1992).

Malgré que le manioc soit considéré comme une plante tolérante à la sécheresse et de façon à assurer une bonne croissance, une quantité de 500 mm de précipitation et une période de six mois de pluviosité par an sont nécessaires. Des précipitations se situant entre 1 000 et 1 500 mm par an sont généralement satisfaisantes (Silvestre et Arraudeau, 1983).

C'est lors de l'installation des plantes que l'alimentation en eau doit être la plus régulière possible (pluies fréquentes), bien que les besoins en eau à ce moment-là ne soient pas très importants (Silvestre et Arraudeau, 1983).

Tous les types de sol peuvent convenir à la culture de manioc, hormis les sols hydromorphes ou trop sableux. Ainsi, on pourra le trouver aussi bien sur des sols alluvionnaires récents, ferrallitiques ou encore des sols tourbeux. Les sols les plus adaptés sont les sols sablo-argileux profonds, meubles et bien drainés. Un pH compris entre 4 et 7,5 est toléré, mais l'optimum se situe à pH 5,5 (Silvestre et Arraudeau, 1983).

L'association que les racines du manioc peuvent réaliser avec un champignon endomycorhizien du sol lui permet de pouvoir bien se développer sur des sols désaturés et pauvres en phosphore. Cependant, une fertilité trop importante et un excès d'azote peuvent nuire à la tubérisation (Silvestre et Arraudeau, 1983).

5. Le manioc en République Démocratique du Congo

Le manioc est apparu en République Démocratique du Congo au XVI^{ème} siècle après son introduction par les portugais dans leur comptoir de Boma et sur la côte atlantique. La RDC est le pays ayant la plus grande surface cultivée en manioc dans le monde, à savoir, plus de 50% des emblavures totales (FAO, 2009). Il est cultivé dans toutes les provinces du pays avec une production nationale totale de plus de 15 millions de tonnes en 2010.

Néanmoins, c'est en RDC que les rendements sont les plus bas du fait de la pauvreté des sols où il est cultivé, de la faible application d'intrants et tout particulièrement de la dégénérescence génétique et des attaques de viroses (Van Gysel *et al.*, 2010).

Le manioc joue un rôle primordial dans l'alimentation des congolais : il y est consommé, comme dans beaucoup d'autres pays sous de nombreuses formes. Le marché peut être divisé entre 4 secteurs : les feuilles, la chikwangue, la farine ou les cossettes sèches pour le fofou et les racines fraîches consommées cuites ou crues.

En 2009, un congolais consommait en moyenne 29 kg de feuilles, 125 kg de chikwangue, et 150 kg de fofou par habitant (Van Gysel *et al.*, 2010). Il représente un apport glucidique de 70% de l'alimentation pour 95% de la population congolaise (Mukadi et Tollens, 2001). Même si une classe moyenne se développe et consomme progressivement de moins en moins

cette denrée, il semble peu probable qu'elle soit remplacée par un autre aliment aussi riche en glucides (Paul, 2011).

Deuxième partie : Milieu d'étude, matériels et méthodes

Chapitre 1 : Le Milieu d'étude

1.1. Situation géographique des sites

Les essais étaient réalisés dans deux sites de la zone forestière de Kisangani. Le premier dans l'hinterland de la ville de Kisangani sur l'ancienne route conduisant au Territoire de Banalia et dont les coordonnées sont (00°31'58'' N, 025°12' E, Altitude : 455 m) et le second dans le site expérimental de Litoy (00°4 3' N ; 025°15' E, Altitude : 423 m). La figure 7 présente la position de ces deux sites par rapport à la Province de la Tshopo et à la République Démocratique du Congo.



Figure 7 : Sites expérimentaux

Source : Google Mymaps et Outil capture, la carte de Kisangani et Hinterlands

Le Tableau 1 reprend les coordonnées de ces divers sites.

Tableau 1. Les coordonnées géographiques des sites d'échantillonnage et d'installation des essais expérimentaux

Sites	Latitude	Longitude	Type d'activités
Bambaye 4	0°47' E	25°13' N	Prélevement échantillon
Bambaye 3	0°48' E	25°13' N	Prélevement échantillon
Bambaye 2	0°44' E	25°12' N	Prélevement échantillon
Bambaye 1	0°42' E	25°12' N	Prélevement échantillon
Litoy 4	0°42' E	25°14' N	Prélevement échantillon
Litoy 3	0°43' E	25°14' N	Prélevement échantillon
Litoy 2	0°42' E	25°14' N	Prélevement échantillon
Litoy 1	0°42' E	25°14' N	Site d'essai
PK 14 Banalia	0°38' E	25°11' N	Prélevement échantillon
PK 12 Banalia	0°36' E	25°11' N	Prélevement échantillon
PK 12b Banalia	0°36' E	25°11' N	Prélevement échantillon
Hinterlands de Kisangani	0°33' E	25°14' N	Site d'essai
Simisimi 2	0°33' E	25°05' N	Prélevement échantillon
Simisimi 1	0°33' E	25°05' N	Prélevement échantillon

1.2. 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 généralement abondantes durant toute l'année avec des pics de précipitations obtenus au mois d'octobre et novembre et ces pluies baissent d'intensité entre le mois de Janvier et mars et ensuite entre juillet et août (Données des pluies prélevées journalièrement à partir de la lecture sur un pluviomètre à verre). Durant l'expérimentation, les conditions des précipitations journalières pour ces sites sont présentées dans la figure 8. Dans cette figure, il apparaît très clairement que les pluies se réduisent sensiblement durant les périodes précitées.

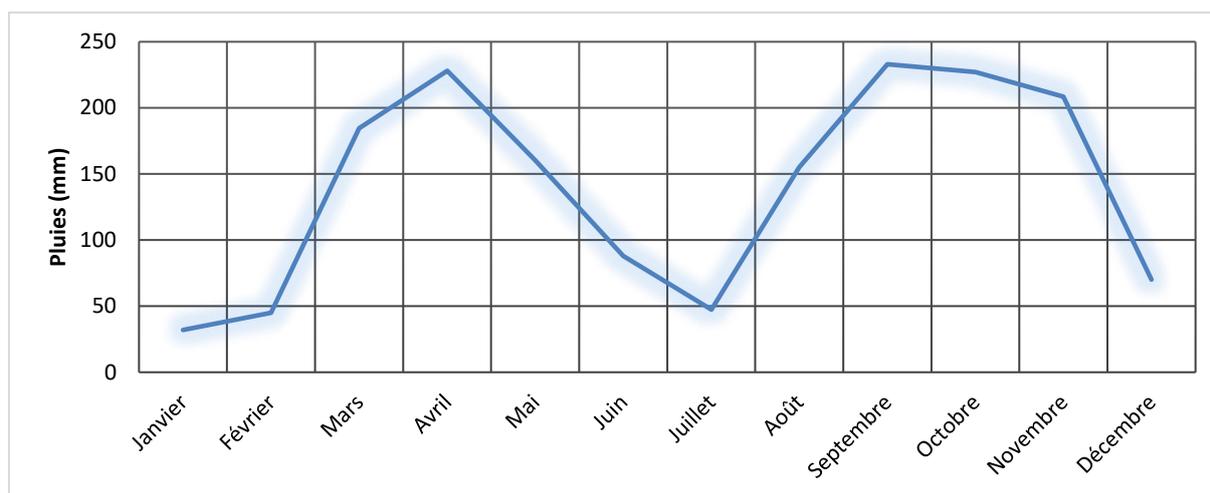


Figure 8: Conditions des précipitations mensuelles durant la période expérimentale

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 Litoï (Données prélevées journalièrement à l'aide d'un thermomètre à lecture digitale). Les conditions d'humidité de l'air ont oscillé autour de 85 % (donnée obtenue journalièrement à l'aide d'un hygromètre du type ordinaire) dans les deux sites. L'expérimentation était conduite durant deux années agricoles du manioc partant de Juillet 2014 à Août 2016.

Les conditions des précipitations moyennes pour les deux sites sont présentées dans la figure 9. 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 Litoï. 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.

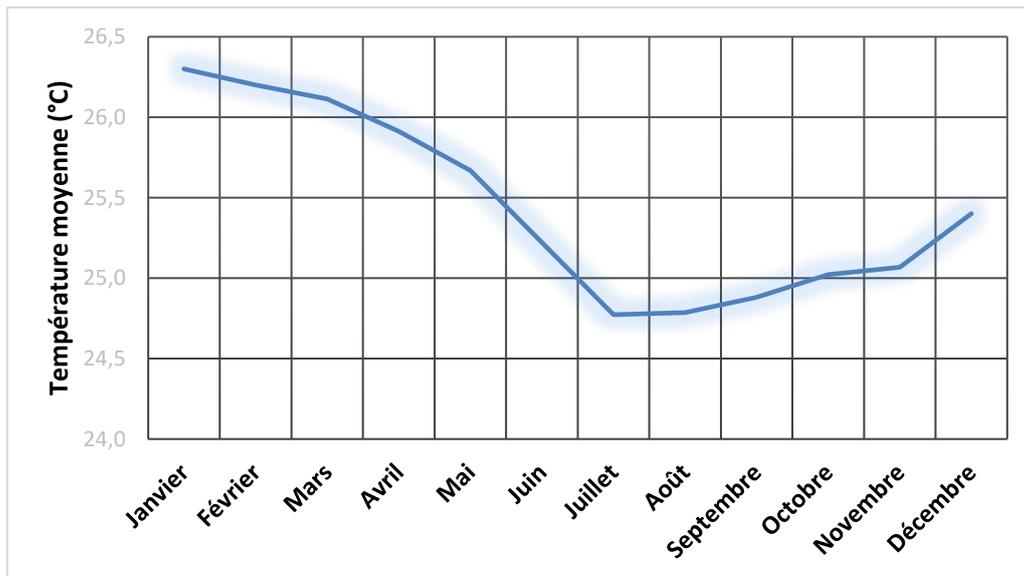


Figure 9: Diagramme ombrothermique des moyennes des sites expérimentaux durant la période expérimentale

1.3. La végétation et le sol

Les essais étaient installés sur des friches herbeuses dominées par les espèces herbeuses telles que *Chromolaena odorata* (L.) R. King & H. Rob., *Panicum maximum* Jacq, *Hypparhenia rufa* (Nees) Stapf, et *Pteridium aquilinum* Kuhn. Dans l'hinterland de Kisangani, l'essai était installé sur un site où le précédent cultural était un champ de manioc. Le champ de l'essai était installé juste à la récolte du champ précédent. 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 sablo-argileux selon la classification USDA (américaine) des sols (Figure 10). Les proportions en sable sont les plus importantes et oscillant 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. Les résultats des analyses de ces sols réalisées au laboratoire de pédologie de la Faculté de gestion des ressources naturelles renouvelables (FGRNR) de l'Université de Kisangani (UNIKIS) sont présentés dans la troisième partie de cette thèse.

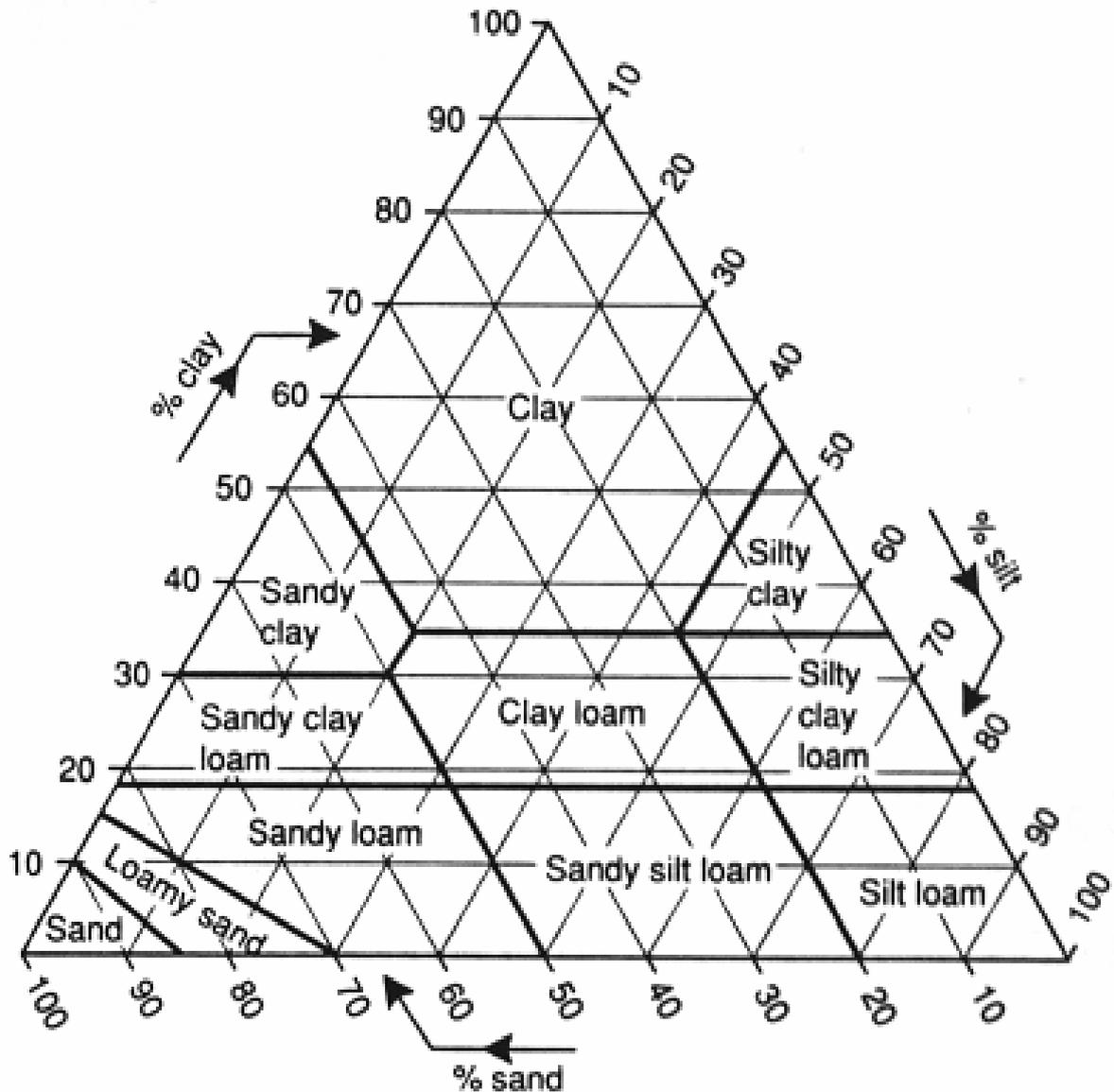


Figure 10: Triangle de classification de la texture du sol de l'USDA sur la base de la taille des grains

Source :

https://www.google.com/search?q=classification+am%C3%A9ricaine+USDA+des+sols&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwi8qtr21azfAhWDqHEKHUMVafAQ_AUIDigB&biw=1536&bih=759#imgsrc=ieGdtzprF-o41M:

Chapitre 2 : Matériels et méthodes

2.2. Echantillons des sols

2.2.1. Prélèvement des échantillons des sols pour inventaire et comptage des spores mycorhiziennes

Le sol était prélevé en prenant soin de ne pas trop le perturber sur des sites identifiés. Les échantillons prélevés étaient conditionnés dans des sachets en plastique et marqués pour des analyses futures de laboratoire. Le choix des sites de prélèvement des échantillons 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 Lito, 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. Des travaux préliminaires ont pu indiquer des prédominances de colonisation des champignons mycorhiziens sous *Chromolaena odorata* et sous *Anana comosus*.

2.2.2. Prélèvement des échantillons des sols sous sorgho pour extraction des spores mycorhiziennes

Ces prélèvements étaient réalisés à la fructification du sorgho. Des mottes de terres étaient prélevées à la main où avec une machette tranchante en prenant toutes les dispositions utiles pour ne pas trop perturber le sol. Ces échantillons étaient prélevés avec les racines du sorgho et étaient conditionnés dans des sachets et marqués au stylo indélébile. Ils étaient ensuite amenés au laboratoire pour un deuxième comptage des spores mycorhiziennes en prenant soin de les classer suivant leur morphologie.

2.2.3. Prélèvement des échantillons des sols au champ avant et après la culture du manioc

A l'aide d'une sonde hémicylindrique, ces échantillons étaient prélevés avant la plantation du manioc à la profondeur de 0-30 cm. Six emplacements de prélèvement suivant la méthode des diagonales avaient servi de constituer un échantillon composite pour les analyses sur les différents éléments du sol, le pH et la granulométrie. A la récolte du manioc, des nouveaux échantillons des sols étaient prélevés dans ces essais suivant les parcelles (traitements). Les

échantillons de répétitions de chaque traitement étaient regroupés pour former un composite par traitement.

Ces échantillons de sols étaient ramenés et ont été séchés à l'air libre sous ombrage.

2.3. Extraction et multiplication *ex-situ* des champignons mycorhiziens

2.3.1. Comptage des spores

Les échantillons de 100 g de terre par échantillon étaient prélevés sur chaque lot et ont, après préparation au laboratoire, étaient observés sous binoculaire optique surmonté d'une caméra et un comptage des spores était réalisé suivant leur morphologie. Pour faciliter le comptage sous microscope, le verre de la boîte de Petri où était placé la suspension contenant les spores mycorhiziennes était carrelé au préalable et ainsi, devait permettre un comptage physique des spores carré par carré.

2.3.2. La multiplication des spores sous Sorgho

La multiplication *ex situ* était réalisée sur une terre stérilisée faite à partir de l'eau bouillante qui était versée sur les planches qui devaient abriter la plante hôte (*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 importante des spores des champignons mycorhiziens (INRA, 2017). Ainsi, des planches de 5 x 1,5 m de dimension étaient constituées et devaient recevoir des terres provenant des différents sites à raison d'une planche pour chaque site d'échantillonnage.

Les planches une fois bien confectionnées, étaient traitées à l'eau bouillante à raison de 100 litres d'eau chaude par planche. Après 24 heures, une couche de bagasse (déchet après succion du jus) de canne à sucre était appliquée sur la planche à raison de 20 kg par planche. Cette bagasse constituée un support énergétique pour les spores avant l'émission des racines par le sorgho.

Deux jours après, la couche de sols contenant les spores d'endophytes étaient déposées et épandues à raison de 30 kg de terre par 7,5 m² sur la planche où la terre avait été désinfectée et où était épandue la bagasse. La culture du sorgho à forte densité (10 x 10 cm) intervint une semaine après désinfection (stérilisation) de la terre et application de la bagasse (figure 11).



Figure 11: Multiplication *ex situ* des spores mycorhiziennes sous sorgho à forte densité

Des précautions étaient prises contre la verse du sorgho. A cause de la forte densité de plantation, la tendance à l'étiollement était prévisible et ainsi les planches de multiplication étaient encadrées des ficelles en nylon pour maintenir le sorgho debout même pendant les intempéries.

2.4. Préparation de l'inoculum et du thé de compost

A la fructification du sorgho dans les planches de multiplication des spores, un deuxième comptage était effectué au laboratoire pour se rassurer du taux de multiplication des spores sous sorgho. Ensuite, les terres infectées par les spores mycorhiziennes vivantes étaient conditionnées sans être perturbées dans des sachets « Ziplock bag » marquées de manière indélébile au stylo marqueur noir. Ces terres étaient apprêtées pour leur inoculation au champ des essais.

Un supplément en thé de compost était apporté au manioc à deux mois après la plantation. Ce thé était préparé quelques heures avant son application au champ. Le principe de préparation consistait à mettre dans l'eau contenue dans un gros ballon hermétique de préparation de thé de compost (environ 200 litres), des terres infectées des spores et des racines fraîches de

sorgho. Un petit apport de la bagasse et des racines fraîches de sorgho accélère la reproduction des spores dans le liquide pendant l'alimentation de l'air dans le récipient à l'aide d'un compresseur ordinaire.

2.5. Inoculation dans les essais

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 lors de la préparation du terrain destiné à l'application des inocula des champignons mycorhiziens arbusculaires. Pour harmoniser les traitements dans les essais, toutes les parcelles n'étaient ni incinérées ni labourées. Le supplément en thé de compost mycorhizien était aspergé 2 mois après la plantation de manioc à raison de 10 litres par parcelle de 60 m² grâce à l'arrosoir ordinaire.

2.6. Analyse des sols

Les analyses des sols concernaient les éléments suivants : le carbone organique total par voie humide, le potassium par photomètre à flamme, l'azote avec la méthode Kjeldahl, le phosphore assimilable par spectrophotomètre, le pH était obtenu à l'aide de pH-mètre tandis que la granulométrie avec des tamis calibrés des différentes mailles.

2.6.1. Le dosage du carbone organique total

La teneur en matière organique totale du sol s'obtient généralement en dosant la teneur en carbone, on estime que le rapport $\frac{\text{Matière organique}}{\text{Carbone}}$ est à peu près constant et égal à

$$\frac{\text{Matière organique (\%)}}{\text{carbone (\%)}} = 1,72$$

Le dosage du carbone peut s'opérer par voie sèche ou combustion en déterminant le gaz carbonique CO₂ provenant de la matière organique, mais également par voie humide, en faisant agir sur le sol dans des conditions bien définies une quantité connue d'un corps oxydant. Leur précision sans être très grande, est suffisante, compte tenu des larges limites dans lesquelles varient les taux de carbone des sols, et des différences que l'on veut mettre en évidence. Le principe décrit ci-dessous est inspiré des travaux de (Anne, 1945).

Principe

Le carbone de la matière organique est oxydé par un mélange de bichromate de potassium et d'acide sulfurique. On admet que l'oxygène consommé est proportionnel au carbone que l'on veut doser. L'excès de bichromate inutilisé dans la fraction est dosé par le sel de Mohr. Une autre possibilité de dosage consiste à effectuer la colorimétrie directe des ions Cr^{3+} bleu vert provenant de la réduction des ions Cr^{6+} .

2.6.2. Dosage du Potassium par photomètre à flamme

Principe¹

Le dosage s'effectue sur l'extrait de sol amendé à 100 cc après prélèvement des aliquotes destinées au dosage de K

Le photomètre comprend :

- Un système d'aspiration et un brûleur type Beaudoin.
- Un ensemble pour chaque élément K, Mg, etc. composé d'un diaphragme réglable et d'un filtre interférentiel Balzers type B 40,

Ces ensembles sont mobiles et on peut passer rapidement d'un élément à un autre

- Une cellule photoélectrique reliée par l'intermédiaire d'un réducteur d'intensité à un galvanomètre dont l'échelle de lecture est de 300 mm
- La flamme est alimentée par le mélange air-acétylène contrôlé au moyen d'un débitmètre. Pour l'air, la graduation va de 0 à 15 litres/minute et pour l'acétylène de 0 à 1,5 litres minute.

Les débits utilisés sont respectivement de 9 et 0,8 litres par minute.

2.6.3. Dosage du phosphore assimilable par spectrophotomètre

Principe²

Le phosphore est extrait par agitation avec une solution d'hydrogénocarbonate de sodium à $\text{pH} = 8,5$. La solution alcaline d'hydrogénocarbonate peut abaisser la concentration des ions

¹ Les méthodes d'analyses utilisées au laboratoire de physico-chimie des sols par F. DUGAIN avec la collaboration de G. ARIAL - P, AUDRY - J. JOUGA, Avril 1961

² Zemoura Abd El Kader, 2005. Etude comparative de quelques méthodes de dosage du phosphore assimilable des sols calcaires en zone semi-aride (W. DE BATNA). Mémoire de Master, Université El Hadj Lakhdar, Batna, Algérie.

calcium par précipitation sous forme de carbonate de calcium et celle des ions aluminiques et ferriques par précipitation sous forme d'hydroxydes. La concentration des ions phosphate augmente en conséquence et le phosphore « assimilable » peut être extrait de l'échantillon de terre par la solution d'hydrogencarbonate de sodium et par filtration.

Cette solution d'extraction a tendance à dissoudre les matières organiques et donne parfois des extraits colorés. Ainsi avant de procéder à la formation du bleu de molybdène, on utilise du charbon activé pour adsorber les matières organiques solubles (le carbone activé doit être exempt de phosphate et n'avoir aucune action sur les ions phosphate).

2.6.4. Dosage de l'azote total (Méthode Kjeldahl)

Principe³

L'échantillon est minéralisé en milieu acide sulfurique en présence de cuivre et d'un catalyseur (sélénium ou mieux oxyde de titane moins dangereux pour l'environnement). Dans les conditions de minéralisation, l'élément azote est retrouvé sous forme ammonium. - Les ions ammonium sont transformés en ammoniac par passage en milieu alcalin. On entraîne NH_3 à la vapeur d'eau et on dose le condensât recueilli par dosage volumétrique acide/base.

Minéralisation de type Kjeldahl à température voisine mais inférieure à 400°C . Les conditions de minéralisation conduisent à :

- 1) L'azote organique et les formes NH_4^+ , NO_2^- et NO_3^- sont retrouvées sous forme NH_4^+ ;
- 2) Le carbone organique est retrouvé sous forme de carbone (noir) puis CO_2 ;
- 3) L'hydrogène et l'oxygène sont combinés en H_2O . Au cours de la minéralisation, l'acide sulfurique se décompose partiellement en dioxyde et trioxyde de soufre (SO_2 et SO_3). Il y a ainsi apparition de vapeurs blanchâtres très irritantes. La minéralisation est donc conduite avec un appareillage à aspiration puis traitement des vapeurs avant rejet.

La minéralisation est conduite en milieu acide sulfurique en présence de catalyseurs (les plus employés sont le sélénium ou le dioxyde de titane sous forme cristalline anatase mélangés à du sulfate de cuivre. Le sélénium est un métal lourd très toxique qu'il convient

³ Norme NF ISO 11261, juin 1995 (dosage de l'azote total du sol) ; - Données aimablement fournies par D. Caquet

aujourd'hui de proscrire. Les milieux sont souvent rendus réducteurs par l'ajout d'acide salicylique et du thiosulfate de sodium.). C'est l'addition de certains sels comme le sulfate de potassium (K_2SO_4) qui permet d'élever la température d'ébullition du milieu de minéralisation.

6.2.5. Détermination du pH du sol⁴

Le pH se définit comme le logarithme négatif de l'activité de l'ion hydrogène ; $pH = -\log_{10} [H^+]$. Il est mesuré à l'aide d'une électrode de verre, dont le potentiel varie en fonction de la concentration des ions hydrogène suivant l'équation de Nernst. Ce potentiel est mesuré par rapport à une électrode de référence à l'aide d'un potentiomètre à haute impédance, communément appelé pH-mètre. Une quantité de sol est mise en suspension dans une même quantité d'eau distillée (10 cm³ de sol/10 ml d'eau). Le mélange est agité avec une tige de verre. On laisse le mélange reposer pendant 30 minutes en prenant soin d'agiter 5 ou 6 fois au cours de cette période, puis on effectue la mesure du pH.

Le pH traduit le degré d'acidité ou d'alcalinité (basicité) de l'eau en contact avec le sol — pH eau. Par ses interactions avec de nombreux processus chimiques et biologiques, le pH conditionne et reflète la disponibilité des éléments dans le sol. Il constitue donc un indicateur utile, en combinaison avec d'autres, pour appréhender la fertilité chimique des sols. Compte-tenu des seuils de pH retenus au niveau de la clé trophique, la mesure du pH pour la détermination des niveaux trophiques doit s'effectuer impérativement à l'aide d'un pH-mètre sur la couche allant de 0-20 cm de profondeur.

2.7. Dosage du Caroténoïde, de la matière sèche et de l'amidon

Les analyses ont été effectuées sur des tissus végétaux frais principalement les racines tubéreuses et ont consisté au dosage de la teneur en caroténoïde totale (TCC) avec *ICheck*, de la matière sèche des racines et des feuilles par étuvage et de l'amidon des racines par gravité spécifique (Fukuda *et al.*, 2006).

2.8. 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

⁴ Les méthodes d'analyses utilisées au laboratoire de physico-chimie des sols par F. DUGAIN avec la collaboration de G. ARIAL - P, AUDRY - J. JOUGA, Avril 1961

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) version 3,21. Certains graphiques étaient réalisés en utilisant l'utilitaire complémentaire des fonctions avancées sur Excel Exe, les fonctions statistiques, mathématiques et trigonométries. La localisation des sites était faite grâce au GPS de marque *Etrex 20*. Le recours à Google Mymaps avait permis de localiser et 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 installé dans le système Microsoft office. 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 à un et deux critères de classification (ANOVA 1 & 2) et le modèle split-plot analysis étaient réalisés prenant en compte les facteurs variétés de manioc (2 variétés dont l'une pourvue en caroténoïde et l'autre avec des faibles teneurs en TCC) et les diverses traitements (9 au total). Les comparaisons multiplées 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 *Loc_Clim 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.

2.9. Prise des données au champ et à la récolte

A l'aide du logiciel '*FieldBook*' préalablement programmé suivant le dispositif expérimental 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 :

$$\textit{Parcelle utile} = \textit{Parcelle totale} - \textit{Les lignes qui bordent la parcelle}$$

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.

Troisième partie : Evaluations des effets des applications des CMA dans le sol et dans le manioc

Chapitre 3 : Restauration de la fertilité des sols dégradés par les cultures successives de manioc à partir des CMA

3.0. Introduction

Plusieurs auteurs accordent aux champignons mycorhiziens arbusculaires un rôle catalytique très contributif dans la modification des propriétés du sol. On leur attribue une bonne absorption du phosphore insoluble (Bâ *et al.*, 2002 ; Alexander, 1983), une bonne mobilisation des éléments du sol entre autres, l'azote, le potassium et beaucoup d'oligo-éléments, une bonne organisation de la structure du sol et une bonne économie en eau dans le sol grâce au recyclage qu'ils opèrent à partir de leurs longs filaments qui puisent très bas dans le sol, l'eau qui échappe à la dessiccation de surface. (Duponnois *et al.*, 2008 ; Bâ *et al.*, 2002)

En plus d'être utile pour la plante et le sol, les CMA jouent un rôle dans divers domaines. L'agriculture et l'horticulture utilisent déjà ces champignons comme fertilisants par le fait qu'ils améliorent la croissance, le rendement, la vigueur, la résistance envers les stress (sécheresse, salinité, chocs de transplantation, maladies) et la capacité d'absorption des éléments nutritifs. Ils jouent ainsi un rôle majeur dans l'agrégation des particules du sol (Caris *et al.*, 1998). Les mycorhizes donc se caractérisent par la présence constante d'arbuscules intracellulaires qui sont un lieu d'échange entre la plante-hôte et le champignon. Le mycélium intra matriciel est connecté avec un réseau d'hyphes externes dont le développement est souvent considérable (Harrison *et al.*, 1995 ; Alexander, 1983).

En sols tropicaux, la pédogénèse avec comme produit final l'argile du type kaolinite à faible pouvoir de rétention cationique et la battance des pluies qui lessivent la plupart des éléments nutritifs, créent des conditions qui ne favorisent pas l'efficacité de l'application des fertilisants minéraux. Leur action sur les cultures est mitigée par le fait que les éléments mobiles tels que le nitrate et le potassium sont lixiviés par les grandes pluies d'une part et d'autre part, les éléments moins mobiles (comme le phosphore) sont bloqués par l'abondance des oxydes et des sesquioxydes de fer et d'aluminium caractéristiques de ces régions (Ngongo *et al.*, 2009 ; Akinifesi *et al.*, 2001).

L'insécurité alimentaire est chronique en République Démocratique du Congo. Le manioc y est la première ressource alimentaire et c'est grâce à ses racines qui sont une importante source de calories peu coûteuses pour les populations congolaises, qu'il joue un rôle prépondérant dans la sécurité alimentaire. Aussi, ses feuilles constituent le légume le plus consommé pour la majorité des ménages tant ruraux qu'urbains au pays. Sa culture cependant est soumise à différentes contraintes qui limitent sa productivité entre autres les contraintes édaphiques. Ces contraintes sont d'ordre physique (structure particulière, texture sableuse, faible capacité de rétention d'eau, colloïdes à charges variables), chimique (pH acide, faible capacité d'échange cationique, abondance des sesquioxydes de fer et d'aluminium, toxicité aluminique et manganique) et biologique (faible activité enzymatique due à la pauvreté de la biodiversité microbienne tellurique). A ces désavantages naturels s'ajoutent hélas les mauvaises pratiques culturales comme le labour mécanique (tracteur) sans caractérisation préalable des unités pédologiques types, l'agriculture itinérante sur brûlis réduisant drastiquement la pédofaune et la matière organique du sol.

Il est donc question de vérifier si les CMA sont présents dans les sols de ces zones et s'ils sont à même de restaurer la fertilité des sols dégradés par des cultures successives de manioc. Le manioc serait lui-même réputé comme plante épuisante du sol et semble-t-il que c'est pour cette raison, qu'il serait souvent planté en fin de la rotation. Toutefois, (Kapinga *et al.*, 1995) balayent cette assertion en évoquant les faibles exigences du manioc vis-à-vis de la fertilité du sol et que cela ferait que cette culture tolère d'occuper la position finale dans une rotation classique des cultures. Pour y parvenir, il y a lieu d'inventorier ces CMA dans cette zone de forêt de transition de Kisangani et procéder à une multiplication *in situ* et *ex situ* en vue de produire des inocula et évaluer leur efficacité dans l'amélioration de la fertilité des sols appauvris par des pratiques agricoles inappropriées.

3.1. Matériels et méthodes

3.1.1. Dispositif expérimental

Le dispositif adopté pour cette étude est un bifactoriel 2 x 9 avec split plot de 4 répétitions, l'essai était installé à Litoiy et à Kisangani et 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) comme facteur secondaire. Les caractéristiques de ces deux variétés sont résumées dans le tableau 2.

Tableau 2. 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	Caroténoïde total (mg/g)	Station		Milieu paysan	Maladies	Ravageurs
Liyayi (195/528)	31	21	3 à 4	35-40	20-25	12	Résistance à la mosaïque 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 mosaïque et l'anthracnose et la Stiture brune	Résistant à la plupart des principaux ravageurs du manioc (cochenille farineuse, acarien vert, etc.)

Le deuxième facteur était constitué par (ii) Neuf types de fertilisants (facteur principal) sur chaque variété de manioc donnant ainsi $2 \times 9 = 18$ traitements. Les types de fertilisants apportés au sol 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 en champ ;
- T3 = Application de l'inoculum des Champignons Mycorhiziens Arbusculaires (CMA) ;
- T4 = combinaison NPK + Fumier ;
- T5 = Combinaison NPK + inoculum des CMA ;
- T6 = Combinaison Fumier + inoculum des CMA ;
- T7 = Combinaison Fumier + NPK + Inoculum des CMA ;

- 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 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.

3.1.2. Schémas des dispositifs expérimentaux (figure 12)

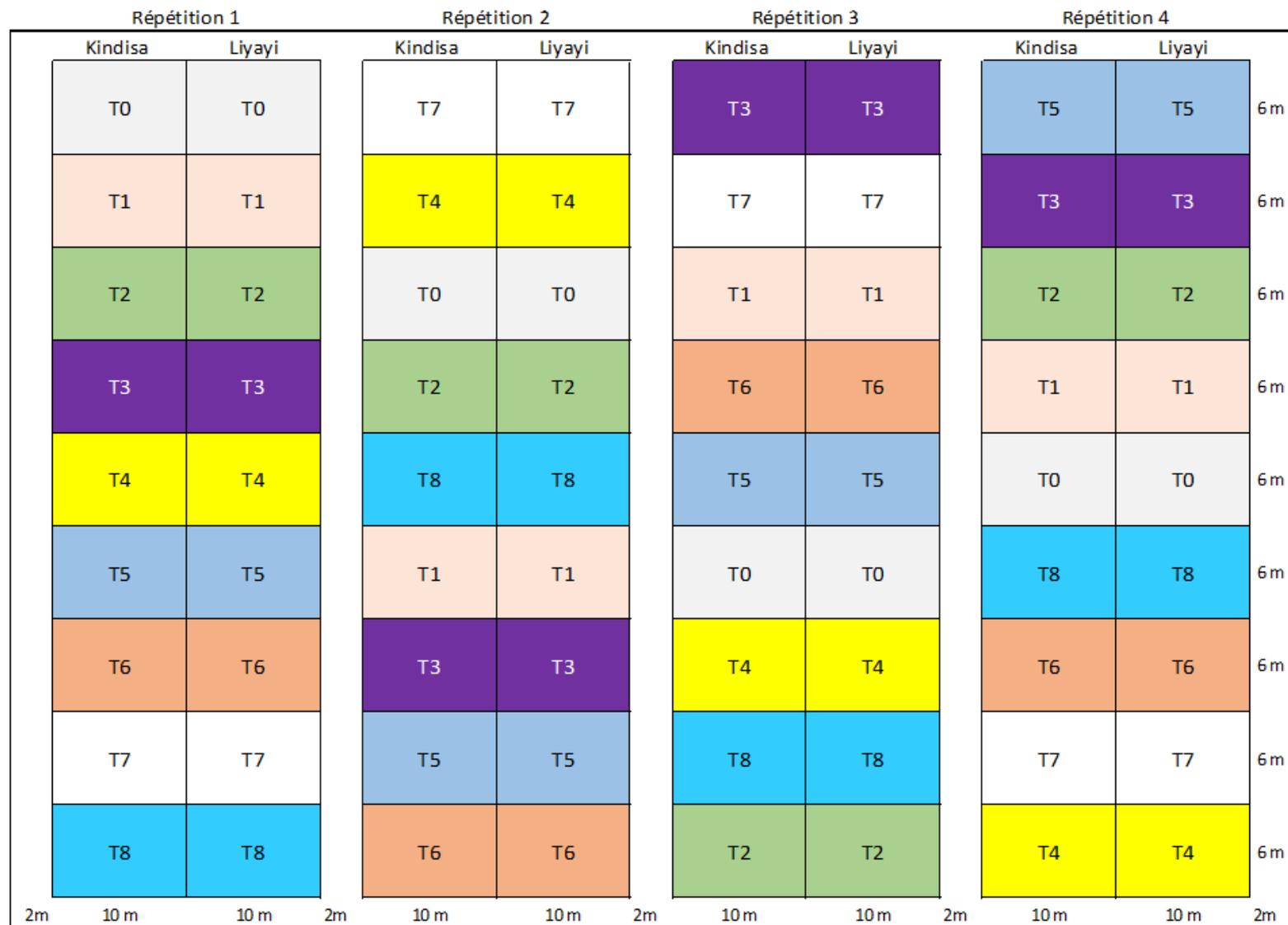


Figure 12: Schéma du dispositif expérimental de l'essai comparant les effets des inocula mycorhiziens

Légende

- T0 = contrôle (sans apport de fertilisant) ;
- T1 = Application de l'engrais NPK à la dose 50-75-50 kg par hectare, 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 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 en champ ;
- T3 = Application de l'inoculum des Champignons Mycorhiziens Arbusculaires (CMA) ;
- T4 = combinaison NPK + Fumier ;
- T5 = Combinaison NPK + inoculum des CMA ;
- T6 = Combinaison Fumier + inoculum des CMA ;
- T7 = Combinaison Fumier + NPK + Inoculum des CMA ;
- T8 = Association manioc + Sorgho.

3.1.3. Comptage des spores, éclaircissement et coloration des mycorhizes

Ce comptage est réalisé au microscope. Les racines sont systématiquement éclaircies et colorées avant toute observation microscopique. La technique d'éclaircissement et de coloration de Phillips et Haymann (1970) est souvent utilisée lorsqu'on a affaire à des endomycorhizes à vésicules et arbuscules. Elle est rapide et fonctionne pour un grand nombre de plantes-hôtes. Les racines sont placées dans des piluliers contenant une solution de KOH à 10%, dans une étuve à 90°C pendant 1 heure. Les racines sont ensuite abondamment rincées sous l'eau courante, égouttées et remises dans les piluliers où elles sont recouvertes avec une solution de bleu trypan à 0,05% dans le lactophénol. Les piluliers sont placés à l'étuve à 90°C pendant 15 minutes. Les racines sont ensuite rincées abondamment et conservées dans de l'eau distillée avant le montage.

a) Montage

On prélève des segments de racines de quelques centimètres seulement choisis au hasard.

Pour la quantification des endomycorhizes, Toth *et al.* (1990) jugent nécessaire l'examen par plant de 40 segments racinaires d'une longueur de 2 à 3 cm. Ces segments sont montés parallèlement par groupes de 10 à 15 dans la glycérine entre lame et lamelle (Kormanik et McGraw, 1982). Les racines restantes sont conservées dans de l'eau ou du glycérol acide.

** Observation*

Les lames sont observées au microscope, chaque fragment étant soigneusement vérifié sur toute sa longueur, aux grossissements de 100 et 400.

b) Paramètres d'évaluation

Plusieurs systèmes de notation sont utilisés pour évaluer l'importance de l'infection mycorhizienne. Le système proposé par Trouvelot *et al.* (1986) a été retenu pour cette étude.

L'importance de la mycorhization est appréhendée à l'aide des paramètres suivants :

- 1) *Le pourcentage de racines mycorhizées* : aussi appelé fréquence de la mycorhization.

$$F (\%) = (\text{nb fragments myco} / \text{nb total}) \times 100$$
 (Marx et al. 1977). C'est le paramètre le plus utilisé.
- 2) *Intensité globale de la mycorhization* :
$$M (\%) = (95n_5 + 70n_4 + 30n_3 + 5n_2 + n_1) / \text{nombre total de fragments.}$$
 Dans cette formule, n_5 représente le nombre de fragments mycorhizés notés 5, n_4 le nombre de fragments notés 4. C'est ce paramètre qui traduit le mieux le degré de mycorhization.
- 3) *Intensité de mycorhization des fragments mycorhizés* :
$$m (\%) = M \times (\text{nb total}) / (\text{nb myco}) = M \times 100/F$$
- 4) *Intensité arbusculaire dans le système racinaire* : Ce paramètre a été apprécié de façon grossière en raison de la difficulté à identifier clairement les arbuscules, les racines étant souvent relativement foncées.

Maintien en collection de souches endomycorhiziennes

Les souches CMA sont maintenues en collection en serre sur des plants de sorgho.

3.1.4. Prises des données à la levée et à la récolte

Le taux de levée était évalué à 2 mois après plantation. Les données de récolte étaient prises du manioc à 12 mois après plantation utilisant le logiciel FieldBook programmé dans une tablette numérique. FieldBook permet de minimiser les erreurs d'inattention lors de la prise des données et de collectionner les plus des données en un temps relativement plus réduit.

Les données prises à la récolte sont : le nombre des racines commercialisables, non commercialisables et poids et leur poids consécutifs, le nombre des pieds récoltés par parcelle, la matière sèche des racines et des feuilles et la teneur en amidon.

Le nombre des racines étaient obtenus par un comptage physique suivant les dimensions des racines. Les racines dont le diamètre du contour au niveau de la médiane est inférieur ou égal à 3cm sont considérées comme non commercialisables à cause de la difficulté d'épluchage de ces petites racines lors du processus de transformation du manioc.

Les poids des racines étaient obtenus par pesage à l'aide d'une balance digitale de 50 kg max. Les racines étaient complètement débarrassées des mottes des terres qui sont capables d'influencer le poids du manioc.

3.1.4.1. Détermination de la teneur en matière sèche et en amidon

a) Par étuvage et par méthode densimétrique

La teneur en matière sèche et en amidon était obtenue par la méthode de gravité spécifique. Cette détermination s'est faite par voie densimétrique qui permet de calculer la gravité spécifique. La méthode consiste donc à prélever et peser simultanément dans l'eau (P_e) et à l'air libre (P_a), un échantillon de racines tubéreuses fraîches de manioc dont le poids varie entre 3000 et 5000 g. La gravité spécifique est calculée comme suit,

$$X = \frac{P_a}{(P_a - P_e)}$$
 Avec X = Poids spécifique, P_a = Poids du manioc à l'air libre et, P_e = Poids de manioc immergé dans l'eau. Cette valeur X est introduite dans les équations ci-dessous respectives pour donner les teneurs en matière sèche et amidon.

$$\text{Matière sèche (\%)} = 112,1 * X - 106,4$$

$$\text{Amidon (\%)} = 158,3 * X - 142$$

La matière sèche était aussi déterminée par étuvage qui consiste à prélever et peser au moins deux échantillons de racines tubéreuses fraîches de poids variant entre 300 et 500 g (P_f). Les échantillons préparés sont placés à l'étuve à une température de 105° C pendant 24 heures et peser jusqu'à poids constant (P_s). La teneur en matière sèche est calculée en utilisant la formule suivante :

$$MS (\%) = \left(\frac{P_s}{P_f} \right) * 100$$
 Avec MS = Matière sèche, P_s = Poids sec après étuvage jusqu'au poids constant et P_f = Poids frais avant étuvage.

b) Détermination de l'amidon

On utilise le résidu de l'analyse des sucres.

Procédure :

- Transférer le résidu d'analyse des sucres dans une ballon jaugé de 100 ml avec 18 ml d'acide perchlorique 52 % ou 15,5 ml d'acide perchlorique 60 %. Diviser l'acide en 3 portions pour bien rincer le tube de centrifugation.

- Laisser pendant 1 à 2 heures
- Diluer l'extrait à 100 ml avec de l'eau distillée
- Filtrer avec un entonnoir fritté en verre
- Pipetter 0,2 ml d'extrait dans un tube à essai et diluer à 2 ml avec de l'eau distillée (ajouter 1,8 ml d'eau distillée).
- Développer la couleur comme dans la détermination des sucres par la méthode de phénol-acide sulfurique

Calcul

- La teneur en sucre est déterminée en référence avec la courbe des standards et en prenant en considération le facteur de dilution et le poids de l'échantillon.
- Exprimer les sucres comme la quantité de glucose

$$\% \text{ Sucres} = \frac{\text{Absorbance} \times \text{Intercept/abscisse}}{100 \times \text{Poids de l'échantillon}}$$

- Pour la détermination de l'amidon, on multiplie la teneur en sucre par 0,9

3.1.4.2. Détermination de la teneur en β -Carotène (Extraction avec l'acétone)

a) Equipements

- Balance de précision (mg)
- Mortier (large) + pilon
- Entonnoir fritté en verre ou Entonnoir Buchner avec papier filtre
- Ampoule à décanter
- Homogénéiseur Polytron
- Aspirateur

b) Réactifs

- Hyflosupercel (celite)
- Acétone
- Ether de pétrole

c) Procédure

- Peser 5 à 15 g d'un échantillon homogène et représentatif du manioc. Le poids de l'échantillon dépend de la teneur en β -carotène de l'échantillon.
- Transférer l'échantillon pesé dans le mortier et y ajouter 3 g d'hyflosupercel
- Broyer le mélange échantillon + hyflosupercel avec 50 ml d'acétone froid (acétone refroidie pendant au moins 2 heures)
- Filtrer, par aspiration, le mélange avec un entonnoir fritté en verre ou un entonnoir Buchner avec papier filtre.
- Rincer le mortier et le pilon avec une petite quantité d'acétone froid.
- Faire passer l'acétone de rinçage à travers l'entonnoir de filtration

3.2. Résultats

3.2.1. Comptage des spores viables

L'essai étant répété durant deux saisons culturales du manioc, les données combinées présentant les moyennes de ces deux saisons sont résumées dans le Tableau 3. Elle présente la densité des spores viables par 100 g de sol.

Tableau 3. Comptage des spores mycorhiziennes avant extraction suivant les échantillons des terres prélevés sous *Chromolaena odorata* dans différents sites autour de Kisangani.

Sites	Spores rondes jaunes	Spores allongées vertes	Spores avec hyphes	Spores en amas	Total spores par 100 g de terre	Nématodes
Simi Simi I	67	0,0	1,0	5,0	73	6,0
Simi Simi II	166	0,0	11,0	0,0	177	10,0
PK 12 Route Banalia	53	0,0	5,0	0,0	58	1,0
Litoy I	65	2,0	4,0	0,0	71	4,0
Litoy II	44	0,0	4,0	3,0	51	4,0
PK 29 Route Ituri	80	0,0	7,0	0,0	87	5,0
Total	475	2	32	8	517	30
Moyenne	79,2	0,3	5,3	1,3	86,2	5,0
LSD.05	22,9	ns	4,4	ns		5,5
CV%	55,95		1,27			11,77

La comparaison des moyennes prises deux à deux indique des différences significatives sur le dénombrement des spores rondes jaunes entre les sites de prélèvement (LSD.05 = 7,9 spores rondes jaunes avec $p < .001$). Le plus grand nombre des spores rondes jaunes est obtenu à Simisimi II avec un record de 166 spores en moyenne dans 100 g d'échantillon de terres. Des

nombre relativement importants des spores rondes jaunes sont aussi obtenus au PK 29 route Ituri (80 spores rondes jaunes dans 100 g de terres) et puis respectivement à Simisimi I (67 spores rondes jaunes) et à Litoy I avec 65 spores par échantillon de terre.

Très peu de spores allongées vertes ont été observées dans l'ensemble de sites et cela autant pour les spores en amas. Par ailleurs, on a observé des spores avec germination des hyphes indiquant leur préparation pour s'introduire dans les méats des racines et y former des arbuscules ou encore de vésicules. L'abondance des spores était inversement proportionnelle à la présence des nématodes. Les sites de Simisimi II qui a indiqué le plus grand nombre de spores mycorhiziennes avait aussi par ailleurs le plus grand nombre de nématodes. Cela s'explique par le fait de la chaîne trophique étant donné que les spores mycorhiziennes émettent des exsudats mycéliens qui détruisent les nématodes des racines (figure 14 à droite) obtenue à partir d'un échantillon des terres prélevé à Litoy. La forte présence des nématodes (proie) ne peut que naturellement occasionner une prolifération des spores mycorhiziennes. La figure 13 indique l'évolution du nombre de spores après multiplication *ex situ* sous sorgho. On sait voir une multiplication importante des spores jaunes rondes et des spores avec hyphes dans la terre sous sorgho provenant de différents sites. Les accroissements sont respectivement de l'ordre de 127 % à Simisimi I, 38 % à Simisimi II, 91 % pour l'échantillon provenant du PK 29 Route Ituri et 35 % à Litoy I pour ce concerne les spores rondes. En comparant les périodes d'avant et après multiplication sous sorgho, ces accroissements sont encore beaucoup plus importants pour les spores avec hyphes où on a obtenu 3000 % pour l'échantillon de terre provenant de Simisimi I, 4 % pour Simisimi II, 400 % pour le PK 29/Ituri et 150 % pour le site de Litoy I.

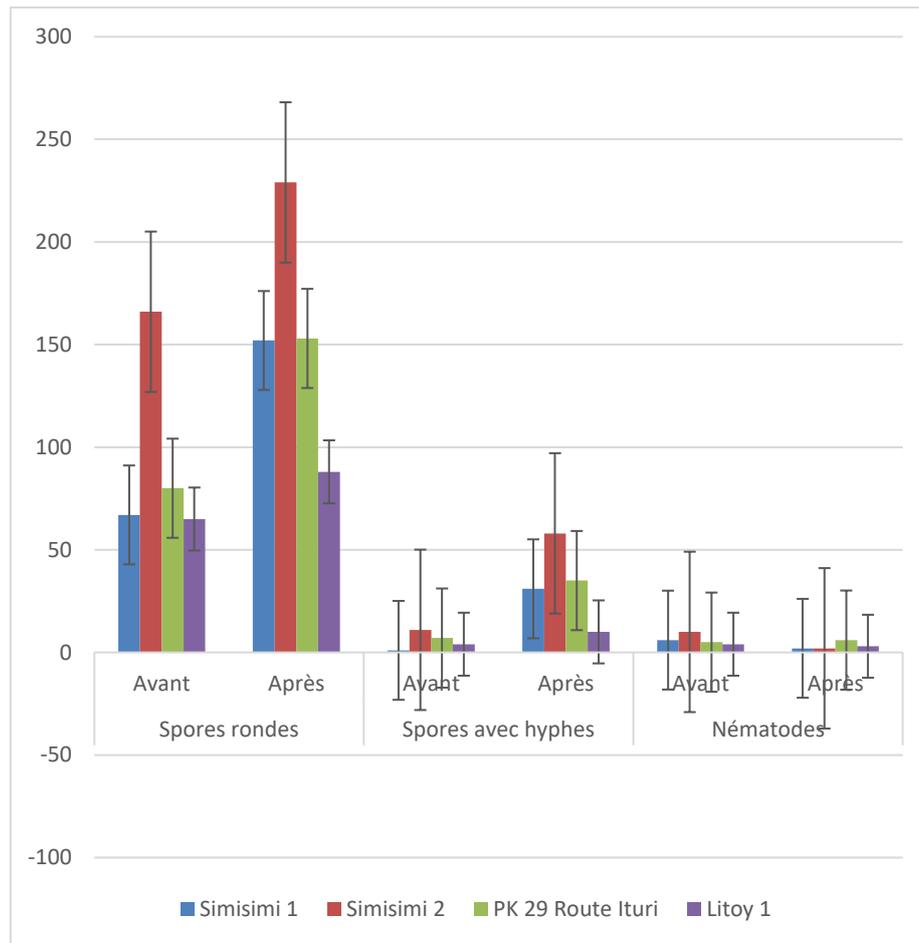


Figure 13: Dénombrement des spores mycorhiziennes avant et après la culture sous sorgho

On a observé une décroissance de la présence des nématodes à Simisimi I avec - 80 % de nématodes, -67 % à Simisimi II et - 20 % à Litoy I. Au PK 29/Ituri, il y a eu une légère augmentation de 25 % du nombre de nématodes après multiplication des spores mycorhiziennes sous sorgho planté à une forte densité. La photo présentée à la figure 14 montre clairement comment la spore développe un exsudat de protection en présence d'un nématode.

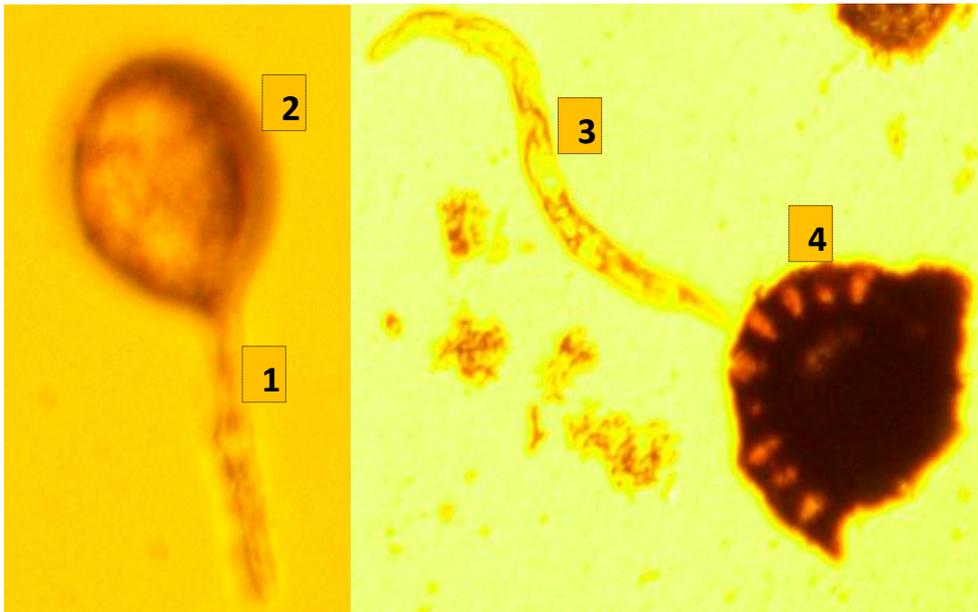


Figure 14 : Spore mycorhizienne développant un hyphe (à gauche) et un nématode à côté d'une spore (à droite)

Légende

1. Hyphe développé par une spore mycorhizienne prêt à pénétrer dans les méats de la jeune racine
2. Spore mycorhizienne vivante
3. Nématode
4. Spore

La population des spores mycorhiziennes était plus grande dans la parcelle où on a appliqué l'inoculum des CMA sans combinaison avec les autres fertilisants. On a obtenu une moyenne numérique de 225 spores/100 g de terres (LSD.05 = 74 spores, CV % = 19,6 %). Ceci indique clairement que la multiplication des spores s'est accentuée en présence des racines de manioc. Aussi, l'inoculum lorsqu'il est soumis à une combinaison avec les autres fertilisants, ces derniers ralentissent et/ou réduisent la colonisation des racines de manioc par les CMA. On a obtenu 114 spores /100 g de terres lorsque l'inoculum des CMA était combiné au fumier, 154 spores/ 100 g de terres lorsque l'inoculum était combiné au NPK et 141 spores/100 g dans la combinaison entre l'inoculum des CMA, le fumier et l'engrais NPK. Ces populations étaient plus faibles dans le contrôle avec 64 spores par 100 g de terres (G 00). Le nombre de spores obtenu dans ces traitements indique clairement qu'il y avait très peu de spores dans le sol. En quelque sorte, on sait comprendre que les apports des CMA sous forme d'inoculum sont indispensables si on veut tirer profit des avantages liés à la fertilisation mycorhizienne (figure 14). Aussi, la présence du phosphore dans le sol occasionne des accroissements relatifs du nombre de spores. Les applications du NPK ont permis d'obtenir un nombre relativement

moins important des spores mycorhiziennes dans le sol avec 100 spores par 100 g lorsqu'on apporte seul l'engrais NPK, 141 spores dans NPK + Fumier + Inoculum des CMA et 154 spores avec NPK + Inoculum CMA. Le nombre de spores est de 91 par 100 g de terres lorsque le fumier est apporté seul et n'est pas différent statistiquement du nombre obtenu dans la parcelle témoin ($LSD.05 = 49$ spores). Les populations des spores se présentent en trois groupes telles que cela peut être visualisé dans le dendrogramme (figure 15). Elles sont plus nombreuses lorsque l'inoculum des CMA est apporté sans être associé à d'autres types de fertilisants (G 0). Le fumier apporté seul, l'engrais minéral (NPK) et l'association de ces types de fertilisants (Fumier + NPK) se retrouvent dans le groupe intermédiaire avec une population moyenne des spores (G1). Le groupe des combinaisons de fertilisants entre autres Fumier + Inoculum, NPK + Inoculum, Fumier + NPK + Inoculum ont présenté un nombre relativement faible des spores (G2).

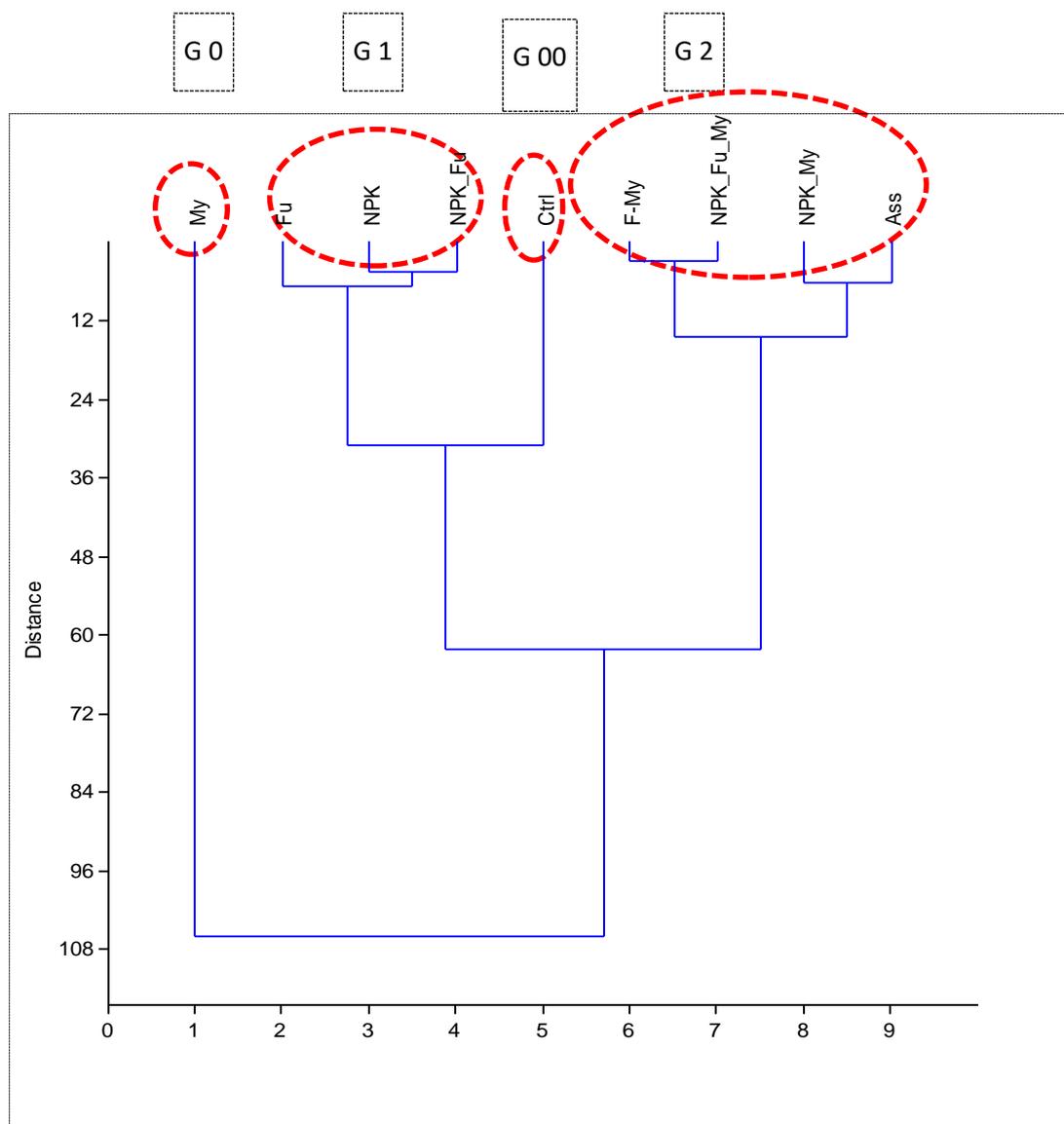


Figure 15: Diagramme des populations des spores mycorhiziennes dans le sol en rapport avec les traitements apportés

3.2.2. Relations entre les variables du sol et du manioc après apport des CMA suivant les sites

3.2.2.1. Site de Kisangani

a) Variété Kindisa

L'analyse des différentes variables du sol et des tissus végétaux vis-à-vis du rendement est réalisée par Analyse de Composantes Principales (PCA) pour la variété de manioc Kindisa à Kisangani (figure 16).

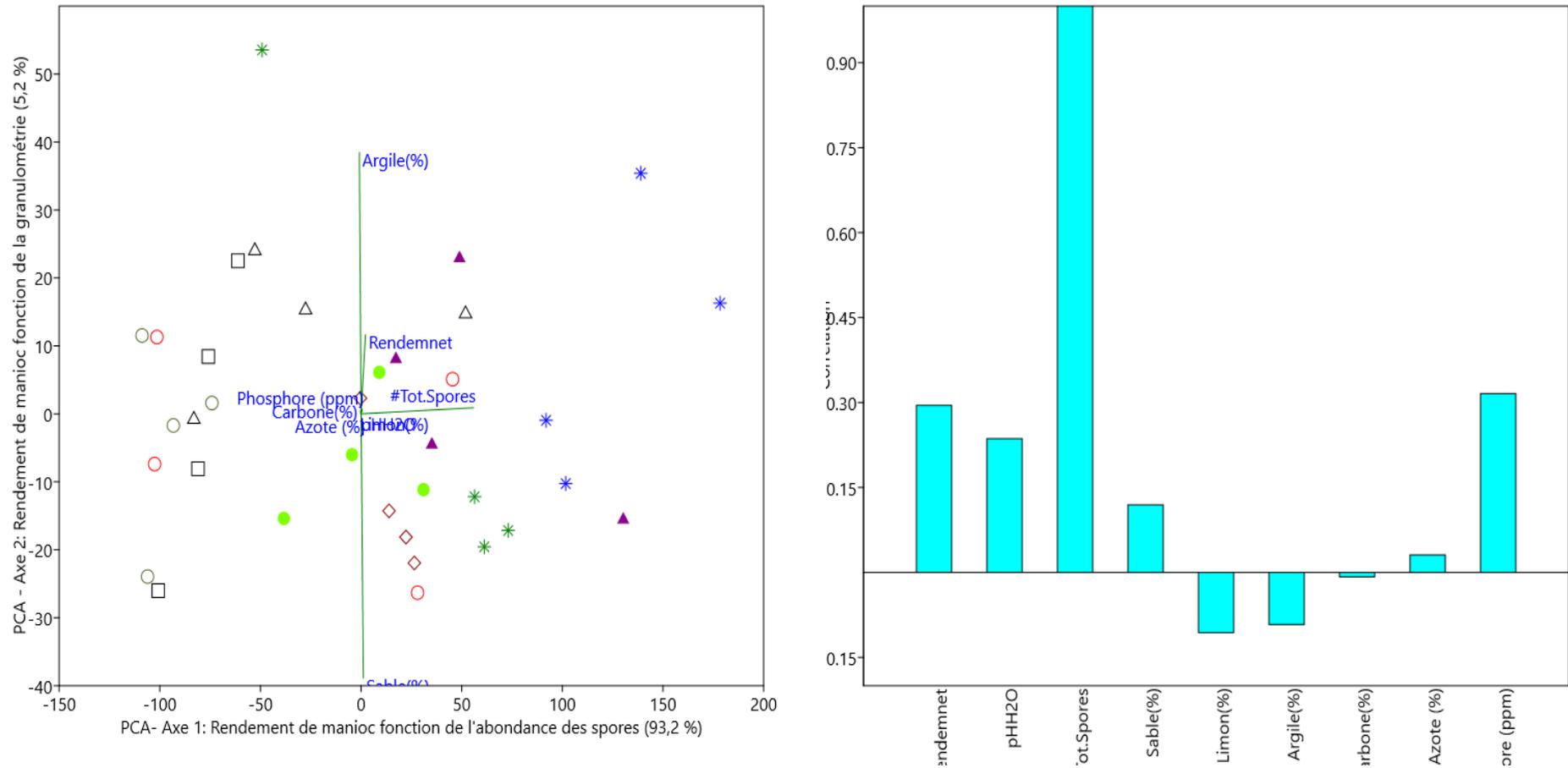


Figure 16: Diagramme d'analyse des variables des sols et des tissus végétaux sur le rendement en racine tubéreuse chez la variété Kindisa à Kisangani

Légende

- : Contrôle
- * : Inoculum de CMA
- △ : Engrais minéral (NPK)
- ▲ : Fumier de ferme + Inoculum de CMA
- : Engrais minéral (NPK) + Fumier de ferme
- : Association manioc + sorgho
- : Fumier de ferme
- ◇ : Engrais minéral (NPK) + Inoculum de CMA
- * : Engrais minéral (NPK) + Inoculum de CMA + Fumier de ferme

En prenant en compte les variables des éléments du sol entre autres le phosphore, l'azote et le potassium, la granulométrie (sable, argile et limon), le pH et la teneur en caroténoïde total, il ressort pour la variété Kindisa dans le site de Kisangani que ces différentes variables influencent significativement le rendement du manioc lorsqu'on apporte l'inoculum de CMA sous manioc (étoile bleue). Les rendements sont aussi relativement bons avec les apports de la combinaison fumier + inoculum des CMA (triangle mauve). Il s'ensuit cependant des contreperformances de rendement lorsque l'engrais NPK est apporté et est combiné à l'inoculum de CMA. L'engrais minéral à cause de son substrat défavorise le bon développement de l'activité mycorhizienne lors de la symbiose avec les racines des plantes.

Il existe une forte corrélation entre le développement des spores dans le sol, l'acidité et le phosphore sur le rendement du manioc. En ce qui concerne la granulométrie, le sable est plus déterminant sur le rendement du manioc. Il rend le sol plus meuble et cela est plus convenable pour le grossissement des racines de manioc dans le sol.

b) La variété Liyayi

Les mêmes tendances observées chez Kindisa ressortent une fois de plus chez Liyayi. L'analyse faite avec PCA sur cette variété (Figure 17) indique ce qui suit :

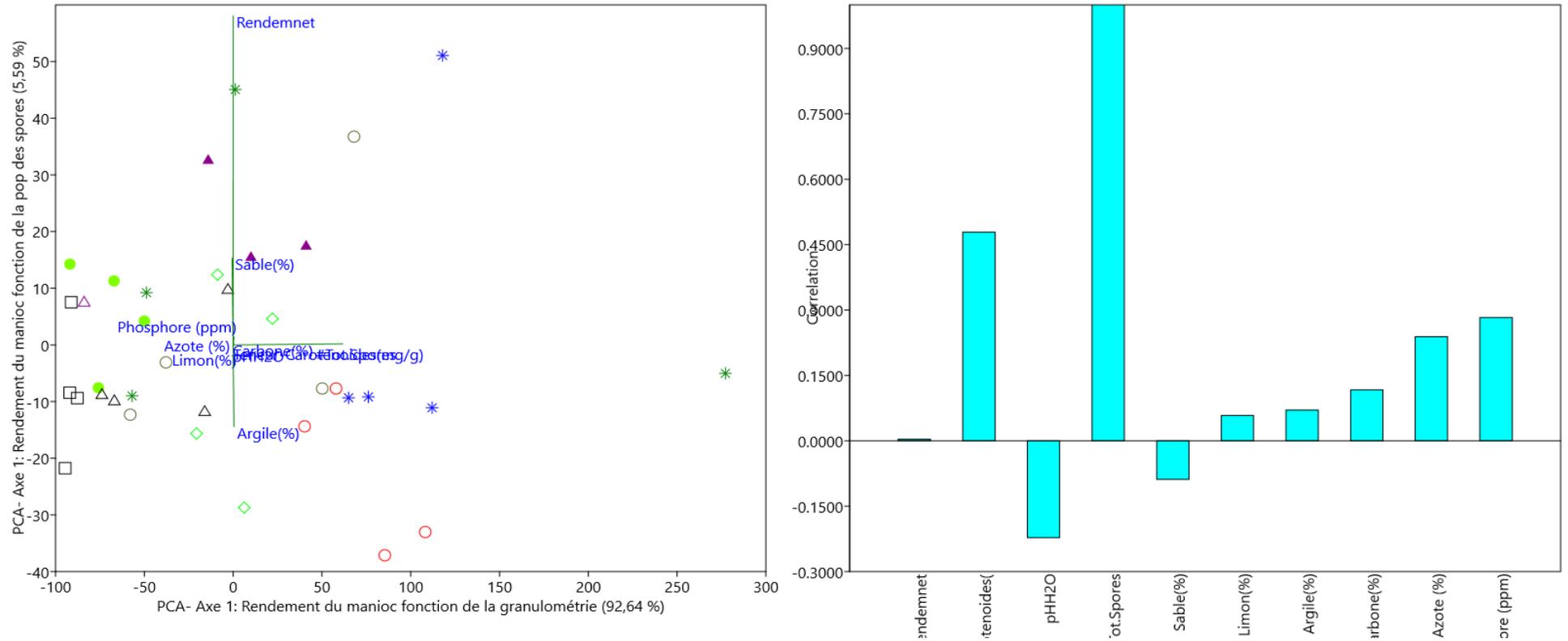


Figure 17 : Diagramme d'analyse des variables des sols et des tissus végétaux sur le rendement en racine tubéreuse chez la variété Kindisa à Kisangani

Légende

- : Contrôle
- * : Inoculum de CMA
- △ : Engrais minéral (NPK)
- ▲ : Fumier de ferme + Inoculum de CMA
- : Engrais minéral (NPK) + Fumier de ferme
- : Association manioc + sorgho
- : Fumier de ferme
- ◇ : Engrais minéral (NPK) + Inoculum de CMA
- * : Engrais minéral (NPK) + Inoculum de CMA + Fumier de ferme

- 1) La combinaison Fumier de ferme + Inoculum de CMA constitue celle qui permet d'accroître le rendement du manioc de manière significative. Les apports de CMA seul ont aussi permis des augmentations du rendement du manioc. Chez Liyayi, des rendements plus faibles sont obtenus lorsque le manioc est associé au sorgho et dans les parcelles témoin.
 - 2) Il existe aussi une corrélation entre l'abondance des CMA dans le sol et la concentration du caroténoïde dans les racines de manioc chez Liyayi. Pour cette raison, on a obtenu des accroissements de la teneur en caroténoïde allant jusqu'à 57 % chez cette variété. Cependant cette performance est rendue plus possible lorsque l'acidité du sol est faible.
 - 3) On note aussi que la présence des éléments minéraux tels que l'azote, le phosphore dans le sol et une bonne photosynthèse (carbone) améliorent le rendement du manioc en racine.
- c) Les deux variétés (Liyayi + Kindisa)

Dans le site de Kisangani, en prenant les deux variétés de manioc pour la corrélation entre les variables du sol et des tissus végétaux, il s'observe ce qui suit à la figure 18 :

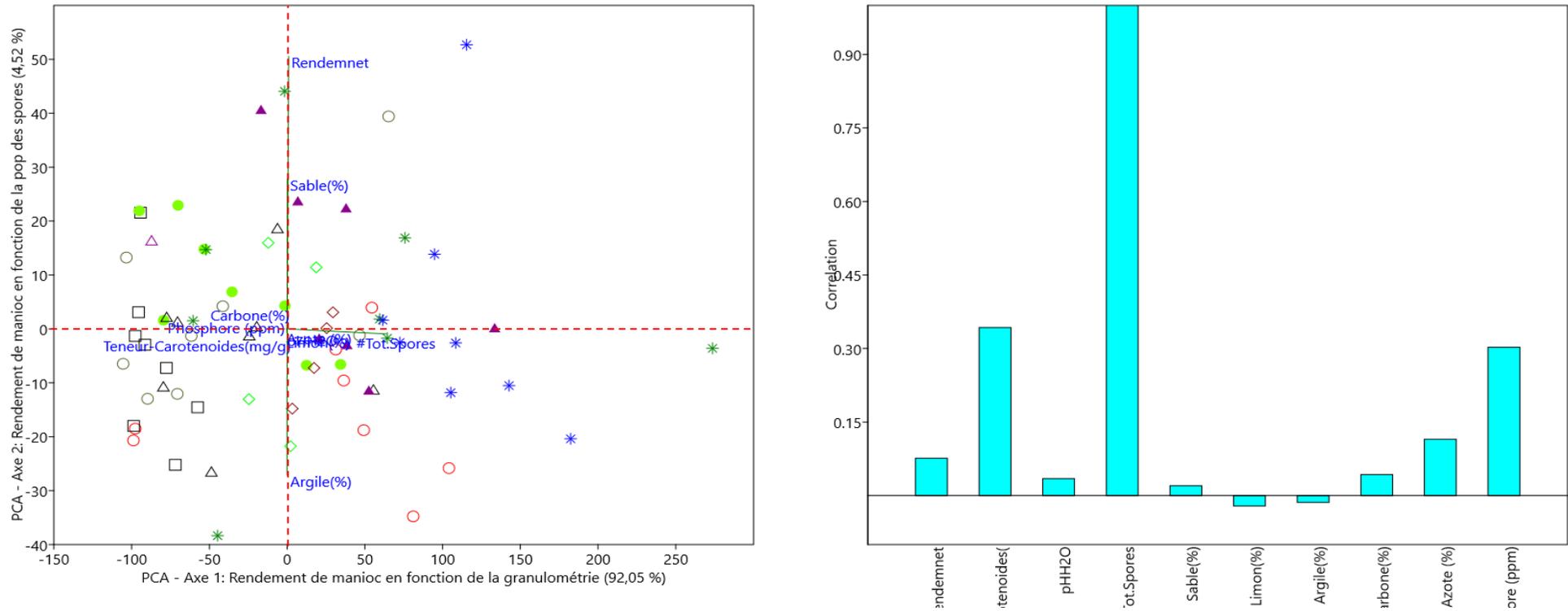


Figure 18: Diagramme d'analyse des variables des sols et des tissus végétaux sur le rendement en racine tubéreuse chez les variétés Kindisa et Liyayi à Kisangani

Légende

- : Contrôle
- * : Inoculum de CMA
- △ : Engrais minéral (NPK)
- ▲ : Fumier de ferme + Inoculum de CMA
- : Engrais minéral (NPK) + Fumier de ferme
- : Association manioc + sorgho
- : Fumier de ferme
- ◇ : Engrais minéral (NPK) + Inoculum de CMA
- * : Engrais minéral (NPK) + Inoculum de CMA + Fumier de ferme

Les apports de l'inoculum indiquent des performances de rendement dans les deux variétés de manioc. En observant les cadrans du PCA, on voit clairement une bonne présence des traitements où il y a eu apport des inocula mycorhiziens et plus particulièrement lorsque l'inoculum était apporté seul ou lorsqu'il était associé au fumier. Les valeurs de rendement sont plus faibles dans les parcelles témoins. Aussi, il ressort que les apports des engrais minéraux n'ont pas donné des réponses favorables sur la production des racines de manioc.

3.2.2.2. Site de Litoy

a) Variété Kindisa

Dans le site de Litoy, la variété Kindisa était soumise aux différents traitements et en établissant les relations entre les différentes variables sur leur influence sur le rendement du manioc (figure 20), on sait observer ce qui suit ;

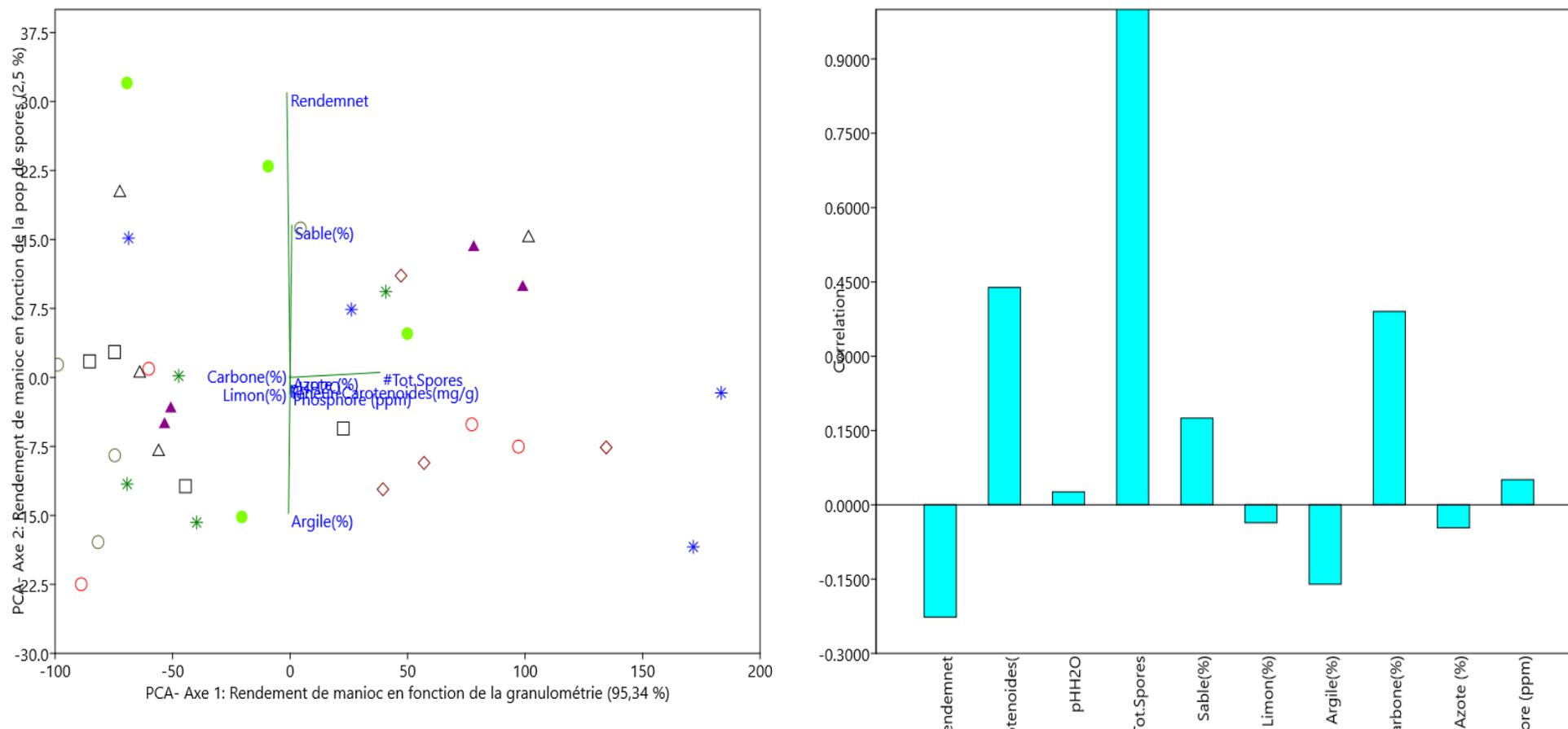


Figure 20: Diagramme d'analyse des variables des sols et des tissus végétaux sur le rendement en racine tubéreuse chez les variétés Kindisa à Lito

Légende

- : Contrôle
- * : Inoculum de CMA
- △ : Engrais minéral (NPK)
- ▲ : Fumier de ferme + Inoculum de CMA
- : Engrais minéral (NPK) + Fumier de ferme
- : Association manioc + sorgho
- : Fumier de ferme
- ◇ : Engrais minéral (NPK) + Inoculum de CMA
- * : Engrais minéral (NPK) + Inoculum de CMA + Fumier de ferme

Les points sont dispersés à tel point qu'aucune tendance ne soit distincte. Il n'existe pas une corrélation entre les variables observées pour ce qui concerne les éléments du sol, la granulométrie, le pH, le nombre de spores, la teneur en bêta-carotène et le rendement chez la variété de manioc Kindisa à Kisangani. Quelques points s'écartent de la médiane notamment pour le traitement inoculum seul, le fumier de ferme, l'engrais NPK et la combinaison Engrais + Fumier + Inoculum de CMA. Les valeurs sont faibles dans le contrôle, dans l'association manioc + sorgho et dans la combinaison engrais minéral (NPK) + Inoculum de CMA.

b) Variété Liyayi

A Lito, la variété de manioc Liyayi a montré des tendances entre les variables observées (figure 21). L'association du manioc au sorgho a indiqué une tendance faible vis-à-vis des variables observées. La fertilisation minérale (NPK) apportée seule n'a pas donné un effet favorable sur le comportement du manioc, sur la mobilisation des éléments du sol, sur le nombre de spores mycorhiziennes présent et sur l'acidité du sol à Lito. Cela était aussi remarquable pour les traitements apport d'inoculum de CMA seul et sur le témoin. C'est lorsque l'inoculum de CMA est combiné au fumier de ferme qu'on observe des améliorations sur le rendement du manioc en racines tubéreuses, sur le pH du sol, sur la concentration du manioc en caroténoïde total dans les racines, sur la granulométrie et sur la composition du sol en azote, phosphore et carbone. Et aussi s'observe une augmentation du nombre de spores vivantes.

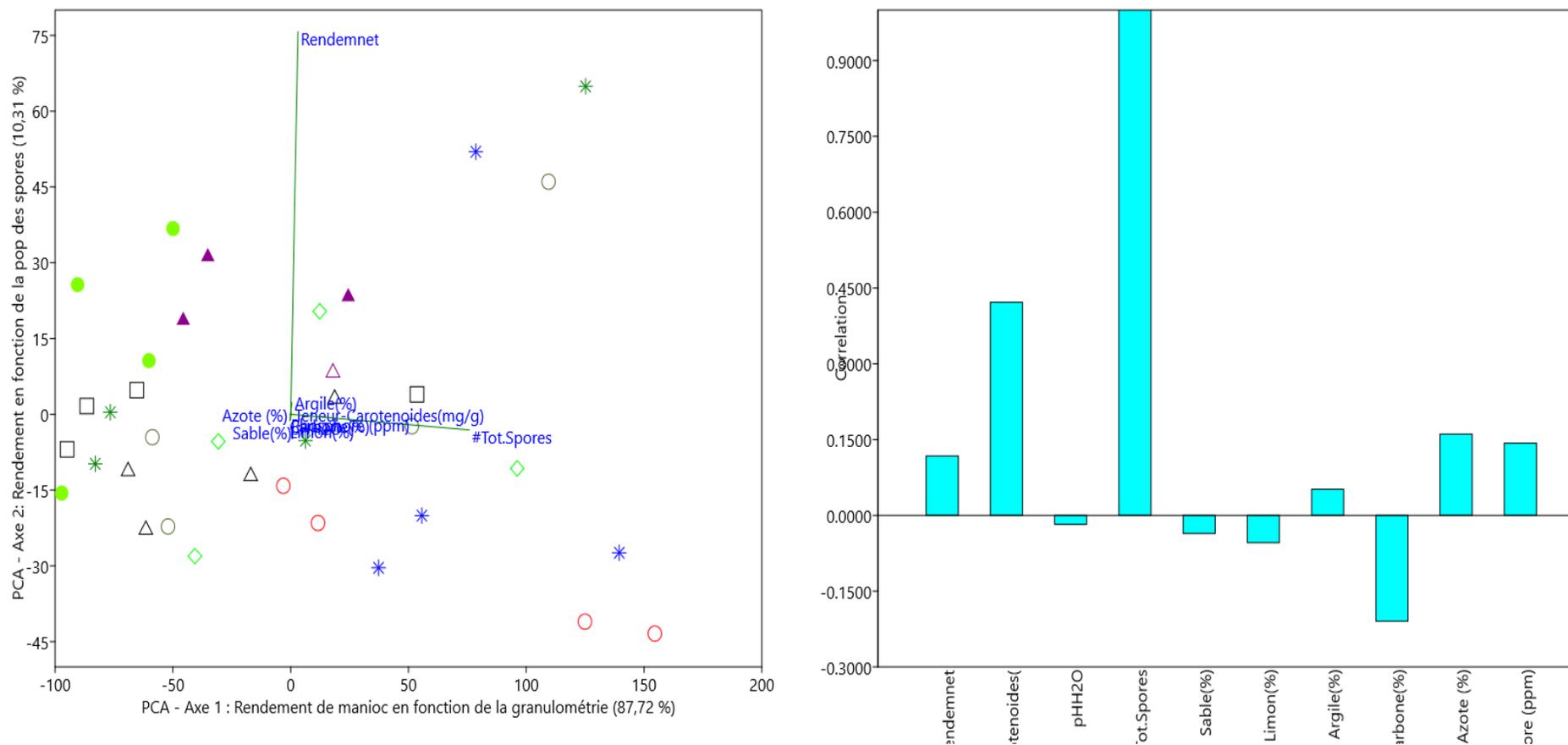


Figure 21: : Diagramme d'analyse des variables des sols et des tissus végétaux sur le rendement en racine tubéreuse chez les variétés Liyayi à Lito

Légende

- : Contrôle
- * : Inoculum de CMA
- △ : Engrais minéral (NPK)
- ▲ : Fumier de ferme + Inoculum de CMA
- : Engrais minéral (NPK) + Fumier de ferme
- : Association manioc + sorgho
- : Fumier de ferme
- ◇ : Engrais minéral (NPK) + Inoculum de CMA
- * : Engrais minéral (NPK) + Inoculum de CMA + Fumier de ferme

c) Les deux variétés

Les observations faites sur les deux variétés de manioc sont présentées dans la figure 22. Par rapport aux variables observées et leur comportement vis-à-vis des traitements apportés au sol sur la culture du manioc. Il ressort ce qui suit :

- Les associations du manioc au sorgho n'ont pas occasionné des modifications importantes en ce qui concerne les variables observées dans leur ensemble et cela s'observe aussi lorsque l'engrais NPK est apporté seul.
- Ces tendances sont obtenues aussi lorsque l'inoculum est apporté sans être combiné à d'autres types de fertilisants.
- Les traitements appliqués au sol ont influencé le rendement du manioc avec un comportement plus favorable pour le fumier lorsqu'il est apporté seul ou lorsqu'il est associé aux inocula mycorrhiziens.

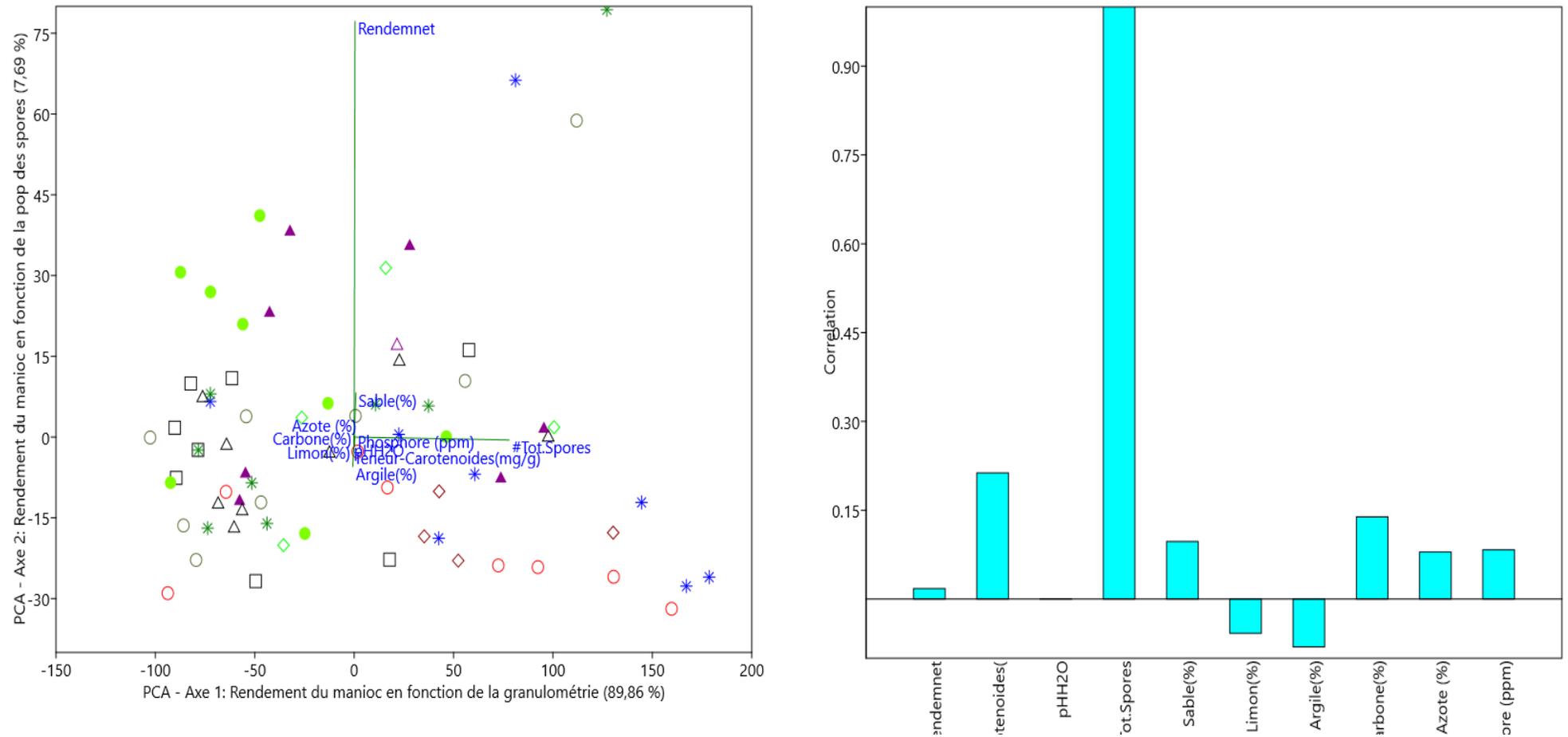


Figure 22: Diagramme d'analyse des variables des sols et des tissus végétaux sur le rendement en racine tubéreuse chez les variétés Liyayi à Lito

Légende

- : Contrôle
- * : Inoculum de CMA
- △ : Engrais minéral (NPK)
- ▲ : Fumier de ferme + Inoculum de CMA
- : Engrais minéral (NPK) + Fumier de ferme
- : Association manioc + sorgho
- : Fumier de ferme
- ◇ : Engrais minéral (NPK) + Inoculum de CMA
- * : Engrais minéral (NPK) + Inoculum de CMA + Fumier de ferme

3.2.3. Relations entre les variables du sol et du manioc après apport des CMA suivant les saisons culturales

3.2.3.1. Saison culturale 1 (Année agricole 2015)

Les apports des inocula ont joué un rôle important dans le comportement de certains éléments du sol et du manioc en saison A dans le site de Lito (Tableau 4).

En saison 1 (2015), on n'a pas observé des différences statistiques pour la plupart d'éléments analysés sauf pour le phosphore.

Tableau 4. Valeurs moyennes des éléments du sol après les cultures du manioc en première saison expérimentale (2015).

Traitements	Granulométrie			Carbone (% CO)	Azote (%)	Phosphore (ppm)	pH	
	Sable %	Limon %	Argile %				KCl	Eau
Contrôle	70,5	13,7	15,89	6,79	0,234	10,64	4,23	5,51
Association Manioc + Sorg	68,5	14,21	17,29	5,49	0,333	12,12	4,78	5,58
Fumier +Inocula	65,49	12,86	21,65	9,35	0,33	11,94	5,2	5,4
Fumier seul	67,33	12,36	20,31	5,15	0,334	12,15	4,93	5,66
Inocula seul	71,41	12,22	16,38	5,61	0,318	13,07	4,56	5,72
NPK	72,55	13,45	14	4,17	0,283	12,86	4,28	5,32
NPK + Fumier	68,19	13,95	17,85	7,81	0,352	12,04	4,35	5,3
NPK + Fumier + Inocula	66,37	13,13	20,51	5,7	0,319	14,38	4,47	5,22
NPK + Inocula	68,26	13,19	18,55	7,76	0,297	13,63	4,71	5,27
Moyenne	68,73	13,23	18,05	6,43	0,31	12,54	4,61	5,44
F pr	ns	ns	ns	ns	12,7*	ns	ns	
LSD.05	6,81	2,18	6,93	0,55	0,71	1,23	0,44	0,25
CV %	8	8,5	25,1	31,7	14,3	4,6	4,6	4,9

Le type de sol de l'étude était de texture sablo-argileux suivant la classification américaine des sols. Les moyennes de pH oscillaient entre 4.61 pour le pH eau et 5.44 pour le pH au KCl. La concentration du carbone organique était bonne (6,43 %) et aussi, on a observé que la bonne activité des champignons mycorhiziens avait influencé la disponibilité du

phosphore. Des différences statistiques significatives étaient obtenues lorsqu'on comparait les teneurs de phosphore des parcelles témoins qui ont présenté des teneurs beaucoup plus faibles (avec 10,64 ppm en moyenne) aux parcelles qui étaient traitées avec l'inoculum des champignons mycorhiziens. Les moyennes pour ces parcelles allaient au-delà de 12 ppm (LSD.05 = 1,23 ppm).

a) Les effets du phosphore sur le rendement du manioc :

On a obtenu une bonne mobilisation du phosphore dans les parcelles qui ont reçu les apports des CMA. Cette mobilisation du phosphore a influencé le rendement du manioc (figure 23). La mobilisation du phosphore était beaucoup plus faible dans le contrôle et dans l'association du manioc au sorgho. Lorsqu'on pensait multiplier les champignons mycorhiziens *in situ* en incluant parmi les traitements l'association du manioc au sorgho, il est ressorti de ce traitement que la mobilisation du phosphore est relativement plus faible et cela autant pour le rendement du manioc en racine tubéreuse. La concurrence en lumière créée par le sorgho dans le premier trimestre de la croissance du manioc et la perte de densité du manioc seraient à la base de ces contre-performances.

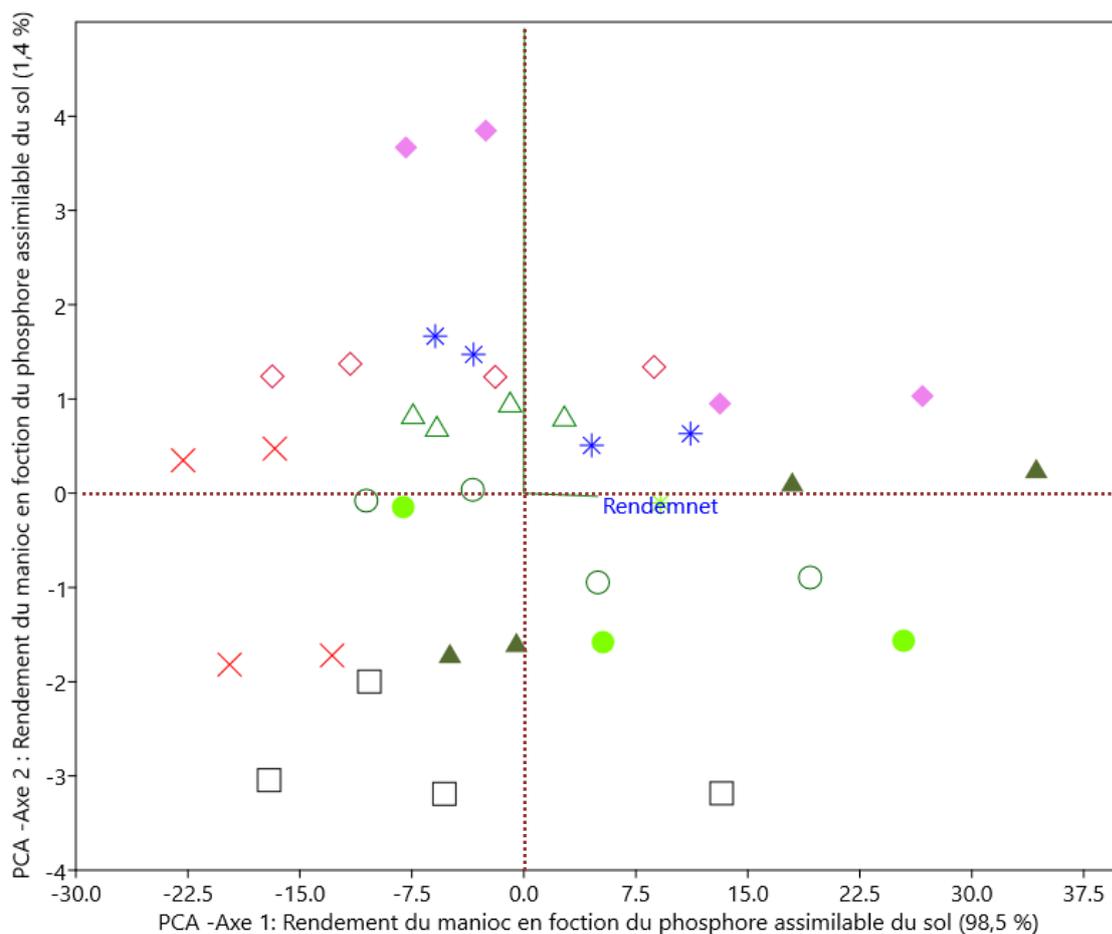


Figure 23: PCA établissant la relation entre la teneur en phosphore dans le sol et le rendement du manioc

Légende :

- : Contrôle
- ★ : Inoculum de CMA
- △ : Engrais minéral (NPK)
- ▲ : Fumier de ferme + Inoculum de CMA
- : Engrais minéral (NPK) + Fumier de ferme
- × : Association manioc + sorgho
- : Fumier de ferme
- ◇ : Engrais minéral (NPK) + Inoculum de CMA
- ◆ : Engrais minéral (NPK) + Inoculum de CMA + Fumier de ferme

Les traitements avec les apports des CMA se concentrent dans le cadran 2 indiquant une bonne mobilisation du phosphore du sol qui entraîne à la fois une augmentation conséquente du rendement du manioc. Les parcelles témoins, avec apports des engrais minéraux, avec fumier et des associations manioc-sorgho sont concentrées dans les cadrans 3 et 4 indiquant ainsi une faible disponibilité du phosphore. Cependant, on sait aussi voir une bonne présence des parcelles avec apports des CMA dans le quatrième cadran et cela peut être

compris par le fait que le rendement s'accroît non pas seulement par la mobilisation du phosphore par les CMA mais aussi par celle des autres éléments du sol. Ceci nous pousse aussi à accepter la théorie selon laquelle, les mycorhizes ne permettent pas seulement la disponibilisation des éléments du sol mais aussi agissent comme des fertilisants dans le sol en puisant les éléments minéraux rendus inaccessibles (Mousain, 1989).

Pour les autres éléments du sol : Les analyses statistiques consistant aux comparaisons multiples des moyennes n'ont pas indiqué des différences significatives entre les traitements (LSD.05) et cela était autant dans les analyses des variances élaborées à 2 critères de classification.

b) L'acidité du sol sur le rendement du manioc

L'acidité du sol (pH bas) était plus marquée dans les traitements témoin (ctrl) et association du manioc au sorgho (ass). Les conséquences se sont avérées plus remarquables sur la réduction du rendement du manioc avec des moyennes relativement faibles évaluées à moins de 20 t. ha⁻¹. Cependant les apports des CMA associés ou pas aux autres types de fertilisants, ont pu donner des productions en racines tubéreuses de manioc très intéressantes même lorsque les conditions du sol étaient acides avec des pH variants entre 4,5 et 5,7. Les rendements obtenus par ces apports oscillaient entre 30 et 55 t. ha⁻¹ en moyenne. Les apports des CMA auraient permis de juguler les effets défavorables de l'acidité du sol sur la production du manioc. On observe que les meilleurs rendements en racines tubéreuses de manioc sont obtenus lorsque le pH se situe dans la fourchette variant de 4,5 à 6,1 et les traitements qui ont indiqué des rendements meilleurs ont eu pratiquement une application de l'inoculum des champignons mycorhiziens. Les bonnes réponses de l'engrais minéral (NPK) sont obtenues lorsque le pH est le plus élevé (autour de 6). En évaluant le comportement du rendement et en prenant en compte l'acidité, on observe que les apports avec l'inoculum des CMA a permis d'obtenir un rendement relativement plus grand quel que soit le niveau de pH (élevé ou non). Les champignons endomycorhiziens ayant la particularité de résister aux conditions des sols acides où prélaient des éléments minéraux indisponibles pour les végétaux (Chen *et al.* 2000b), ont joué un rôle majeur dans la nutrition minérale du manioc. De manière générale, des rendements allant de 30 à 80 t. ha⁻¹ étaient obtenus en incorporant les CMA dans les apports de fertilisants et lorsqu'ils étaient apportés seuls. Les traitements témoin et l'association du manioc au sorgho ont donné les plus faibles rendements lorsque le sol était plus acide (entre 5 et 15 t. ha⁻¹). La réponse du manioc aux engrais minéraux n'est pas très évidente dans les conditions de la zone des forêts de Kisangani et cela est plus

perceptible lorsque le sol présente une acidité plus élevée. Les rendements avec les applications du NPK étaient compris entre 15 et 25 t. ha⁻¹ en sol plus acide ($\text{pH} \leq 4.5$) et autour de 30 t. ha⁻¹ lorsque le pH du sol est compris entre 5.5 et 6.5 ($\text{LSD}.05 = 4,1 \text{ t. ha}^{-1}$, CV % 13,3 %). La moyenne est de 55 t. ha⁻¹ lorsqu'on apporte l'inoculum des CMA seul ou combiné aux autres types fertilisants et quel que soit l'acidité du sol.

c) La granulométrie du sol et le rendement du manioc

- Le sable

Les observations faites indiquent clairement que la fraction sableuse du sol a eu une influence sur le rendement du manioc. Les productions du manioc dans leur grande majorité ont oscillé entre 10 et 30 t. ha⁻¹ lorsque la fraction du sable était entre 60 et 80 %. Le rendement du manioc est allé en augmentant dans les traitements avec les inoculations des CMA même lorsque le pourcentage du sable était plus élevé. On a obtenu des rendements de manioc allant de 50 à 80 t. ha⁻¹ dans les parcelles traitées avec les inoculations des CMA combinées ou non aux autres fertilisants et même lorsque la granulométrie indiquait 60 à 80 % de teneur en sable dans la fraction du sol. Les apports des engrais minéraux en sol sableux ne permettent pas des accroissements du rendement à cause de la granulométrie grossière des particules. Le sol plus poreux occasionne la migration des éléments minéraux vers les horizons inaccessibles aux racines des cultures. Il apparaît aussi que cette expérience était conduite sur un sol prédominé par le sable (teneur du sable > 60 %).

- Le limon

La fraction limoneuse du sol était faible en général dans le sol sous expérimentation. Elle a varié entre 5 et 19 % de la granulométrie totale du sol. En observant le comportement des traitements en présence, il ressort ce qui suit :

La faible teneur en limon était limitante pour la production du manioc en racines tubéreuses dans les traitements témoin (ctrl), NPK et l'association manioc-sorgho. Des rendements inférieurs à 20 t. ha⁻¹ en moyenne ont été obtenus lorsque la teneur en limon dans le sol était estimée entre 5 et 10 %. Les apports en CMA associés ou non aux autres fertilisants ont permis d'obtenir des bons rendements du manioc avec des valeurs allant de 30 à 80 t. ha⁻¹ pour des pourcentages de limon du sol allant de 5 à 20 %.

- L'argile

Les inoculations du CMA ont permis d'obtenir des bons rendements de manioc même lorsque le pourcentage d'argile dans le sol était au plus bas (entre 5 à 25 %). Des rendements de manioc sont situés entre 40 et 80 t. ha⁻¹ avec les apports des CMA. Les traitements association Manioc-Sorgho et témoin ont été défavorables en provoquant la carence de l'argile dans le sol et en réduisant les rendements du manioc. Les valeurs obtenues avec ces traitements n'atteignent pas 25 t. ha⁻¹. Très peu de traitements ont réagi à la présence relativement élevée de l'argile dans le sol.

d) Relation entre le phosphore et l'acidité du sol

Les sols des sites sont acides et la présence des CMA parmi les traitements appliqués ont accéléré la mobilisation du phosphore dans le sol au profit du manioc. Les traitements témoin et l'association manioc-sorgho ont donné des concentrations plus faibles en phosphore (9 à 12 ppm). Ces concentrations sont plus élevées avec les applications de l'inoculum des CMA. C'est lorsque les conditions d'acidité étaient améliorées que le phosphore était plus disponible dans le sol (avec des concentrations oscillantes entre 14 et 18 ppm). Les inocula mycorhiziens dans leur ensemble ont permis de mobiliser le phosphore du sol avec des moyennes partant de 16 à 20 ppm.

e) Relation entre le phosphore et la présence des spores vivantes dans le sol

Le nombre de spores dans le sol fait présager le niveau de l'activité mycorhizienne dans le sol. Une forte concentration des spores vivantes dans le sol laisse croire à une intense activité sur la mobilisation du phosphore du sol. La teneur du phosphore est plus élevée lorsque le sol est prédominé par les spores mycorhiziennes apportées sous forme d'inocula. Les concentrations des spores varient entre 150 à 300 spores par 100 g des terres pour des concentrations en phosphore évaluées entre 16 à 20 ppm. Le nombre de spores dans 100 g de terres est plus faible (50 à 100 spores par 100g de terre) dans le témoin, le fumier seul et l'engrais NPK où les mobilisations du phosphore varient entre 9 et 16 ppm (LSD.05 = 6,1 ppm).

3.2.3.2. Saison culturale 2 (Année agricole 2016)

L'essai a été reconduit en affinage des résultats la saison culturale suivante et dans le même site. Des données observées, il ressort des différences mineures sur les données obtenues en

année 2016 en ce qui concerne les relations entre les applications des inocula mycorhiziens et les propriétés du sol.

En deuxième année (2016), les résultats que nous avons obtenus, ne se sont pas écartés de ceux obtenus en première saison et ont permis de tirer une conclusion conséquente. L'analyse de la covariance entre les deux saisons (Tableau 5) n'indique pas des écarts significatifs des résultats obtenus et ainsi, confirment les effets positifs des apports des CMA sous forme d'inoculum.

L'analyse de la covariance entre le rendement du manioc en poids frais et la concentration du phosphore est présentée dans le tableau ci-dessous.

Tableau 5. Résultat de l'analyse de la covariance entre la variable rendement et la teneur du sol en phosphore pour les deux saisons expérimentales

Source de variation	dl	SCE	CM	F-prob	cov.ef.	F pr.
Saison (Covariate)	1	3272,9	3272,9			
Saison x variétés de manioc (Covariate)	1	5584,7	5584,7	1,49		0,437
Residuel	1	3745,3	3745,3	147,54	1,25	
Saison x Variétés de manioc x Répétition (covariate)	1	546,5	546,5	21,53		0,019
Residuel	3	76,2	25,4	0,1	6,13	
Saison x Variétés de manioc x Répétition x Traitements(covariate)	8	9445	1180,6	4,46	0,92	<.001
Traitements (covariate)	1	2,8	2,8	0,01		0,919
Residuel	127	33608,5	264,6		0,99	
Total	143	57214,6				

Il ne ressort pas des différences entre les saisons expérimentales en ce qui concerne le rendement et la concentration du phosphore dans le sol. La combinaison des facteurs cependant, fait dégager une interaction sur les traitements appliqués au sol. Des différences sont restées perceptibles entre les parcelles traitées avec l'inoculum des CMA et celles n'ayant pas reçu ce genre de traitement. Ces différences ont été observées à la fois en saison 1 et en saison 2 et de la même manière dans le premier et le second site.

a) Relation nombre de racines commercialisables et le rendement du manioc

Il ne ressort pas des différences significatives entre les traitements appliqués au manioc par rapport au nombre de racines commercialisables. Le nombre de racines par parcelle se situait entre 10 et 50 racines réparties sur l'ensemble de traitements. Aussi on ne décèle pas une corrélation entre les deux variables c'est-à-dire le nombre de racines commercialisables par rapport au rendement du manioc. On observe une forte dispersion des points indiquant un

manque de corrélation entre les deux variables observées. Cependant en ce qui concerne le rendement, il est plus grand dans les traitements avec apports des CMA.

Une tendance s'est dégagée pour le traitement Association manioc-sorgho et le traitement témoin où le nombre de racines commercialisables était relativement plus faible (autour de 15 racines commercialisables par parcelle) avec des rendements moins importants estimés à moins de 25 t. ha⁻¹ en moyenne pour le témoin et moins de 15 t. ha⁻¹ pour l'association manioc-sorgho.

b) Relation entre l'acidité du sol et le rendement en racines fraîches du manioc

Les apports d'engrais minéraux (NPK) étaient plus efficaces lorsque les conditions du sol étaient relativement moins acides (pH entre 6 et 6,5). Les inoculations des CMA ont confirmé leur particularité de produire suffisamment même lorsque le niveau d'acidité est plus bas. Les CMA constituent une alternative pour produire le manioc en sol acide des tropiques avec des rendements oscillant entre 30 et 80 t. ha⁻¹. Le niveau bas de pH agit défavorablement sur le traitement Contrôle et Association manioc-sorgho avec des moyennes de rendement n'accédant pas 20 t. ha⁻¹ (LSD.05 = 11,7 t. ha⁻¹). Les apports du fumier seul n'ont pas modifié le rendement du manioc dans les conditions de forte ou faible acidité.

c) Rapport entre la matière sèche des racines et le rendement du manioc

On observe qu'il y a eu une forte concentration de la matière sèche des racines dans le contrôle, l'engrais minéral (NPK) et le fumier seul avec des concentrations en matière sèche évaluée entre 26 et 32 % dans les racines de manioc. Cette matière sèche baisse lorsqu'on apporte des inocula mycorhiziens et est de l'ordre variant entre 20 et 26 % (LSD.05 = 3,3 %). Les CMA favorisent une bonne absorption de l'eau dans les tissus du manioc au détriment de la matière sèche. Cette particularité accorde au manioc la possibilité de bien croître en saison de faible pluviosité (mois de janvier à mars dans la zone forestière de Kisangani).

d) La population des spores mycorhiziennes dans le sol par rapport au rendement du manioc

Des évaluations faites sur le nombre de spores mycorhiziennes présent dans le sol où était installée l'expérimentation, il apparaît clairement que les inocula mycorhiziens ont favorisé l'augmentation de la population des spores dans le sol. On a obtenu de nombre allant de 200 à 400 spores/100 g de terre lorsque le sol était inoculé au terreau infecté des spores

mycorhiziennes. Le nombre de spores est plus faible dans le sol fertilisé avec la fumure minérale, la fumure organique, l'association du manioc-sorgho et dans le témoin où dans un volume de 100 g de terres, on a retrouvé entre 0 à 200 spores. La densité relativement faible du sorgho en plein champ associé au manioc, n'a pas permis de concentrer suffisamment des spores autour des racines du sorgho.

Le rendement du manioc ne dépendait pas du nombre des spores qu'on a trouvé dans les différents traitements mais plutôt des traitements appliqués au sol. Il ressort que les fumures combinant les inocula mycorhiziens aux fertilisants minéraux ont permis d'obtenir des bons rendements de manioc quand bien même le nombre de spores était faible. Les rendements du manioc oscillent entre 30 à 80 t. ha⁻¹ avec des populations de spores estimées entre 50 à 200 dans les combinaisons inocula mycorhiziens aux engrais minéraux.

e) Relation entre le phosphore et le rendement par rapport aux traitements appliqués dans le sol

Les concentrations du phosphore dans le sol varient entre 14 et 20 ppm lorsque dans le traitement on incorpore les inocula mycorhiziens. Elles sont beaucoup plus faibles dans le témoin où les valeurs moyennes ne dépassent pas 13 ppm (LSD.05 = 2,4 ppm). Le rendement est plus grand lorsque les inocula sont incorporés et lorsque la concentration de phosphore est plus élevée. On a obtenu entre 30 à 80 t. ha⁻¹ dans les traitements incorporant les inocula lorsque la concentration du phosphore variait entre 13 et 20 ppm. Dans ces mêmes concentrations de phosphore (entre 13 à 30 ppm), les rendements sont inférieurs à 30 t. ha⁻¹ (LSD.05 = 7,71 t. ha⁻¹) et on retrouve dans ce cadran, les associations manioc-sorgho et les apports des fertilisants minéraux. Les concentrations en phosphore du sol sont plus faibles dans le contrôle et par conséquent le rendement du manioc aussi est influencé (Phosphore entre 5 à 11 ppm et rendement du manioc entre 5 à 24 t. ha⁻¹).

d) Relation entre la granulométrie du sol et le rendement du manioc en racines

- Le Sable

Le sol sous expérimentation avait une fraction importante du sable. La majeure partie des traitements se sont retrouvés dans cette gamme. Dans ces conditions sablonneuses du sol (compris entre 60 à 85%), le traitement ayant obtenu une incorporation des inocula des CMA ont pu donner des rendements élevés estimés à des moyennes qui oscillent entre 30 à 80 t. ha⁻¹. La combinaison des inocula mycorhiziens à la fumure organique (fumier de ferme) a été le

plus favorable. Les rendements du manioc sont faibles (moins de 30 t. ha⁻¹) dans les associations manioc-sorgho, le témoin et les apports des engrais minéraux (NPK) et on peut comprendre que les conditions des sols à forte fraction sablonneuse (60 à 85 %) serait à la base de ce faible rendement du manioc.

- Le Limon

Naturellement la forte teneur du sable dans le sol l'est au détriment du limon et de l'argile. Les concentrations en limon ont varié entre 5 et 19 % dans le sol. De manière générale les traitements apportés au sol ont été affectés par la faible teneur en limon dans le sol (avec des rendements du manioc inférieurs à 25 t. ha⁻¹). Les apports en inocula des spores mycorhiziennes combinés ou pas aux autres fertilisants ont permis d'obtenir des rendements élevés évalués entre 30 et 75 t. ha⁻¹ (LSD.05 = 10,27 t. ha⁻¹).

- L'Argile

La fraction argileuse était relativement pauvre dans le sol des essais, elle a varié entre 5 et 30 % en moyenne et dans cette condition, les rendements de la plupart de traitements étaient compris dans la fourchette de 10 à 60 tonnes par hectare. Les apports des CMA ont permis d'obtenir des rendements relativement élevés allant jusqu'au-delà de 80 t. ha⁻¹ malgré la concentration faible du sol en argile. Un supplément en apport des CMA sur les autres types de fertilisants (organique ou minéral) est susceptible d'améliorer la fertilité du sol et favoriser une bonne production du manioc même dans les sols à faible teneur en argile (présentant des moyennes inférieures à 30 %).

f) Le carbone par rapport au rendement du manioc

Le carbone organique (CO) n'a pas constitué un facteur limitant la production du manioc. Les traitements appliqués au sol ont réagi de manière diverse quel que soit le niveau de concentration du carbone organique dans le sol. Les rendements du manioc n'ont pas été modifiés par les concentrations du carbone organique dans le sol.

g) Relation entre la population des spores mycorhiziennes et le phosphore dans le sol

On a supposé que la prédominance des spores dans le sol influencerait le comportement du phosphore du sol. On a constaté que la population des spores dans le sol variait entre 50 à 250 spores/100 g de terres pour la majorité de traitements observés. Avec des populations des

spores mycorhiziennes allant de 10 à 250 par 100 g de terres, l'ensemble des traitements ont eu leur concentration en phosphore dans le quatrième cadran avec des concentrations en phosphore comprises entre 13 et 20 ppm. Le nombre de spores est bénéfique dans les traitements où il y a apport des inocula des CMA car c'est dans ces conditions qu'il y a accroissement de la concentration du phosphore dans le sol.

3.2.3.3. Les Apports des fertilisants sur le rendement du manioc

Pour bien comprendre le rôle qu'aurait joué les apports des fertilisants et dont principalement les inoculations des champignons mycorhiziens dans la culture du manioc, les résultats des expérimentations ont été évalués durant deux saisons culturales du manioc et dans deux sites distincts (figure 24).

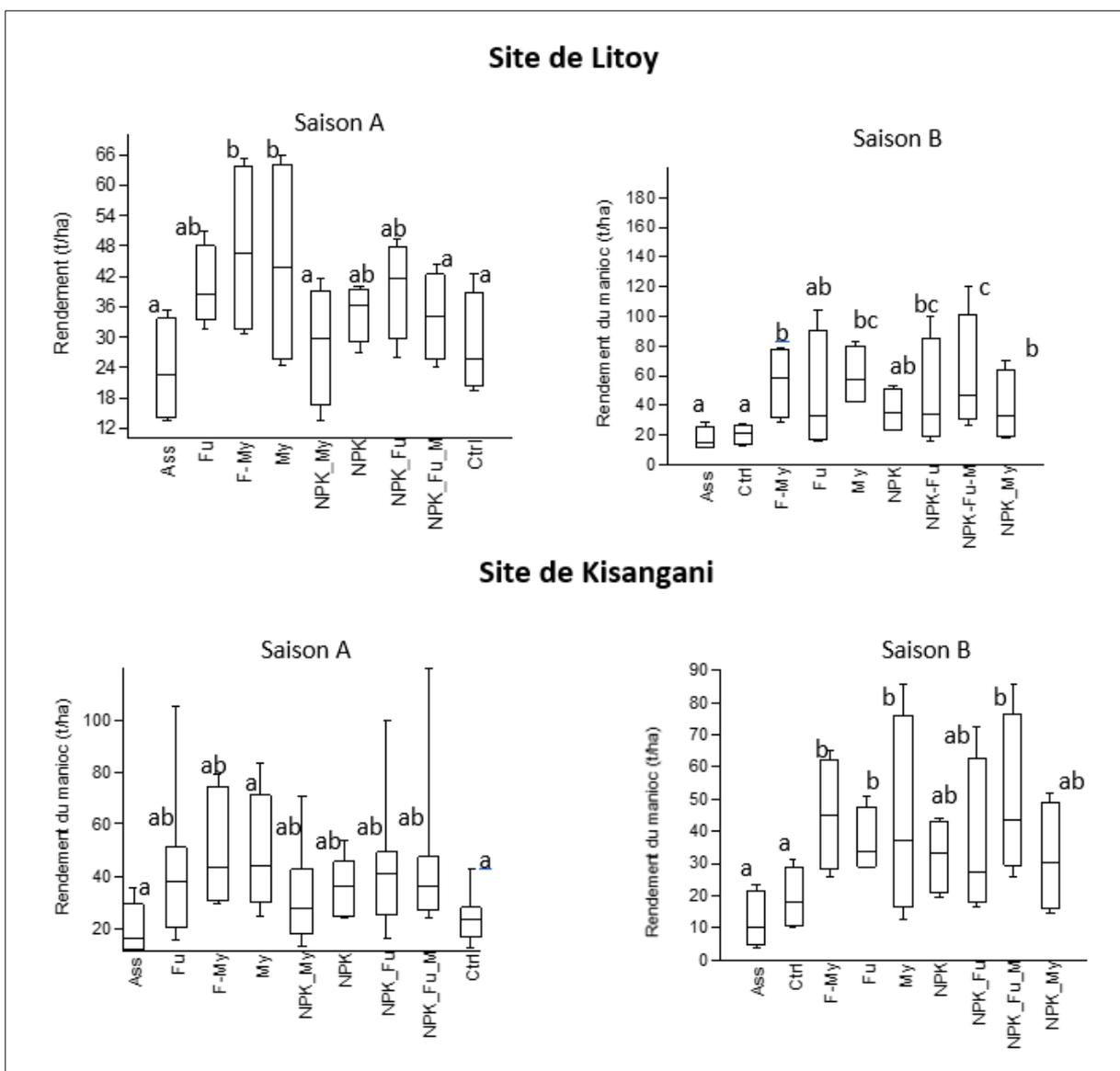


Figure 24: Les rendements du manioc en racines tubéreuses fraîches (t. ha⁻¹) dans les deux sites et durant deux saisons culturales du manioc

En observant les graphiques de la figure 24, il apparait ce qui suit :

- Dans le site de Litoy, les comportements de traitements durant les deux saisons culturales indiquent des différences statistiquement significatives en ce qui concerne le rendement du manioc en racines fraîches. Ces différences sont observées lorsqu'on apporte le fumier associé aux inocula mycorhiziens et lorsque les inoculations des CMA sont apportées seules. Il ressort même que c'est en saison A dans ce site que les apports du NPK associés aux inocula des CMA sont défavorables sur le rendement du manioc. On n'a donc pas pu percevoir l'influence du NPK sur le rendement du manioc et il semblerait même que ce traitement aurait inhibé l'activité mycorhizienne. Les mêmes effets sont aussi observés lorsque le NPK est associé à la combinaison Fumier + inocula de CMA. Les rendements obtenus avec le fumier seul, avec le NPK seul et dans la combinaison de ces deux fertilisants n'ont pas apporté des accroissements de rendements en saison A à Litoy. En saison B dans le même site, on a observé les mêmes tendances où le contrôle et l'association manioc-sorgho ont présenté des rendements faibles évalués à moins de 20 t. ha⁻¹. Les rendements sont relativement élevés avec la combinaison fumier + inocula des CMA (moyenne de 62 t. ha⁻¹), fumier de ferme seul (38 t. ha⁻¹), Inocula des CMA seuls (55 t. ha⁻¹). La combinaison Inocula + Fumier + NPK a donné les meilleurs rendements évalués en moyenne à 65 t. ha⁻¹ (LSD.05 = 17,8 t. ha⁻¹, p <.001).
- Dans le site de Kisangani, on a aussi observé en saison A des tendances similaires que celles obtenues dans le site de Litoy confirmant les performances des apports des CMA dans la fertilisation des sols épuisés par la culture du manioc. Les traitements Inocula des CMA et Inocula des CMA + Fumier de ferme ont donné des rendements en racines tubéreuses statistiquement différents des autres traitements appliqués avec des moyennes observées autour de 40 t. ha⁻¹. Les rendements sont faibles et de manière graduelle dans les traitements NPK + Inocula des CMA, le Témoin et l'association manioc + sorgho avec des moyennes respectives de 26, 24 et 10 t. ha⁻¹ (LSD.05 = 13,43 t. ha⁻¹, p <.01).

En saison B, dans le site de Kisangani, les rendements chez le témoin et l'Association Manioc-Sorgho demeurent plus faibles et différents du point de vue statistique en comparaison aux traitements tels que le fumier + Inocula des CMA, le fumier seul, les inocula des CMA seul, et la combinaison de l'engrais NPK + Fumier de ferme + Inocula des CMA. Il ressort aussi que la fumure minérale appliquée seule sans support

organique n'est pas favorable à la production des racines tubéreuses du manioc (le rendement est de 17 t. ha⁻¹ dans le témoin et 24 t. ha⁻¹ lorsqu'on apporte le NPK, LSD.05 = 11,85 t. ha⁻¹).

Les mêmes tendances sont observées dans les deux sites et pendant les deux saisons expérimentales (figure 25)

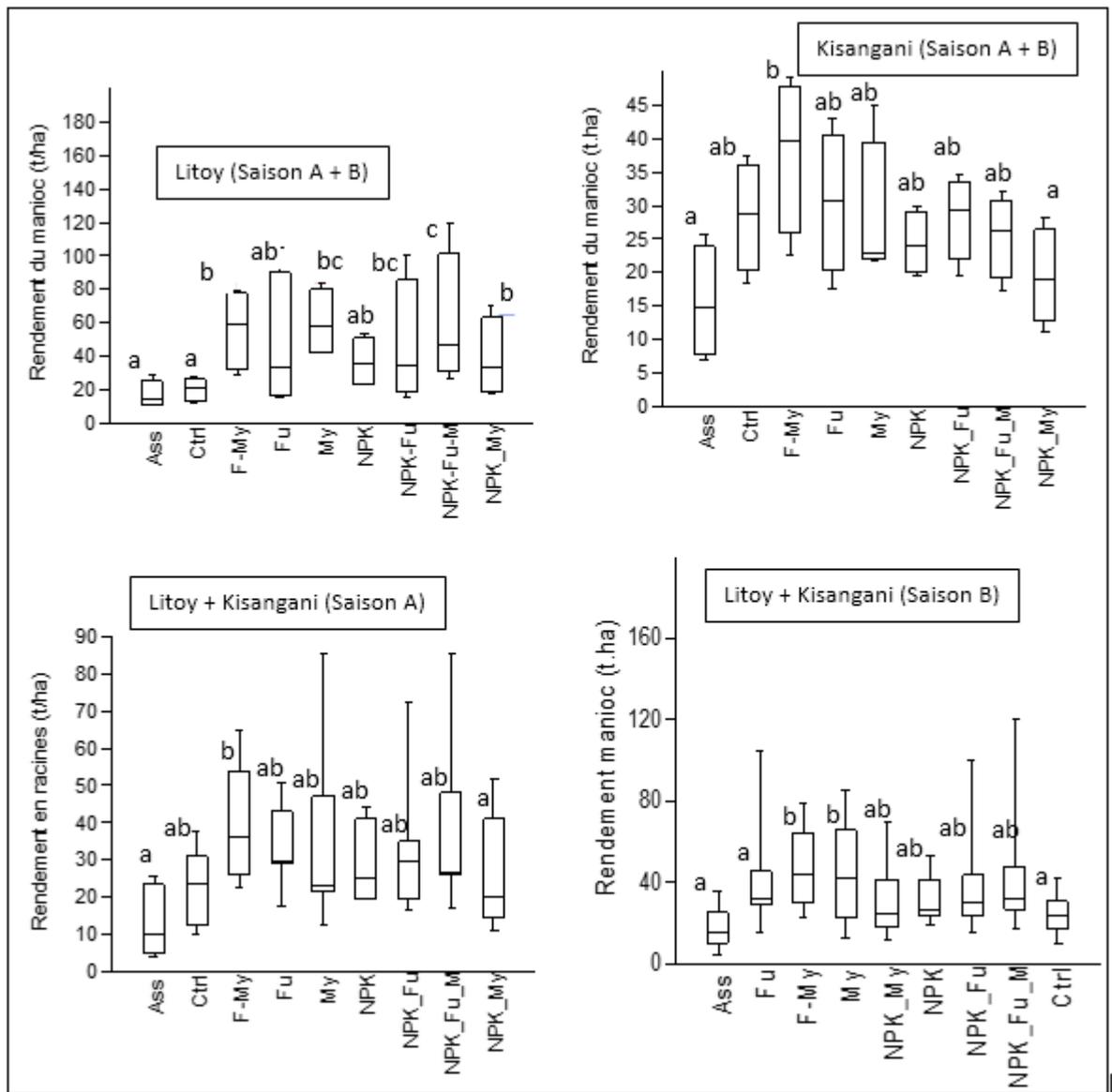


Figure 25: Les moyennes des rendements du manioc en racines fraîches suivant les saisons culturales et les sites expérimentaux

Les données analysées de manière groupée font apparaître ce qui suit :

- a) Au site de Litoy en saison A et B : les rendements sont relativement plus faibles pour l'association manioc au sorgho et le contrôle (témoin sans apport) avec des moyennes

comprises entre 16 et 22 t. ha⁻¹. L'engrais NPK à Lito y n'a pas influencé significativement le rendement et les moyennes de rendements obtenues ne s'écartent pas de manière significative des rendements obtenus dans le contrôle (moyenne évaluée à 32 t. ha⁻¹). Les apports des inocula des CMA sont avantageux sur le rendement du manioc dans la mesure où on a obtenu des rendements moyens de 60 t. ha⁻¹ dans les apports des CMA apportés seul et 61 t. ha⁻¹ lorsque ces inocula sont associés au fumier de ferme (figure 25). Ces moyennes de rendements sont respectivement de 40 t. ha⁻¹ chez le fumier seul et des rendements plus importants dans l'association Inocula + NPK + fumier dont la moyenne obtenue est de 67 t. ha⁻¹ (LSD.05 = 21 t. ha⁻¹).

- b) Dans le site de Kisangani, les moyennes de rendement sont au bas niveau dans l'association manioc-sorgho et lorsque l'engrais NPK est combiné aux inocula des CMA. Certains auteurs pensent que les engrais minéraux tuent les spores mycorhiziennes (Mousain, 1989). La contreperformance de cette combinaison peut trouver sa réponse dans cette assertion. La combinaison fumier de ferme + Inocula des CMA s'est avérée la plus favorable pour produire du manioc à Kisangani. Les moyennes vont jusqu'à au-delà de 40 t. ha⁻¹ avec ce traitement, elles sont autour de 30 t. ha⁻¹ pour la majorité des autres traitements.
- c) Par rapport aux saisons culturales dans les deux sites, on observe aussi que la combinaison de rendements de deux sites en saison A indique de manière plus claire que l'association manioc-sorgho est défavorable à la production des racines de manioc (des moyennes autour de 10 t. ha⁻¹), ces moyennes sont de plus ou moins 20 t. ha⁻¹ dans la combinaison de l'engrais NPK + Inocula des CMA, 24 t. ha⁻¹ dans le témoin, 39 t. ha⁻¹ lorsque le fumier est associé aux inocula des champignons mycorhiziens (LSD.05 = 13,4 t. ha⁻¹, p<.01), 29 t. ha⁻¹ dans le fumier seul, 30 t. ha⁻¹ dans le NPK, 28 t. ha⁻¹ dans l'association de la fertilisation minérale et organique (NPK + Fu) et 30 t. ha⁻¹ dans la combinaison de l'engrais minéral + la fumure organique + Inocula des CMA.
- d) En saison B, les moyennes de deux sites présentent les mêmes allures caractérisées par des rendements faibles dans l'association Manioc + Sorgho avec des moyennes oscillant autour de 13 t. ha⁻¹, ces moyennes sont de 23 t. ha⁻¹ chez le témoin (sans apport), 31 t. ha⁻¹ lorsqu'on apporte la fumure organique, 42 t. ha⁻¹ lorsque les inocula des CMA sont associés au fumier de ferme (LSD.05 = 15,3 t. ha⁻¹, p<.01), 40 t. ha⁻¹ dans les apports des inocula des CMA seuls (p<.01), 33 t. ha⁻¹ avec l'apport des

engrais minéraux seuls, 39 t. ha⁻¹ lorsque l'engrais minéral est associé à la fumure organique (p<.01) et 42 t. ha⁻¹ dans la combinaison NPK + Fumier + Inocula des CMA (p<.01). On a observé des améliorations de rendements du manioc lorsqu'on a combiné les inocula mycorhiziens au fumier de ferme. Les accroissements de rendement sont de 114 % avec ce traitement par rapport au témoin. Des accroissements respectifs obtenus sont de 99% pour l'application de l'inoculum des CMA seul, de 88 % dans la combinaison NPK + Fumier + Inoculum, 72 % pour la combinaison NPK + Fumier, 41 % pour NPK seul, 37 % pour le fumier seul et 33% lorsque NPK est combiné à l'inoculum, ce résultat démontre une certaine incompatibilité entre les engrais minéraux et la vie des champignons mycorhiziens. Le rendement décroît de -32 % dans l'association Manioc au sorgho. Il se dégage que la concurrence en lumière et en nutriments serait la principale.

3.2.3.4. Les données agronomiques obtenues durant la croissance jusqu' à la récolte du manioc

Les améliorations obtenues sur le manioc par les diverses applications dans le sol sont consignées dans le tableau 6.

Tableau 6. Les données des caractéristiques agronomiques et de rendement du manioc sous divers traitements du sol.

Traitements	Nombre de racines commerciales sables	Nombre de racines non commerciales sables	Nombre de racines pourries	Rendement (t.ha-1)	%Matière sèche des racines	% Amidon dans les racines	% Matière sèche des feuilles à 6 MAP	Teneur en caroténoïde (mg/g)		Taux de reprise (%)
								Kindisa	Liyayi	
Association manioc - Sorgho	2	2	0	16.83	25.99	16.79	18.71	9.14	2.62	45.96
Contrôle	3	6	0	24.59	38.52	18.55	18.88	7.49	3.01	73.88
Fumier+Inocula	7	4	1	52.68	38.80	14.90	20.34	9.00	4.37	74.02
Fumier seul	5	4	2	33.77	35.00	16.13	21.07	8.84	4.64	66.53
Inocula seul	5	4	1	48.94	29.68	15.03	24.08	9.22	4.59	65.40
NPK	6	5	1	34.72	35.15	15.25	22.29	9.18	3.00	66.19
NPK + Fumier	5	4	0	42.30	37.69	15.47	19.06	8.62	3.59	65.87
NPK + Fumier + Inocula	6	5	1	46.11	34.69	14.38	19.82	7.92	4.59	61.57
NPK + Inocula	5	5	1	32.76	34.55	15.03	19.65	8.90	4.77	61.61
Moyenne	5	4	1	36.97	34.45	15.72	20.43	8.70	3.91	64.56
F pr	12.51**	10.68**	ns	5.76*	15.65**	15.65**	2.36*	234.91***	100.1***	10.03**
LSD.05	0.937	1.022	1.770	10.510	1.478	0.805	2.000	0.132	0.132	8.480
CV %	18.100	33.000	161.300	16.900	12.500	12.500	7.500	25.200	19.600	7.100

Les inocula mycorhiziens ont joué un rôle dans le comportement du manioc et ses composantes.

3.2.3.4.1. Le taux de reprise du manioc après la plantation

Les essais étaient installés en fin de la période sèche. On a constaté cependant que le taux de reprise à la plantation était relativement faible pour l'ensemble des essais (64,56 %) et c'est dans les parcelles témoins et Fumier + Inoculum où on a obtenu les reprises les plus élevées avec des valeurs respectives de 73,88 % et 74,02 % (LSD.05 = 13 %). Dans l'association du manioc au sorgho et comme dit ci-haut, le taux de reprise était réduit à cause de la densité du sorgho qui a occasionné une concurrence en lumière avec le manioc (taux de reprise = 45,96 %, LSD.05 = 21 %, CV % = 11,7). En quelque sorte, le sorgho a étouffé le manioc au début de sa croissance et cette condition a occasionné des différences statistiques très significatives en ce qui concerne le rendement obtenu en racines tubéreuses ($P < .001$).

3.2.3.4.2. Nombre de grosses racines

Une moyenne générale de 5 racines commercialisables par pied est obtenue avec une prédominance des grosses racines dans le traitement Fumier + Inoculum qui en compte 7, les traitements NPK et NPK + Fumier + Inoculum ont eu chacun 6 grosses racines. Très peu de grosses racines sont obtenues dans l'association du manioc au sorgho (2 racines commercialisables) et dans le Contrôle (3 racines) pour un LSD.05 = 0,937.

3.2.3.4.3. Nombre de petites racines et des racines pourries

Il ressort que chez le témoin, on retrouve plus de petites racines au détriment des grosses racines. Soient 6 petites racines contre 3 grosses en moyenne. Le fertilisant tant minéral qu'organique a favorisé l'augmentation du nombre de racines tubéreuses par pied de manioc. C'est lorsqu'on applique le NPK qu'on observe une augmentation très significative des petites racines au détriment des grosses racines (Soient 69 % des petites racines contre 31 % des grosses racines). Entretemps, les champignons telluriques sont réputés être responsables des pourritures des racines du manioc mais il apparaît que l'implication des champignons mycorhiziens dans le champ de manioc n'a pas favorisé la prolifération des pourridiés et aurait inhibé le développement des pathogènes. Cependant, on a constaté que l'application du fumier de ferme a effectivement contribué à la prolifération des champignons responsables

des pourritures des racines et de fait, au moins 2 racines par pied dans ce traitement étaient pourries.

3.2.3.4.4. Evolution du rendement suivant la succession des saisons et les performances des mycorhizes.

Le rendement décroît avec les saisons consécutives de manioc. Les rendements relativement élevés étaient obtenus après une jachère de 4 ans environs (en 2012). La culture continue du manioc était une simulation de la pratique paysanne dans les milieux d'étude où on remarque effectivement que le manioc est toujours présent dans l'exploitation agricole du paysan. Cela étant, après plusieurs saisons culturales, on retrouve des champs avec du manioc à faible croissance qui donne à peine la possibilité de récolter quelques feuilles de manioc pour la consommation ménagère et cela à cause de l'épuisement des sols dû à la succession des cultures de manioc. Les rendements ont régressé de 42 t. ha⁻¹ à 16 t. ha⁻¹ chez *Liyayi* de la première à la 4^{ème} saison consécutive du manioc et la même tendance a été observée chez *Kindisa* qui a vu son rendement décroître de 33 à 7 t. ha⁻¹ pour la même période (figure 26). Les inoculations des champignons mycorhiziens ont considérablement modifié la production du manioc en la faisant remonter à 38 t. ha⁻¹ chez *Liyayi* et 27 t. ha⁻¹ chez *Kindisa*.

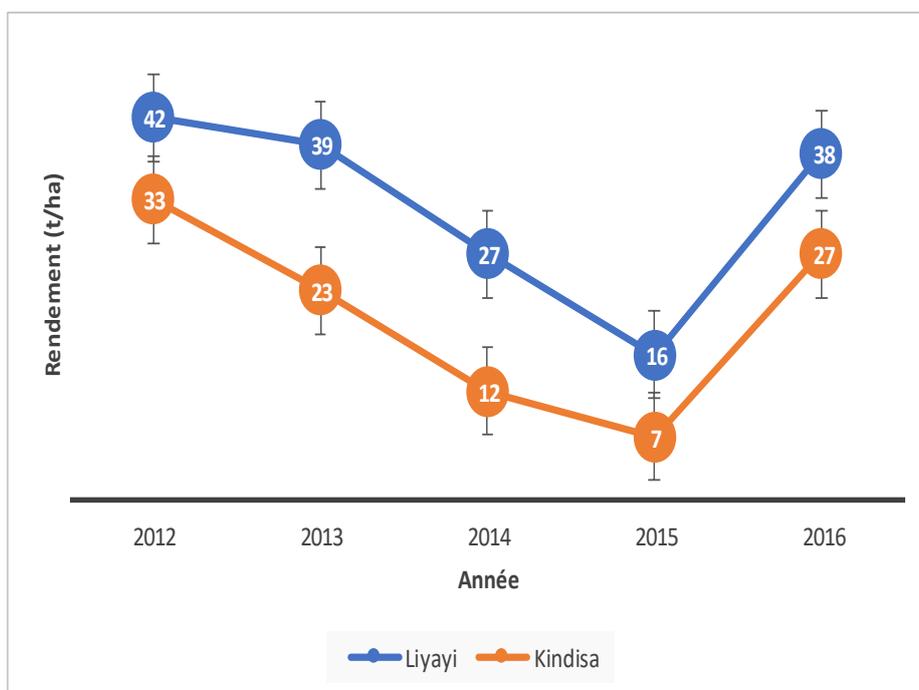


Figure 26: Accroissement du rendement de manioc en tonnes de racines fraîches après 4 saisons consécutives de manioc.

En plus du rendement qui a remonté, on a aussi observé que le calibre du manioc était positivement affecté (figure 27). Cet avantage est attribué à la bonne mobilisation des éléments du sol notamment le phosphore et de l'eau lorsque le sol est inoculé aux champignons mycorhiziens.



Figure 27: Calibre de manioc dans les parcelles avec apport des inocula des champignons mycorhiziens

Aussi il a été constaté une bonne croissance du manioc dans les parcelles inoculées même durant la saison sèche. La teneur en eau dans les tissus du manioc est relativement plus élevée dans les parcelles ayant reçu comme traitement les applications des CMA (figure 28).

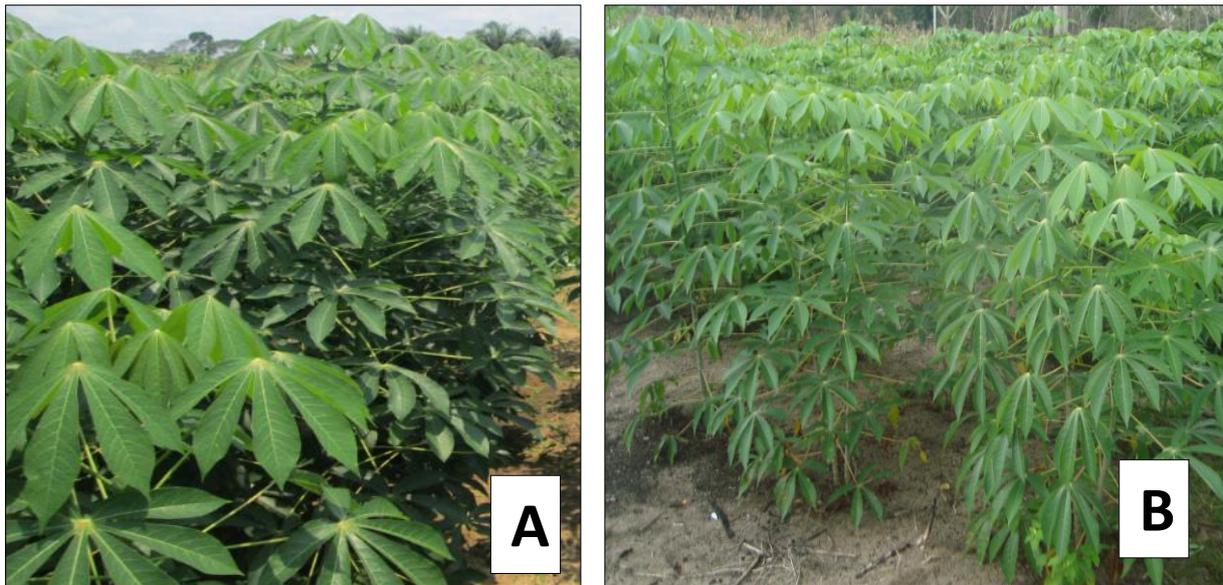


Figure 28: Vigueur du manioc en saison sèche. Champ (A) avec apport des CMA et (B) sans apport

3.2.3.4.5. La matière sèche dans les racines tubéreuses et les feuilles.

La matière sèche des racines est plus élevée dans le contrôle. Elle décroît respectivement de - 33 % lorsque le manioc est associé au sorgho, de - 23 % lorsqu'on apporte l'inoculum mycorhizien, - 10 % dans NPK + inoculum et NPK + Inoculum + Fumier, - 9 % fumier seul et NPK seul et - 2 % pour NPK + Fumier (LSD.05 = 0,805 %). Cette caractéristique constitue un revers sur l'application des inocula mycorhiziens et confirme la théorie selon laquelle les mycorhizes sont pourvoyeurs de l'eau à la plante. Pour le cas du manioc, ceci dépend de l'intérêt qu'on recherche dans l'exploitation du manioc. Ce genre de manioc (riche en eau) ne serait pas intéressant pour les consommateurs directs des racines sous diverses formes (*fufu*, *chikwangue*, *malemba*, *lituma*, etc.) mais par ailleurs peut être intéressant pour les producteurs de l'éthanol. Chez les consommateurs directs, le manioc est généralement utilisé pour la consommation alimentaire et les différentes modes de préparation du manioc et ses dérivées nécessitent des racines bien pourvues en matière sèche. Cependant, à certains usages industriels, le recours au manioc riche en eau (manioc juteux) servirait à la production de l'alcool [essentiel à l'industrie du bio-carburant où il est utilisé directement comme bio-carburant (éthanol) ou comme ester lors de la réduction de la viscosité des huiles végétales (Transestérification) en vue de la production de biodiésel). En ce qui concerne la matière sèche dans les feuilles récoltées à 6 mois après plantation (MAP), il se dégage des différences significatives entre les traitements mis en observation. En effet, en comparant les moyennes deux à deux (LSD) et les moyennes multiples par rapport à la moyenne générale (Duncan), on

constate qu'il y a une augmentation de la teneur de la matière sèche des feuilles dans le contrôle (24,08 %) pendant que la moyenne de moyennes de tous les traitements est de 20,43 % (LSD.05 = 2,36 %). La combinaison NPK + fumier a donné 22,29 %, le fumier seul 21,07 % et les teneurs de la matière sèche dans les feuilles sont les plus faibles dans l'inoculum seul (18,88 %) et dans l'association manioc + sorgho (18,71 %). La constitution des feuilles de manioc était beaucoup plus tendre lorsque l'inoculation étaient opérées comme traitement. Ceci confirme le fait que les mycorhizes mobilisent suffisamment d'eau pour la plante et ainsi, permet à celle-ci de subvenir aux stress hydriques.

3.2.3.4.6. L'amidon des racines.

La teneur en amidon est directement proportionnelle à la quantité de la matière sèche présente dans la racine de manioc. C'est dans le manioc issu des parcelles témoins où on a obtenu les plus hautes teneurs en amidon (18,65 %) pendant que les plus faibles concentrations d'amidon dans les racines étaient issues des parcelles où on avait apporté la combinaison des fertilisants c'est-à-dire NPK + Inocula + Fumier avec un chiffre de 14,38 %. Il semblerait que la présence abondante des mycorhizes a agi de manière défavorable sur l'amidon du manioc avec 14,9 % dans Fumier + Inoculum et 15,03 % dans Inoculum seul.

3.3. Discussion

3.3.1. Multiplication des spores sous plante- hôte pour contourner la biotrophie obligatoire (Objectif spécifique 1)

La multiplication des spores mycorhizienne sous sorgho a permis d'obtenir des accroissements en nombre allant jusqu'à 3000 % dans les conditions de sol sablo-argileux du site de Simisimi. Des résultats similaires étaient aussi obtenus par (Gould *et al.*, 1996) et avaient permis d'obtenir de densité élevée allant jusqu'à 2020 spores par 100 g de terre. (Gould *et al.* 1996) avaient mené des études d'extraction des spores mycorhiziennes sous sorgho installés dans des pots de végétation de 300 millilitres et étaient remplis avec un substrat stérile composé d'un mélange de terre peu fertile (1/2), de terreau (1/4) et de sables (fin, moyen et grossier, 1/4) sur lequel était déposée une plantule de sorgho au stade deux feuilles dont l'extrémité des racines était coupée, afin de favoriser le développement des racines secondaires. Cinq millilitres de suspension de spores étaient directement déposés sur les racines de la plantule qui étaient ensuite recouvertes de substrat. Les pots contenant le même inoculum étaient placés côte à côte dans la serre et arrosés automatiquement à l'aide de

sprinkler deux fois par jour. Après 6 mois de culture, les pots étaient mis à sécher, puis le sol et les racines étaient récupérés et mis dans des sacs stériles bien fermés. L'inoculum des CMA qui est alors sous forme de spores et de racines mycorhizées peut être conservé dans un lieu sec pendant un à deux ans (Gould *et al.* 1996).

3.3.2. Les effets de champignons mycorhiziens arbusculaires sur le phosphore et l'eau du sol

3.3.2.1. Utilisation des phosphates organiques ou minéraux par les symbiotes mycorhiziens

Les inoculations des spores mycorhiziennes ont montré très peu de modifications sur les éléments minéraux du sol essentiels pour la plante. Des différences statistiquement non significatives ont été obtenues en ce qui concerne le carbone organique, l'azote et la granulométrie. Pourtant, Delwalle *et al.*, 1987 estiment que dans le cycle de l'azote, les acides aminés issus de la protéolyse sont utilisés par différents microorganismes du sol pour produire de l'ammonium (ammonification) qui peut être à son tour oxydé par la microflore pour produire le nitrate (nitrification), forme ultime de l'azote minéral (Priyanku, 2017). Ces deux sources d'azote minéral vont ensuite être absorbées par les racines, assimilées et incorporées dans des squelettes carbonés produits par la photosynthèse pour réaliser la synthèse des protéines. Cela pour bien mettre en évidence et bien comprendre le rôle que peuvent avoir les champignons mycorhiziens dans l'utilisation de l'azote minéral par les plantes. Cependant, on a observé des modifications positives dans la teneur en phosphore dans le sol après le manioc. Ceci est confirmé par Calleja *et al.* 1980 qui expliquent que les cordons mycéliens sont capables d'absorber les nutriments par la quasi-totalité de leur surface et jouent donc un rôle essentiel dans les sols pauvres en facilitant l'absorption des ions peu mobiles dont le phosphore est en tête. Selon lui, ces cordons augmentent le volume de sol exploité par le système plante-mycorhize et est économique car la croissance du mycélium dans le sol requiert beaucoup moins d'énergie que la production de racines explorant le même volume de sol. La faible mobilité du phosphore dans le sol est confirmée par (Thoen, 1993) et selon lui, l'absorption du phosphore par les racines des plantes se fait essentiellement sous la forme d'orthophosphate (H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} , et PO_4^{3-}) dont la concentration dans la solution du sol est très faible (un micro-molaire = $1\mu\text{M}$). Les échanges entre les formes solubles et insolubles de phosphore dans le sol sont lents. L'absorption de phosphore par les racines étant plus rapide que la diffusion de phosphore dans le sol, il se forme très rapidement une zone d'épuisement

autour de la racine (Bast *et al.*, 1998). D'importantes réserves de phosphates, organiques ou minéraux, sont toutefois immobilisées dans le sol (Thoen, 1993). Parmi elles, les phosphates organiques, représentés par les phosphates d'inositol, les phospholipides, les acides nucléiques et d'autres formes difficilement identifiables, constituent une fraction très importante du phosphore des horizons superficiels du sol (Anderson, 1967). Les phosphates d'inositol représentent parfois plus de 50 % des phosphates organiques du sol (Farzane *et al.*, 2011). Ces phosphates sont susceptibles d'être dégradés par des phosphatases, enzymes qui catalysent l'hydrolyse de liaisons organiques en libérant de l'orthophosphate.

La carence en phosphore du milieu stimule les activités phosphatases. Ainsi, les activités totales mesurées dans des homogénats mycéliens de *Pisolithus tinctorius* sont multipliées par 15 après 25 jours de culture sur un milieu dépourvu d'orthophosphate (Mousain, 1989) ; ceci est confirmé par les observations qui ont été réalisées dans les sites d'expérimentation à Lito et Kisangani où on a observé une intense population des spores mycorhiziennes dans le sol lorsque la concentration du phosphore était plus faible. Cette stimulation concerne les territoires cellulaires directement en contact avec le milieu externe. Elle traduit une adaptation à un environnement limitant en phosphore soluble que l'on rencontre dans la plupart des sols forestiers (Calleja *et al.*, 1980). L'effet de la carence en phosphore soluble est considérablement plus marqué sur les activités phosphatases des *mycelia* de champignons ectomycorhiziens que sur celles des racines de leurs plantes-hôtes (Williamson *et al.*, 2002). Le marquage cytochimique des phosphatases montre une localisation essentiellement à la surface externe des filaments (Lachance, 2012 ; Dexheimer *et al.*, 2000). Une variabilité importante, inter- et intraspécifique, est observée dans le niveau des activités phosphatases des champignons ectomycorhiziens (Megueni *et al.*, 2011 ; Matumoto, 1996, Mousain, 1989) ; cette variabilité pourrait être mise à profit pour sélectionner des associations mycorhiziennes efficaces dans l'utilisation des phosphates organiques du sol. Les mycorhizes 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 des hyphes mycéliens et dans le recyclage du phosphore immobilisé dans le sol sous forme organique par hydrolyse des esters phosphorylés. Le phosphore des composés organiques peu solubles passe ainsi sous forme d'orthophosphate (Mousain, 1989). La solubilisation des phosphates minéraux complexes résulterait des actions chimiques exercées dans la rhizosphère par les champignons mycorhiziens et les plantes-hôtes par excrétion de H^+ ou de HCO_3^- (Mousain, 1989). Ces polyphosphates constituent une réserve de phosphore mobilisable dans

le manteau des mycorhizes (Harley et Cready, 1981). La figure 29 détermine le cycle du phosphore dans le sol.

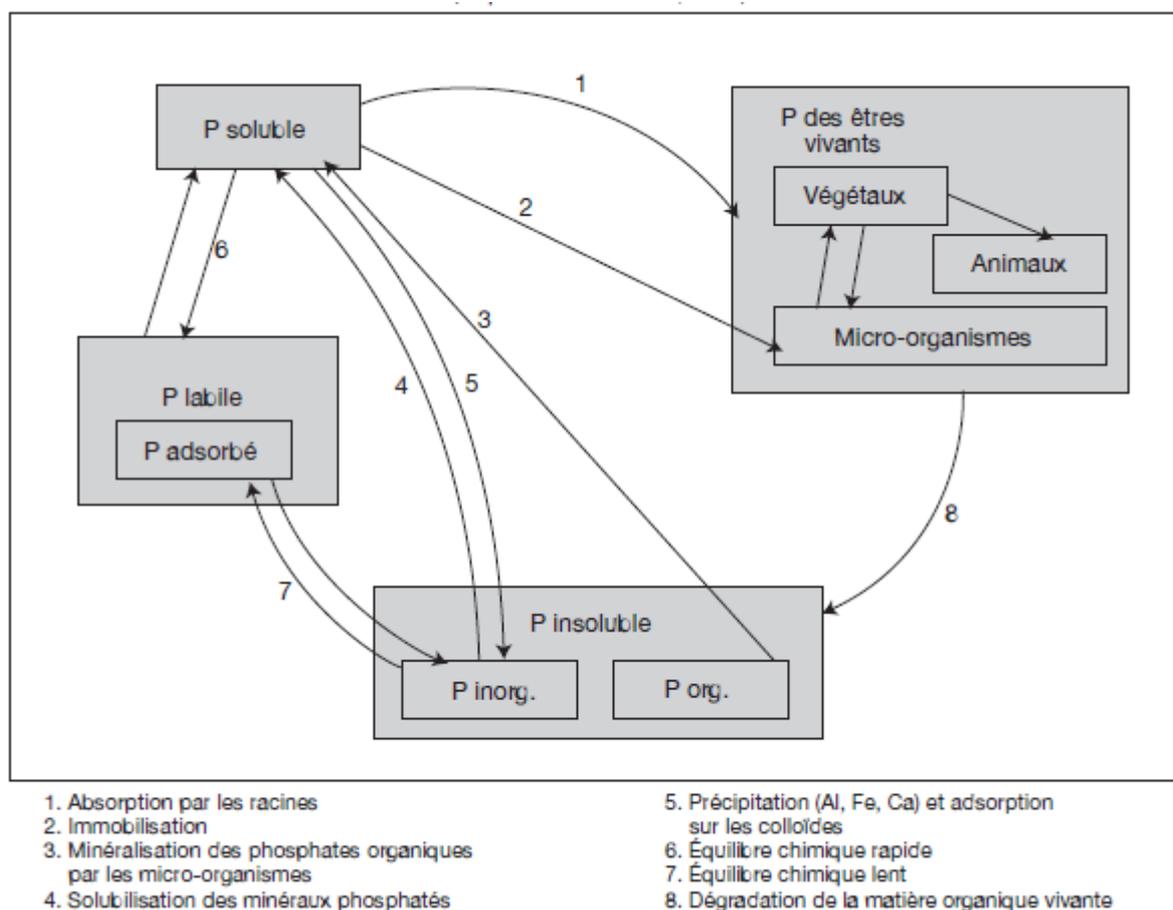


Figure 29: Le cycle du phosphore dans le sol

Source : Borie et Barea, 1981

3.3.2.2. Le rôle des endomycorhizes sur l'eau du sol

Des résultats spectaculaires ont été obtenus en ce qui concerne la teneur en eau dans le sol et dans les tissus végétaux. Il est apparu de manière évidente que les apports de CMA avaient favorisé une croissance végétative importante chez le manioc et une réduction de la concentration de la matière sèche dans les tissus du manioc devenant plus aqueux. (Delwaulle *et al.*, 1987) pensent même que naturellement l'eau et les minéraux peu mobiles du sol transitent par le champignon avant d'atteindre la plante. Il incombe cette affirmation au rôle-clé que joue la symbiose mycorhizienne dans l'alimentation des plantes. (Yagoob, 2015) définissait la valeur ajoutée transmise par les mycorhizes et insistait par le fait qu'ils :

- Augmentent le potentiel nutritionnel et hydrique des plantes

- Favorisent la survie des plantes et accroissent ainsi leurs résistances sur les stress environnementaux ;
- Maintiennent la diversité en milieu naturel et optimisent la diversité de la microflore du sol.

3.4. CONCLUSION

Les jachères herbeuses qui entourent les cases dans les zones forestières de la RDC sont peu exploitées à cause de leur faible fertilité. Les paysans préfèrent effectuer des longues distances pour retrouver la forêt qui, relativement est plus fertile pour y pratiquer l'agriculture. On assiste donc à un système agricole essentiellement basé sur l'itinérance sur brulis. Les possibilités de revaloriser ces espaces herbeuses épuisés par une agriculture irrationnelle existent et épargneraient aux paysans de parcourir des longues distances pour la recherche des terres fertiles et ainsi, éviterait une agriculture nomade et dévastatrice des écologies forestières déjà fragilisées par l'action anthropique. Le recours aux endophytes présents dans le milieu constituerait donc une alternative de choix pour maintenir ces espaces fertiles pour une intensification de l'agriculture. Ces endophytes assureraient une production durable des cultures de première consommation dont le manioc fait partie et ainsi, permettraient la conservation des espaces forestières. La maîtrise donc de la gestion de ces champignons constitue un tournant important dans l'agriculture telle qu'elle est actuellement pratiquée. C'est dans ce cadre que cette étude est menée et les résultats à ce stade indiquent une possibilité de multiplier les spores mycorhiziens *ex situ* sous sorgho et leur incorporation sous forme d'inoculum dans le champ de manioc. Leur présence n'a pas seulement occasionné une restauration rapide de la fertilité des sols avec des accroissements de rendement de l'ordre de 47 % en moyenne mais aussi, a participé de manière active à la mobilisation du phosphore malgré les conditions très acides des sols. Des modifications ont été observées sur le nombre et le calibre des racines dans les parcelles traitées avec l'inoculum des CMA. Les racines grossissent considérablement (diamètre moyen de 16 cm) sous CMA mais dans cette condition, la teneur en matière sèche de ces racines décroît de -23 % en moyenne chez *Kindisa* et *Liyayi*.

Chapitre 4 : Effet des champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA) sur la mobilisation du phosphore en sol acide des forêts tropicales et leur relation dans la biosynthèse du caroténoïde chez le manioc à pulpe jaune

4.1. 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, 1994 ; 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 rétinol 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 (dont le β -carotène = $C_{40}H_{56}$) 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 permettrait à la plante de synthétiser plus de carotènes pour jouer ce rôle. C'est alors qu'un bon contrôle du rapport 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 d'un programme de sélection génétique en République Démocratique du Congo qui vise la mise au point des variétés riches en β -carotène. Des progrès réels sont déjà observés dans 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 des 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, forme dont la concentration dans la solution du sol est très faible (un micro molaire = 1 μM) (Bolan, 1991 ; Mousain, 1989). L'absorption du phosphore par les racines des plantes se fait essentiellement sous la forme d'orthophosphate ($H_3PO_4^-$, HPO_4^{2-} , PO_4^{3-}). On note en plus que les CMA sont des biotrophes obligatoires qui, sans l'interaction avec la plante hôte qui leur fournit des éléments carbonés, ils 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 identifiées et dites hôtes est la méthode qui conviendrait le mieux pour développer des inocula capables de capitaliser les rôles essentiels attribués aux CMA. Cette étude vise à vérifier l'efficacité des endomycorhizes locaux des zones forestières sur la mobilisation des éléments minéraux du sol et plus particulièrement le

phosphore et aussi, établir une relation entre cette molécule et la concentration du caroténoïde dans la racine de manioc à chair jaune.

4.2. Matériels et méthodes

Un deuxième essai conduit pendant trois saisons consécutives consistait à appliquer des doses croissantes d'engrais phosphatés dans l'objectif d'évaluer les effets catalytiques du Phosphore dans la synthèse du caroténoïde.

4.2.1. Dispositif expérimental

Deux variétés de manioc dont *Kindisa* (2001/1661) actuellement identifiée comme riche en β -carotène était utilisée à côté de la variété *Liyayi* (avec faible teneur en β -carotène). Le Dispositif expérimental adopté pour cet essai est le factoriel 2 x 2 x 6 en split plots de 4 répétitions et repris pendant trois saisons consécutives dans le site de Lito. Un amendement calcaire est apporté dans des blocs alternés de l'essai pour ramener le pH autour de 7 ou soit à 6,5.

Les facteurs

Facteur 1 : Apport de la chaux agricole (2 niveaux) : avec et sans apport = facteur tertiaire

Facteur 2 : Deux variétés de manioc jaune : *Kindisa* et *Liyayi*= facteur secondaire

Facteur 3 : Apport des engrais minéraux (6 niveaux) = Facteur principale.

T0 = Sans apport

T1 = NPK (75-50-75) dose recommandée par des études antérieures (IITA-RDC)

T2 = NPK (75-25-75)

T3= NPK (75-75-75)

T4 = NPK (75 – 100 – 75)

T5 = NPK (75 – 125 – 75)

Le sol était labouré et hersé mécaniquement sans incinérer la végétation. La dimension de la parcelle principale était de 42 x 10 m, la parcelle secondaire avait 7 x 10 m et l'essai 87 x 46 m. On a observé des allées de 2 m entre les parcelles et les répétitions.

Besoins en engrais

Disposant des engrais suivants :

Pour l'Azote : Urée (46 % N)

Pour le Phosphore : Superphosphate Triple (TSP 45 % P₂O₅)

Pour le potassium : le K Cl (60 % K₂O) et

La combinaison : NPK 17-17-17

Tableau 7. Besoins en engrais suivant les traitements à observer

Dose	Type d'engrais	par ha (en Kg)	par pied (en g)	par Essai (en kg)
75 - 25 - 75	NPK 17-17-17	147,06	14,71	8,24
	Urée 46 % N	54,35	5,43	3,04
	KCl 60 % K ₂ O	41,67	4,17	2,33
	TSP 45 % P ₂ O ₅	-	-	-
75 - 50 - 75	NPK 17-17-17	294,12	29,41	16,47
	Urée 46 % N	108,70	10,87	6,09
	KCl 60 % K ₂ O	83,33	8,33	4,67
	TSP 45 % P ₂ O ₅	-	-	-
75 - 75 - 75	NPK 17-17-17	441,18	44,12	24,71
	Urée 46 % N	-	-	-
	KCl 60 % K ₂ O	-	-	-
	TSP 45 % P ₂ O ₅	-	-	-
75 - 100 - 75	NPK 17-17-17	441,18	44,12	24,71
	Urée 46 % N	-	-	-
	KCl 60 % K ₂ O	-	-	-
	TSP 45 % P ₂ O ₅	55,56	5,56	3,11
75 - 125 - 75	NPK 17-17-17	441,18	44,12	24,71
	Urée 46 % N	-	-	-
	KCl 60 % K ₂ O	-	-	-
	TSP 45 % P ₂ O ₅	111,11	11,11	6,22

Tableau 8. Besoins en engrais par type d'engrais et par essai

Engrais	Kg/essai
NPK 17-17-17	98,82
Urée 46 % N	9,13
KCl 60 % K ₂ O	7,00
TSP 45 % P ₂ O ₅	9,33
Total	124,29

Amendement calcaire

La quantité de chaux à apporter était calculée en fonction du pH et de la capacité d'échange cationique (% actuel en Al³⁺ échangeable qu'il faut ramener à au moins 15 % après titrage). La quantité de chaux utilisée pour neutraliser le pH était extrapolée à l'hectare pour avoir la dose réelle d'amendement calcaire.

4.2.2. Schéma du dispositif expérimental

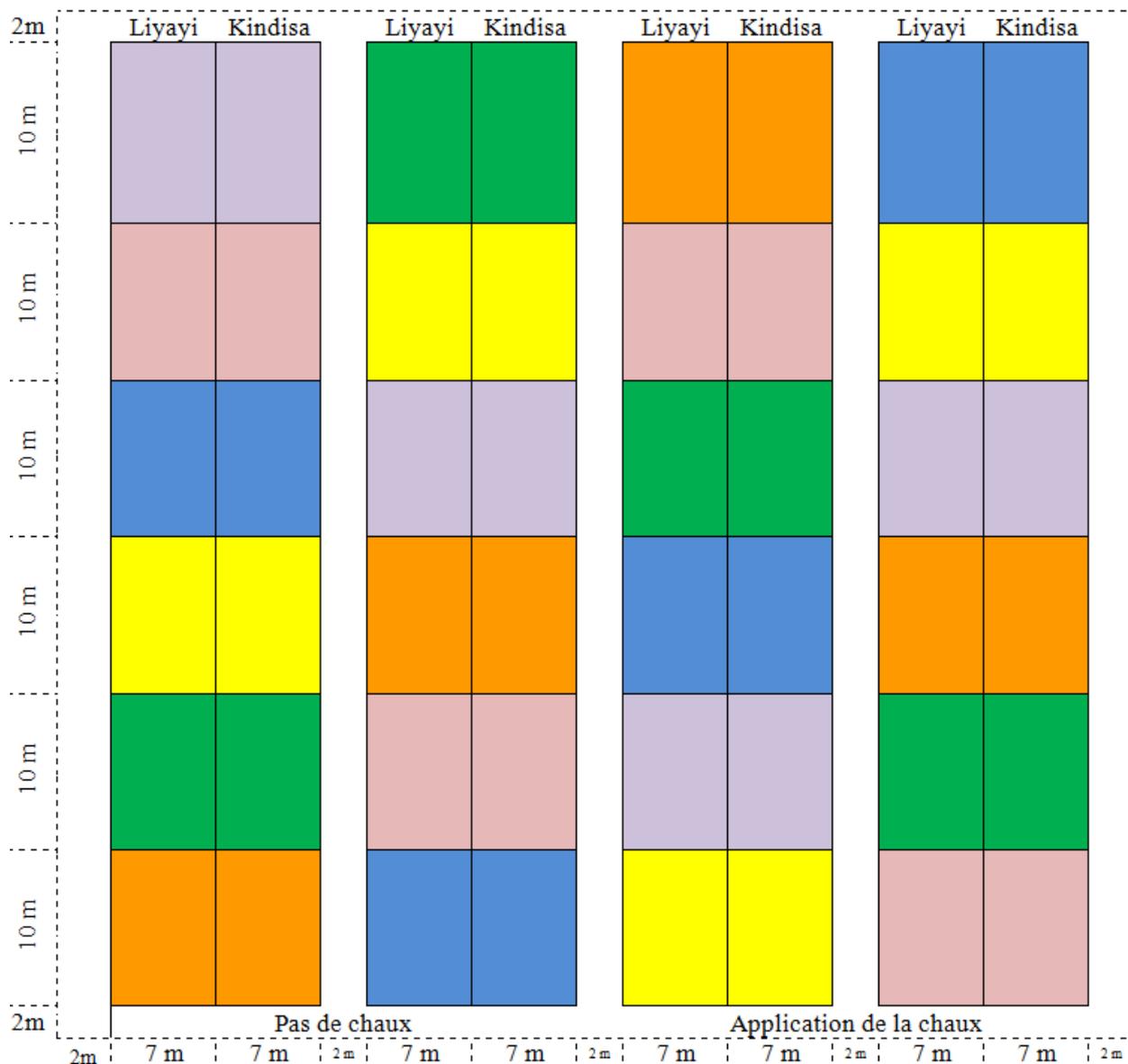


Figure 30: Schéma du dispositif expérimental sur l'évaluation du phosphore sur le caroténoïde du manioc

- T0 = NPK 0-0-0
- T1 = NPK 75-25-75
- T2 = NPK 75-50-75
- T3 = NPK 75-75-75
- T4 = NPK 75-100-75
- T5 = NPK 75-125-75

4.2.3. Dosage du caroténoïde par iCheck

Etape 1 : Préparation

Théoriquement la concentration totale de caroténoïdes (TCC) dans la racine de manioc peut être comprise entre 3 ppm et 15 ppm (3 - 15 µg/g).

L'échelle de mesure linéaire de l'appareil iCheck™ Carotène est située entre 0,15 mg/l et 25 mg/l.

Pour plus de précision, il est recommandé de mesurer les échantillons se trouvant au milieu de l'échelle linéaire de l'appareil. Pour iCheck™ Carotène, l'échelle recommandée pour la solution d'échantillon devant être injectée dans le flacon de réactif Carotène est de 1 à 20 mg/l.

La concentration moyenne de TCC espérée dans la racine de manioc étant de 6 µg/g. La racine doit être homogénéisée et diluée afin d'être analysée avec *iCheck Carotène*.

Exemple : Avec une dilution de 1/5, vous prenez 5 grammes de racine en purée et les mélanger avec de l'eau pour obtenir un volume total de 25ml

La concentration espérée dans la solution de manioc est de $6 / 5 = 1,2$ mg/l

Etape de préparation :

- Laver soigneusement la racine sous l'eau courante ;
- Enlever l'écorce de la racine ;
- Couper la racine pelée en 4 parties et Choisir les 2 parties opposées ;
- Se débarrasser des deux autres parties ;
- Couper les deux parties en cubes d'environ 0,5 cm de côté ;
- Mélanger soigneusement les morceaux coupés ;
- Séparer les morceaux en 4 groupes (piles) ;
- Prendre les 2 piles opposées et jeter les 2 autres ;
- Remélanger soigneusement les morceaux tranchés ;
- Emballer ces morceaux de racines tubéreuses et identifier l'échantillon sur l'emballage ;

- Préparer le plateau de pesée et équilibrer (calibrer la balance avec un standard 100 g si nécessaire). Marquer le plateau de pesée à l'aide d'un identifiant. Fixer le poids du plateau à zéro avant de peser la racine ;
- Peser à peu près 5 grammes de morceaux de racines tubéreuses. Noter le poids exact dans un fichier préparé ;
- Préparer un mortier et un pilon propre. Mettre tous les morceaux pesés dans le mortier (s'assurer qu'il ne reste aucun morceau sur le plateau de pesée) ;
- Marteler délicatement les morceaux de tubercules en conservant le pilon vertical ;
- Moudre jusqu'à obtenir une pâte très fine ;
- Utiliser de l'eau distillée (en bouteille) pour diluer l'échantillon ;
- Préparer un tube flacon à balance volumétrique de 50 ml et identifier-le avec le numéro d'échantillon correspondant.

- Mettre environ 5ml d'eau dans le mortier contenant la racine écrasée. Écraser soigneusement la racine jusqu'à obtenir une pâte fine et uniforme ;
- Verser la pâte de racine tubéreuse dans le tube flacon identifié. Utiliser environ 10 ml d'eau pour transférer toute trace de la racine tubéreuse restant dans le mortier vers le tube flacon ;
- Toute la racine écrasée devrait maintenant être dans le tube flacon de 50 ml identifié, remplissez le volume jusqu'à 25 ml.

Étape 2 : Injection de l'échantillon

- Préparer un flacon propre de réactif Carotène, une aiguille épaisse (1,6 x 25 mm) et une seringue 1 ml ;
- Agiter vigoureusement le tube flacon de 50 ml contenant l'eau et la racine tubéreuse afin d'obtenir une suspension homogène ;
- Immédiatement après avoir mélangé (ne laissez pas le manioc se déposer au fond du tube) et prendre jusqu'à environ 0,7 ml de suspension à l'aide de la seringue. Placer ensuite l'aiguille sur la seringue ;

NOTE : *Il est recommandé de vérifier que la suspension est assez liquide pour être aspirée par l'aiguille*

- Tenir la seringue en pointant l'aiguille vers le haut et tapoter doucement avec les doigts pour déplacer toutes les bulles d'air vers le haut ;
- Tenir la seringue en pointant l'aiguille vers le haut. Ajuster le volume de la suspension à exactement 0,4 ml. S'assurer que la partie large du piston à l'intérieur de la seringue soit exactement à 0,4 ml ;
- Injecter 0,4 ml de suspension dans le flacon de réactif (tenir la seringue et non le piston pendant l'injection) ;
- Identifier l'échantillon sur le haut du flacon.

Étape 3 : Extraction

- Agiter vigoureusement le flacon pendant 10 secondes. Le contenu du flacon devrait avoir l'apparence d'une solution uniforme ;
- Laisser le flacon debout pendant 5 minutes jusqu'à ce que la solution se sépare en 2 phases distinctes ;
- S'assurer que rien ne reste collé à l'intérieur du flacon au niveau de la phase claire supérieure. Si un morceau d'échantillon est coincé à l'intérieur, tapoter légèrement le flacon sur la surface solide pour dégager le morceau et réattendre la séparation des phases.

Attention

- Ne pas toucher le flacon sur les côtés ;

- Ne pas mesurer un flacon de réactif ne contenant pas une phase claire supérieure d'au moins 0,8 cm ;
- Ne pas stocker de flacons dans le réfrigérateur.

Étape 4 : Analyse

- S'assurer que la surface extérieure du flacon d'échantillon est propre avant de l'insérer dans l'iCheck™ ;
- Fixer l'iCheck™ Carotène sur le mode 'autre échantillon' ;
- Presser les touches de mesure et suivre les instructions affichées ;
- iCheck™ Carotène affichera les résultats en mg/l. Cette valeur indique la concentration totale de caroténoïdes (TCC) dans l'échantillon de la suspension injecté ;
- Noter dans le fichier le numéro de l'échantillon et du lot fourni par l'appareil avec l'échantillon correspondant ;
- Le flacon contenant l'échantillon doit être analysé avec iCheck entre 5 minutes et 1 heure après injection ;
- Ne pas mesurer directement sous la lumière du soleil ;
- Toujours mesurer entre 20 – 30°C

Étape 5 : Enregistrements et calculs

Multiplier la valeur affichée sur l'iCheck avec le facteur de dilution :

- Facteur de Dilution= [Volume de l'Échantillon Dilué en ml] / [Poids de l'Échantillon en g]
- [Résultat de l'iCheck en mg/l] x Facteur de Dilution = [TCC dans la racine tubéreuse de manioc en µg/g]
- Enregistrer toutes les valeurs dans UN fichier Excel 'Enregistrement pour Analyse TCC avec iCheck Carotène'

4.3. Résultats et discussion

4.3.1. Résultats

4.3.1.1. Evaluation du β-carotène (TCC), de la matière sèche et de l'amidon des racines suivant les variétés du manioc et les applications de l'inoculum d'endomycorhizes

Les comparaisons des traitements entre eux, entre les variétés de manioc et la combinaison de ces deux facteurs sont consignées dans le tableau 9. 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 9. 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 AMF	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 AMF 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 AMF	10,89	12,83	20,64	19,99	19,99	23,55	5,979	4,107	29,7	54,9
Engrais (NPK) + inoculation AMF	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	
LSD AxB	1,491		4,401		2,737		0,5096		16,57	

Il ressort du tableau 9 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 mg.kg⁻¹ sont obtenues lorsqu'on a induit l'inoculum des CMA dans le traitement. Ces valeurs sont faibles et sont autour de 5,5 mg.kg⁻¹ lorsque l'inoculum des CMA n'est pas incorporé dans le traitement. De la même manière, il apparaît aussi chez *Liyayi* (génétiquement pauvre en carotène) que les traitements ont produit une influence statistiquement significative sur le TCC. Les moyennes sont autour de 4,8 mg.kg⁻¹ lorsqu'il y a présence dans le traitement de l'inoculum des CMA. Les valeurs chez *Liyayi* décroissent autour de 3,5 mg.kg⁻¹ lorsqu'on n'incorpore pas l'inoculum des CMA dans le traitement (LSD.05= 0,3603 mg.kg⁻¹, p < .001). Suivant les variétés de manioc en présence, on constate chez *Kindisa*, variété actuellement en diffusion à cause de son TCC élevé que la moyenne de son TCC est de 6,06 mg g⁻¹ tandis que chez *Liyayi*, cette moyenne est de 4,23 mg.kg⁻¹ (LSD.05 = 0,1699 mg.kg⁻¹). 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 (figure 31). 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 19,9 à 21,9 % chez *Kindisa* et de 22,4 à 24,1 % 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.

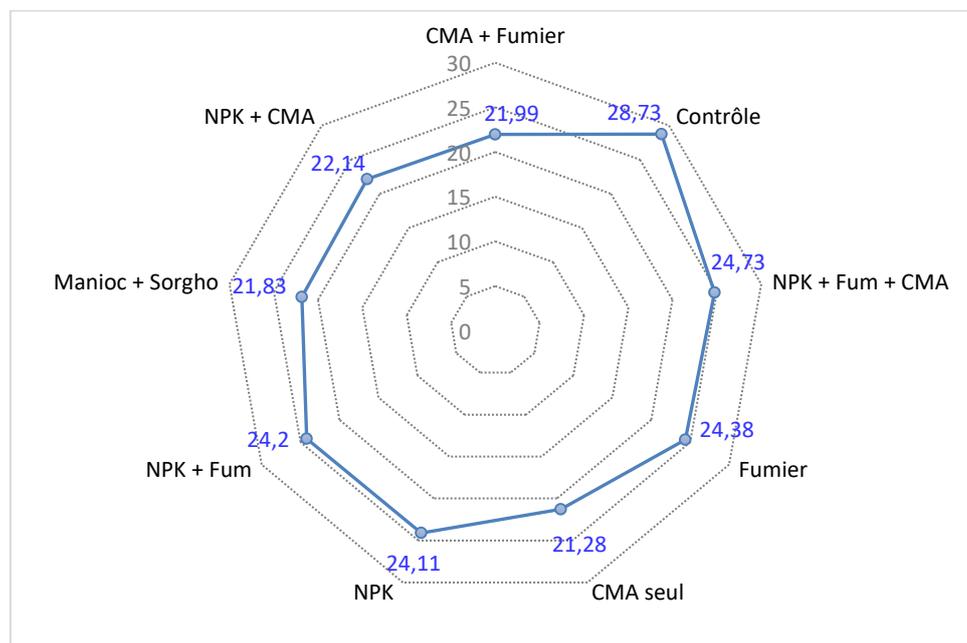


Figure 31: Toile présentant la matière sèche (en %) suivant les traitements appliqués au sol

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). Ensuite s'observent des différences hautement significatives entre les traitements en ce qui concerne le rendement frais (tableau 9). 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 (figure 32).

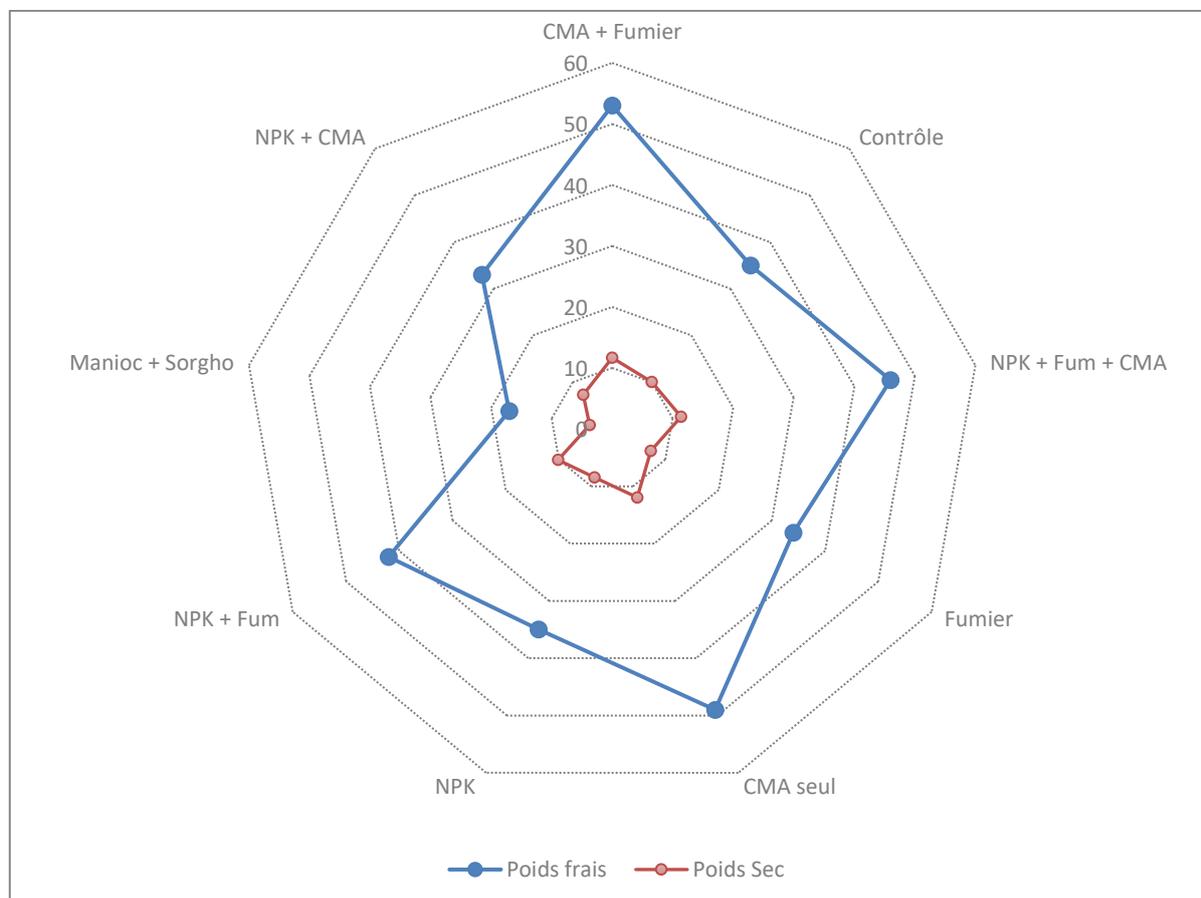


Figure 32 : Toile présentant le Rapport entre le rendement frais ($t\ ha^{-1}$) et le rendement sec ($t\ ha^{-1}$) des racines tubéreuses suivant les traitements appliqués au sol

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 ($LSD.05 = 2,01\ t\ ha^{-1}$).

4.3.1.2. 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. Cependant, des différences sont obtenues pour l'azote et le phosphore. 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 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 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 10. Evaluation des éléments du sol suivant les divers traitements apportés au sol

Traitements	Azote (mg.g-1)		Phosphore (ppm)		Carbone total (% CO)		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 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, 34,59 t. ha⁻¹ dans le témoin et 34,72 t. ha⁻¹ après application du NPK. Aussi, les

accroissements en phosphore étaient observés lorsqu'on apportait les spores mycorhiziennes sous forme de inocula (figure 33).

Relations Phosphore- Acidité- caroténoïde total et Rendement chez le manioc

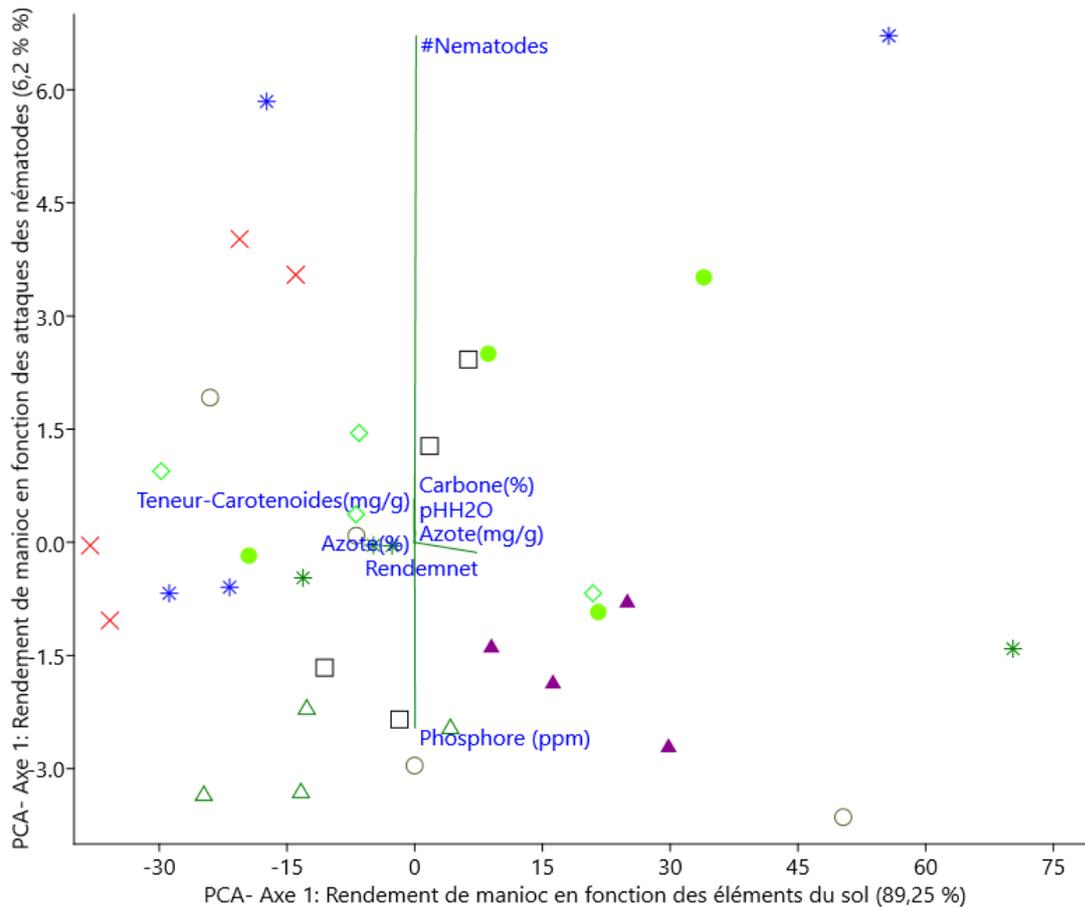


Figure 33 : Biplot des principales variables observées (rendement du manioc, TCC, pH, matière sèche et Phosphore)

De la figure 33, il ressort en ce qui concerne le niveau de phosphore, qu'il 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 apparaît 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 sur le graphique 40. 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.

L'analyse corrélative entre différentes variables (tableau 11) indique des dispersions très remarquables.

Tableau 11. Corrélations entre les variables observées

r	TCC	Phosphore	Matière sèche	pH	Rendement
TCC	0	0.30966*	0.0016717	32.10 ⁻⁵	0.018695
Phosphore	0.25373	0	0.0066124	0.98721**	0.93774**
Matière sèche	-0.68598	-0.6149	0	0.0072353	0.64801*
pH	0.81926**	0.0040719	-0.60959	0	0.16225
Rendement	-0.54745	0.019833	0.11554	-0.34395	0

Ainsi il existe une corrélation positive entre la teneur en caroténoïde total 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 (figure 34).

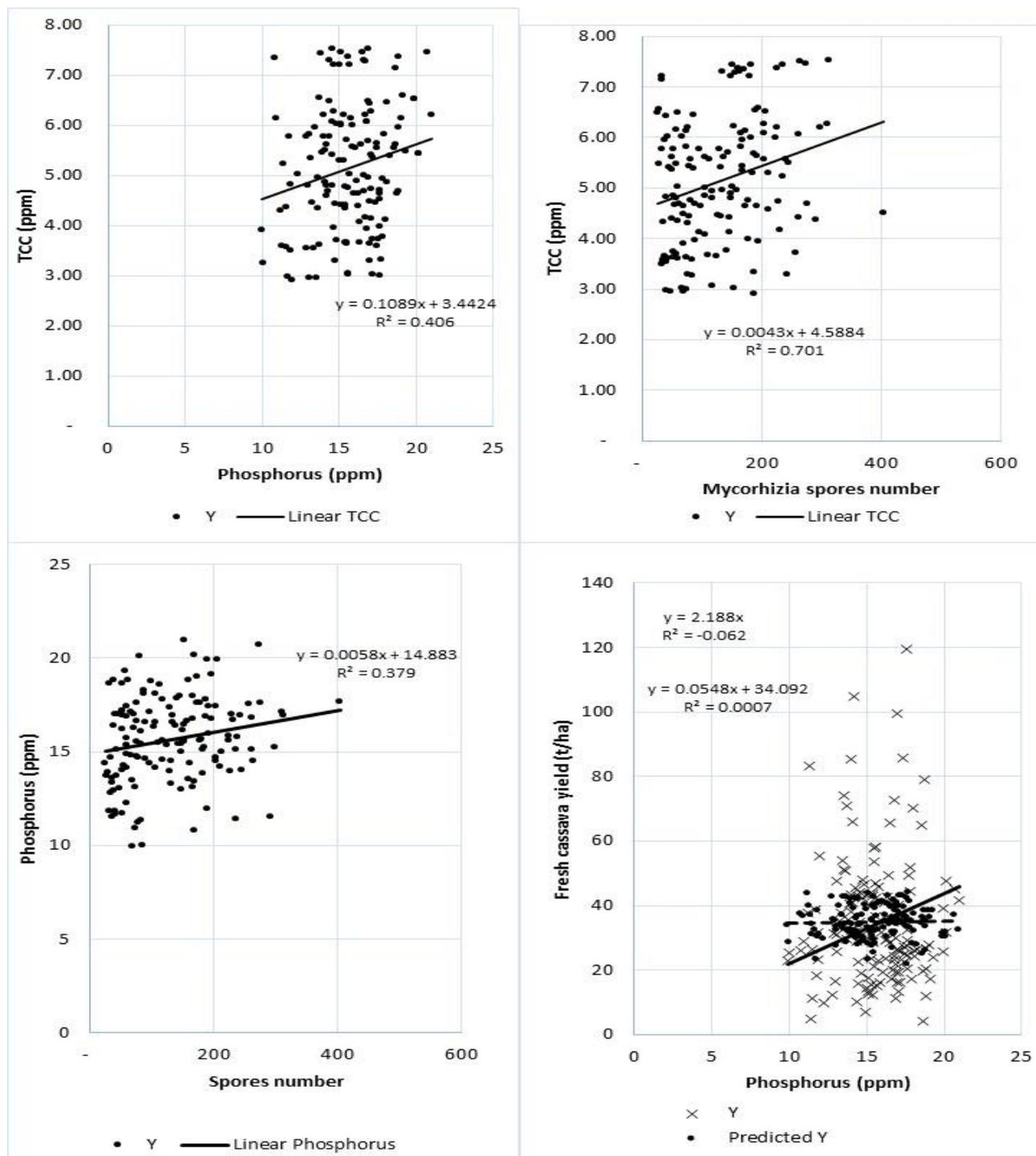


Figure 34: Régressions linéaires entre les variables observées

Ainsi des coefficients de détermination (R^2) faibles sont observés lorsqu'on compare la teneur du phosphore dans le sol par rapport au rendement du manioc en poids frais $R^2 < 0,07\%$. Ceci exprime un manque de relation entre cet élément du sol et le rendement du manioc obtenu. Entretemps, des droites ascendantes sont obtenues lorsqu'il est question de vérifier si la teneur du phosphore dans le sol a une implication sur la synthèse du β -carotène dans les racines de manioc. On peut donc conclure que plus le phosphore est présent dans le sol, plus il y a

accumulation du β -carotène dans les racines du manioc. Dans le même sens, on observe les mêmes tendances des droites lorsqu'il s'agit de comparer le nombre de spores mycorhiziennes dans le sol par rapport à la concentration du carotène et le nombre de spores mycorhiziennes par rapport à la mobilisation du phosphore dans le sol. Il existe donc une relation entre la présence des spores mycorhiziennes dans le sol, la concentration du phosphore dans le sol ($R^2= 37\%$) et l'accroissement du TCC.

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. Les corrections de pH étaient réalisées grâce à l'application d'un amendement calcaire de fond (voir méthodologie).

Tableau 12. Rendement, teneur en caroténoïde total et en matière sèche des racines de manioc après apports des doses croissantes de phosphore et de la chaux calcaire sur deux variétés de manioc.

Variétés (1)	Dose Phosphore (2)	Sans chaux (3)			Avec chaux (3)			Les moyennes		
		Rendement frais (t ha-1)	TCC (µg/g)	MS %	Rendement (t ha-1)	TCC (µg/g)	MS %	Rendement frais (t ha-1)	TCC (µg/g)	MS %
Kindisa	0 - P	14,03	6,73	29,80	17,42	7,7	31,30	15,72	7,22	30,55
	25 - P	19,39	6,33	31,80	20,33	7,3	30,71	19,86	6,82	31,25
	50 - P	18,41	6,79	28,70	21,65	6,9	29,45	20,03	6,85	29,07
	75 - P	10,96	6,3	30,62	16,59	8,2	30,07	13,77	7,25	30,34
	100 - P	23,46	7,25	30,94	28,15	8,5	29,23	25,80	7,88	30,08
	125 - P	17,93	6,52	30,15	22,1	8,3	31,28	20,02	7,41	30,71
Moyenne de Kindisa		17,36	6,65	30,33	21,04	7,82	30,34	19,20	7,24	30,34
Liyayi	0 - P	22,82	3,59	36,20	24,99	4,1	35,95	23,91	3,85	36,07
	25 - P	23,33	3,32	35,11	29,3	3,6	32,01	26,31	3,46	33,56
	50 - P	27,05	3,73	34,35	27,11	3,3	34,93	27,08	3,52	34,64
	75 - P	25,11	3,89	36,70	31,2	4	35,08	28,15	3,95	35,89
	100 - P	28,97	3,49	38,26	31,47	4,5	37,22	30,22	4,00	37,74
	125 - P	22,22	3,71	35,22	35,31	4,7	35,76	28,76	4,21	35,49
Moyenne de Liyayi		24,91	3,62	35,97	29,90	4,03	35,16			
Moyenne		21,14	5,14	33,15	25,47	5,93	32,75			
LSD.05 Variétés (1)		4,11	2,89	5,27	6,03	3,12	ns			
LSD.05 Dose Phosphore (2)		9,23	ns	ns	7,37	1,66	ns			
LSD.05 Calcaire (3)		4,68	1,42	ns						
LSD.05 (1) x (2)		4,51	2,46	4,07	8,11	2,25	ns			
LSD.05 (1) x (3)		3,35	1,05	ns						
LSD.05 (2) x (3)		8,23	1,79	5,44						
LSD.05 (1) x (2) x (3)		7,13	2,21	ns						
CV %		17,23	21,44	7,32	11,48	13,85	22,27			

Suivant le tableau 12 ci-dessus, il ressort ce qui suit :

- L'acidité du sol a eu une influence sur l'absorption du phosphore par les racines du manioc et par conséquent sur la biosynthèse du caroténoïde. Les valeurs passent de 6,65 µg/g à 7,82 µg/g (LSD.05 = 1,05 µg/g) chez *Kindisa* et de 3,62 µg/g à 4,03 µg/g chez *Liyayi*. En quelque sorte, on sait comprendre qu'en condition de forte acidité du sol, une bonne partie du phosphore incorporé sous-forme de fertilisant minéral est complexé par les cations acides du sol et ne peut jouer le rôle catalytique lui attribué dans la synthèse du caroténoïde.
- La réduction de l'acidité influe sur le rendement du manioc en racines fraîches parce qu'elle permet une bonne absorption des éléments minéraux par la plante. On a obtenu un rendement moyen de 17.36 t. ha⁻¹ chez *Kindisa* lorsque le sol n'était pas chaulé et 21.04 t. ha⁻¹ lorsqu'il l'était (LSD.05 = 3.35 t. ha⁻¹).
- La teneur en matière sèche dans les racines ne dépend pas de l'acidité du sol et/ou de la prédominance ou non du phosphore dans le sol. Cette matière sèche a varié de manière non significative chez *Kindisa* de 30,33 à 30,34 % suivant qu'on incorporait ou non la chaux dans le sol. La variation est dans les proportions de 35,97 à 35,16 % chez *Liyayi* respectivement lorsqu'on apporte ou pas la chaux.

Les différences ne sont pas statistiquement significatives en ce qui concerne le caroténoïde total dans les racines tubéreuses de manioc pour les doses de phosphore apportées lorsque le sol n'est pas préalablement chaulé et cela quel que soit la variété de manioc. Les moyennes obtenues sont respectivement de 6,3 µg/g, 6,52 µg/g, 6,73 µg/g, 6,79 µg/g et 7,25 µg/g chez *Kindisa* en sol non chaulé avec des apports respectifs de 25 et 75 kg P/ha, 125 kg P/ha, 0 kg P/ha, 50 kg P/ha et 100 kg P/ha.

Les mêmes tendances sont observées chez *Liyayi* avec des moyennes non significatives entre les doses de phosphore apportées et les moyennes respectives de TCC évaluées 3,32 µg/g, 3,49 µg/g, 3,59 µg/g, 3,71 µg/g, 3,73 µg/g et 3,89 µg/g sont obtenues lorsque les doses apportées sur un sol non chaulé sont respectivement de 25, 100, 0, 125, 50 et 75 kg de Phosphore par hectare.

Lorsqu'on a apporté la chaux au sol, le pH était passé de 4,8 à 6,6 et grâce à cette modification, une amélioration de la valeur de TCC de l'ordre de 17,6 % était observée dans la synthèse du caroténoïde chez *Kindisa* et de 11,3 % chez *Liyayi* (figure 35).

En comparant les différentes doses de phosphore dans le sol soumis au chaulage, il apparaît que l'apport de 100 kg P/ha est la plus favorable car il occasionne un TCC évalué à 8,5 µg/g chez *Kindisa*. Ce TCC est plus faible à 50 kg P/ha avec 7,3 µg/g. La réponse de la variété

Kindisa au Phosphore indique que plus la teneur en cet élément était augmentée dans le sol, plus aussi le TCC était relativement croissant chez cette variété et lorsque l'acidité était corrigée. Les apports en phosphore en sol acide sont irrationnels car une bonne partie est immédiatement rendue indisponible par les actions acides du sol (environ 20 %).

Chez *Liyayi*, cette tendance apparaît aussi dans une moindre mesure car avec les doses de 100 et 125 kg P/ha, on a obtenu des TCC respectifs de 4,5 et 4,7 µg/g. Ces teneurs étaient plus faibles avec les doses respectives de 50 et 25 kg P/ha et évaluées à 3,3 et 3,6 µg/g (LSD.05 = 1,66 µg/g).

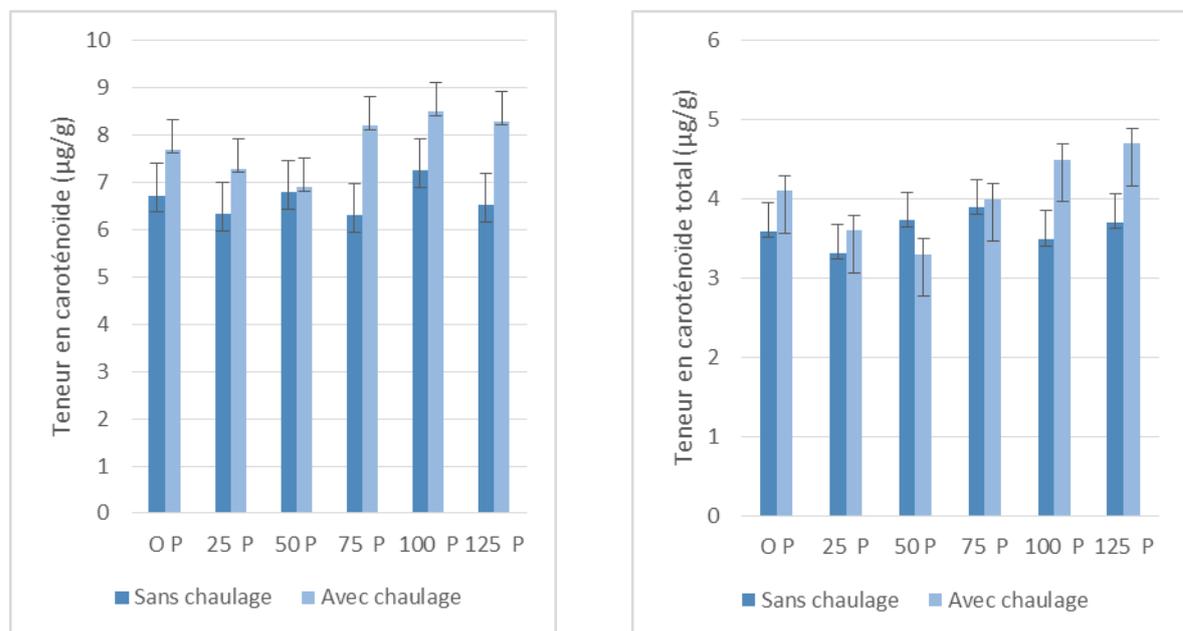


Figure 35: Teneur en caroténoïde total sous l'application de la chaux (dolomite) et des doses variées de phosphore. A gauche avec la variété de manioc *Kindisa* et à droite avec la variété de manioc *Liyayi*

4.3.2. Discussion (Objectifs spécifiques 2 et 3)

Il a été observé une amélioration de la disponibilité 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 des accroissements en phosphore de l'ordre de 26,1 % chez *Kindisa* et 30,8 % chez *Liyayi*. Ces résultats sont confirmés par (Bolan, 1991 et Mousain, 1989) 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'il 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, 1996) qui a émis que les champignons

mycorhiziens, intimement associés aux tissus du végétal au niveau 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 grain 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. 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 tendaient à augmenter la teneur en eau et la biomasse des feuilles de niébé. Ils ont en revanche constaté une diminution de la concentration en éléments minéraux dans les feuilles qu'ils attribuent à l'augmentation de la teneur en eau.

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 énonce que le phosphore sous une forme moléculaire particulière participe essentiellement dans la synthèse du β -carotène. Les accroissements du TCC 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).

4.4. Conclusion

La particularité de biotrophie obligatoire des CMA ne permet pas leur multiplication aisée *in vitro* afin de produire des inocula commerciaux susceptibles d'être utilisés dans la gestion de la fertilité des sols. Le recours à l'extraction des spores mycorhiziennes sous des plantes hôtes telles que le sorgho demeure la piste la plus en vue pour rationaliser les applications des CMA en milieu contrôlé. Il vient d'être prouvé que leur implication en sol acide des tropiques modifie l'assimilation des éléments minéraux du sol dont principalement le phosphore. Ils ont permis des modifications de la teneur en phosphore assimilable de l'ordre 26 % chez la variété *Kindisa* et 31 % chez la variété *Liyayi*. Grace donc à cette performance, on a aussi compris que les accroissements du phosphore ont un rôle catalytique sur l'intensification de la biosynthèse du caroténoïde des racines jaunes du manioc. Les TCC sont passés de 5,2 mg.kg⁻¹ à 6,8 mg.kg⁻¹ (31,3 %) chez *Kindisa* et de 2,4 mg.kg⁻¹ à 5,1 mg.kg⁻¹ (57,3 %) chez *Liyayi* lorsqu'on inocule le sol aux CMA.

Chapitre 5 : Les considérations agro-économiques sur les applications et implications des CMA dans le système agricole en zone forestière

Résumé

Une évaluation économique sur les rendements de manioc en racines fraîches obtenus à partir des traitements appliqués a été réalisée. Des coûts marginaux sont obtenus après application des différents traitements et de la même manière, les recettes supplémentaires (revenu marginal) sont aussi réalisées à partir des accroissements de rendements (dus aux effets de traitements apportés au sol). Les coûts marginaux obtenus sont de 121 \$/ha, 63 \$/ha, 108 \$/ha, 360 \$/ha, 229 \$/ha, 481 \$/ha, 468 \$/ha et 589 \$/ha respectivement dans les traitements Inoculum CMA seul, Association manioc + sorgho, Fumier seul, Engrais NPK, Inoculum de CMA + Fumier, Inoculum des CMA + Engrais NPK, Fumier + Engrais NPK et Inoculum des CMA + Engrais NPK + Fumier. Cependant les revenus marginaux occasionnés par ces coûts sont de 1217,5 \$/ha, -388 \$/ha, 459 \$/ha, 506,5 \$/ha, 1404,5 \$/ha, 408,5 \$/ha, 885,5 \$/ha et 1076 \$/ha respectivement pour les traitements Inoculum CMA seul, Association manioc + sorgho, Fumier seul, Engrais NPK, Inoculum de CMA + Fumier, Inoculum des CMA + Engrais NPK, Fumier + Engrais NPK et Inoculum des CMA + Engrais NPK + Fumier. Avec ces chiffres du coût marginal et du revenu marginal, les Taux Marginaux de Rentabilité (TMR) étaient ressortis pour déterminer la rentabilité effective des traitements apportés. A partir de la référence de $TMR \geq 0,5$ le calcul de ce taux a donné les valeurs ci-après : $1,39 \geq 0,5$ pour Inoculum des CMA seul, $-0,47 \leq 0,5$ pour l'Association sorgho + Manioc, $0,53 \geq 0,5$ pour le fumier seul, $0,45 \leq 0,5$ pour l'engrais NPK, $1,42 \geq 0,5$ pour Inoculum des CMA + Fumier, $0,33 \leq 0,5$ pour Inoculum des CMA + Engrais NPK, $0,72 \geq 0,5$ pour le fumier + l'engrais NPK et $0,8 \geq 0,5$ pour le fumier + Engrais NPK + Inoculum CMA.

5.1. Introduction

Il est important d'évaluer les techniques qui sont sous une expérimentation pour en définir non seulement le niveau de performance mais aussi leur rentabilité en vue de leur adoption éventuelle par les exploitants agricoles. Des analyses sommaires de coûts et profits des systèmes agricoles testés dans cette étude sont présentées dans ce chapitre. Plusieurs techniques et technologies sont mises au point par les chercheurs mais les évaluations économiques ne sont souvent pas établies et ne permettent pas de dégager un repère pour les adoptions futures de ces innovations auprès de bénéficiaires qui pour la plupart de cas, s'avère être les petits exploitants dits 'paysans'. S'il est vrai que les systèmes agricoles tels qu'ils sont

pratiqués aujourd'hui par la majorité des exploitants laissent à désirer, il est autant aussi plus vrai que les évaluations économiques de ces techniques restent nébuleuses et très peu d'études seulement se penchent sur les avantages et/ou les inconvénients économiques qu'offrirait la pratique de l'agriculture itinérante sur brûlis par exemple.

En RDC, des nombreuses recherches se penchent sur les activités des ménages agricoles et des efforts sont consentis ces dernières années par de nombreux organismes et institutions tant étatiques que privées. L'objectif est d'évaluer les changements qui sont occasionnés par les introductions des innovations dans les systèmes de production des agriculteurs tout en prenant en compte la gestion des écologies pour une durabilité de ces systèmes. Pour y parvenir, des pratiques agronomiques scientifiquement expérimentées doivent impérativement s'autoévaluer pour plus de crédibilité auprès des consommateurs de ces innovations. (Garrity, 2004) par exemple estime que les pays tropicaux et équatoriaux ont basé leur agriculture sur les associations des cultures pour la rendre plus rationnelle à cause de la fragilité des sols, des excès de lumière sur le sol, de la pratique de l'économie d'autosubsistance et la présence d'une main d'œuvre familiale. Cependant, il pense que si la lutte contre l'érosion, la limitation de l'évapotranspiration et la diversité de produits consommables sont les résultats positifs de cette association des cultures, il insiste pourtant de se rassurer si cette pratique procure plus de revenus par rapport au système monospécifique des cultures. Des évaluations agro-économiques seules peuvent répondre à cette problématique et dans le cadre de cette étude, les apports effectués sur la culture du manioc ont été évalués afin de dégager leur rentabilité effective.

5.2. Matériels et méthodes

5.2.1. Calcul du coût de production

Le coût de production est obtenu par la méthode arithmétique consistant à dégager les différentes charges d'exploitation avec pour quotient les recettes brutes issues de la vente de la production y relative.

$$\text{Ainsi, } CP = \sum \frac{C1+C2+C3+\dots+Cn}{R}$$

Avec CP = Coût de production, $C1 + C2 + C3 + \dots + Cn$ = charges d'exploitation entraînant une production et R= Les recettes obtenues à la vente des produits obtenus après les dépenses.

5.2.2. Analyse de la rentabilité économique

L'étude de la rentabilité économique a été faite par la méthode de Taux Marginal de Rentabilité (TMR) conformément aux recommandations du manuel méthodologique d'évaluation économique de CYMMIT rédigé en 1989. La méthode utilisée pour trouver la rentabilité économique comprend pour chaque site les étapes suivantes :

- 1) L'élaboration d'un budget partiel pour chaque traitement (nous avons considéré uniquement les traitements applications des types de fertilisation du manioc et les variétés de manioc). Ceci comprend à son tour les sous-étapes suivantes :
 - a. L'estimation de la valeur de la production (produit brut) correspondant aux différents traitements incorporés dans l'essai.
 - b. L'énumération des différents intrants et/ou opérations utilisées et l'estimation de leur valeur.
 - c. Le calcul du revenu net (égal au produit brut diminué de la valeur des intrants utilisés, sauf le capital) pour chaque traitement.
- 2) Le calcul, pour chaque traitement, du taux marginal de rentabilité (TMR), c'est-à-dire du rapport du bénéfice net additionnel aux coûts additionnels entraînés par l'adoption de niveaux croissants de l'intrant. Autrement dit, une mesure de ce que gagne le paysan en termes de revenu net quand il dépense des sommes de plus en plus importantes pour produire

Le TMR acceptable que nous avons considéré pour la rentabilité de l'exploitant moyen est celui recommandé par CIMMYT, soit 0,5 (CIMMYT, 1989).

Les formulations pour l'obtention du TMR sont :

$$TMR = \frac{RM}{CT} \text{ avec } RM = \text{Revenu Marginal et } CT = \text{Coût Total avec}$$

$$RM = \frac{\sum \text{Revenus dus aux augmentations de rendement (par les traitements)}}{\text{Revenu de la vente des produits du Contrôle}} \text{ et}$$

$$CT = \sum \text{frais engagés pour réaliser la production}$$

5.3. Résultat et discussion

5.3.1. Résultat

5.3.1.1. Le coût de production

Les techniques incluant les applications de l'inoculum des champignons mycorhiziens arbusculaires ont occasionné quelques coûts supplémentaires dus à la multiplication *ex situ* des spores mycorhiziennes en vue de la préparation des inocula. Les coûts marginaux (variables) dus aux apports des fertilisants sont de \$ US 121/ha pour l'inoculum apporté seul, \$ US 63/ha lorsque le manioc est associé au sorgho (multiplication des spores mycorhiziens *in situ*), 108 \$ US/ha lorsqu'on apporte le fumier de ferme seul comme moyen de fertilisation du manioc, \$ US 360 /ha lorsqu'on apporte les engrais minéraux dans les conditions de la ville de Kisangani où 50 kg d'engrais coûtent en moyenne \$ US 100. \$ US 229/ha lorsque le fertilisant associe l'inoculum au fumier de ferme, \$ US 481/ha lorsque l'inoculum est associé à l'engrais minéral, \$ US 468/ha lorsque le fumier est associé à l'engrais minéral et 589 \$ lorsqu'il y a combinaison de divers fertilisants c'est-à-dire l'engrais minéral, le fumier de ferme et l'inoculum des champignons mycorhiziens arbusculaires.

5.3.1.2. Le revenu marginal

Les applications des divers intrants ont permis ou pas une modification de la production du manioc. Les rendements obtenus suivant les apports effectués ont été évalués et ont permis de dégager le revenu marginal important dans le calcul du Taux Marginal de rentabilité.

Ces revenus marginaux occasionnés par les augmentations de production dues aux apports de fertilisants sont de \$ US 1217.5 /ha pour l'inoculum apporté seul, \$ US - 388 /ha lorsque le manioc est associé au sorgho (multiplication des spores mycorhiziens *in situ*), \$ US 459/ ha lorsqu'on apporte le fumier de ferme seul, \$ US 506.5 /ha lorsqu'on apporte les engrais minéraux et le prix de vente du manioc frais sur le marché local donne une moyenne de 0.05 \$ le Kg. \$ US 1404.5/ha lorsque qu'on combine l'inoculum au fumier de ferme, \$ US 408.5/ha lorsque l'inoculum est associé à l'engrais minéral, \$ US885.5/ha lorsque le fumier est associé à l'engrais minéral et 1076 \$ lorsqu'il y a combinaison de divers fertilisants c'est-à-dire l'engrais minéral, le fumier de ferme et l'inoculum des champignons mycorhiziens arbusculaires.

5.3.1.3. Le taux marginal de rentabilité

Ce coefficient (taux marginal de rentabilité) est dit rentable lorsqu'il est \geq à 0.5 et en observant les différents traitements pris en compte dans cette thèse, les valeurs obtenues peuvent être illustrées dans la figure 36.

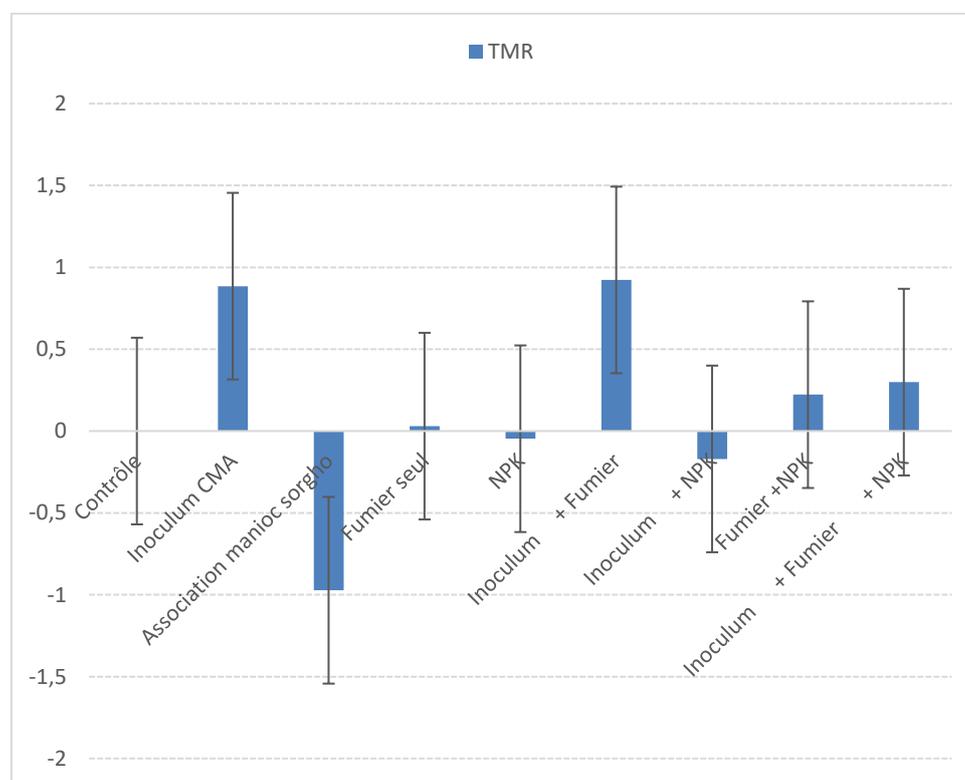


Figure 36: Amplitudes des Taux marginaux de rentabilité économique suivant les apports de fertilisants

Les valeurs sont positives et au-delà du seuil de 0.5 lorsqu'on a apporté au sol l'inoculum de champignons mycorhiziens seul et lorsque cet inoculum est associé au fumier de ferme. Ensuite, il ressort aussi que les pratiques de fertilisation consistant à apporter le fumier associé à l'engrais minéral, l'inoculum associé au fumier et à l'engrais minéral et dans une moindre mesure, le fumier seul permet d'obtenir un revenu net relativement plus grand que le lorsque le champ n'est pas fertilisé mais non rentable économiquement. Cependant, la non fertilisation du manioc, les associations du manioc au sorgho et les applications de l'inoculum combiné avec l'engrais minéral et l'engrais minéral apporté seul ne sont pas à recommander dans le système de production du manioc si on veut obtenir un profit.

Tableau 13. Calcul du taux Marginal de rentabilité économique des systèmes de production testés

Paramètres	Contrôle	Inoculum CMA	Association manioc- Sorgho	Fumier seul	NPK	Inoculum + Fumier	Inoculum + NPK	Fumier + NPK	Inoculum + Fumier + NPK
Rendement contrôle (t/ha)	24,6	24,6	24,6	24,6	24,6	24,6	24,6	24,6	24,6
Rendement autres traitements (t/ha)	24,6	48,9	16,8	33,8	34,7	52,7	32,8	42,3	46,1
Revenu contrôle (\$)	1229,5	1229,5	1229,5	1229,5	1229,5	1229,5	1229,5	1229,5	1229,5
Revenu autres traitements (\$)	1229,5	2447,0	841,5	1688,5	1736,0	2634,0	1638,0	2115,0	2305,5
Coût contrôle (\$)	758,0	758,0	758,0	758,0	758,0	758,0	758,0	758,0	758,0
Coût autres traitements (\$)	758,0	879,0	821,0	866,0	1118,0	987,0	1239,0	1226,0	1347,0
Marge brut (\$)	471,1	1689,0	83,5	930,5	978,0	1876,0	880,0	1357,0	1547,0
Coût marginal (\$)	0,0	121,0	63,0	108,0	360,0	229,0	481,0	468,0	589,0
Revenu net (\$)	-286,5	810,0	-737,5	64,5	-140,0	889,0	-359,0	131,0	200,5
Revenu marginal (\$)	0,0	1217,5	-388,0	459,0	506,5	1404,5	408,5	885,5	1076,0
TMR	0,0	1,4	-0,5	0,5	0,5	1,4	0,3	0,7	0,8

5.3.2. Discussion

Le choix d'une pratique culturale doit nécessairement tenir compte de sa rentabilité économique. Cependant au niveau du petit exploitant, le niveau d'instruction de la plupart des ménages agricoles ne permet pas de faire ce genre d'évaluation.

Les coûts et profits occasionnés par les divers apports en fertilisants ont été évalués et il en est ressorti que l'utilisation de ces intrants ont entraîné des charges supplémentaires. Dans une étude conduite au Nigeria, (Nsikan, 2013) avait pensé que la taille du ménage et les coûts de la main-d'œuvre d'autant qu'elles soient empruntées et embauchées et/ou familiales ont une influence significative sur l'évaluation des charges au niveau des exploitations familiales. Pour lui, le choix de la main-d'œuvre, les intrants agricoles, le niveau d'éducation, le revenu et l'âge des agriculteurs influencent significativement la production et le coût de production du manioc. Il estime que le travail familial n'est généralement pas évalué en termes des charges dans le système naturel d'exploitation agricole chez le paysan. Selon lui toujours, il conclut que cela affecte fortement le coût de production et par conséquent, le revenu net (en valeur réelle) de l'exploitation. Le paysan ne sortira pas aisément de sa pauvreté tant qu'il ne parviendra pas toujours à évaluer sa production. Ceci est une condition sine qua none pour parvenir à la fixation de prix capable de générer des bénéfices.

Les facteurs socio-économiques comprenant l'âge, le niveau de scolarité, l'état matrimonial, le sexe, les sources du travail, la sensibilisation aux services de vulgarisation, les méthodes de

désherbage et les méthodes d'acquisition de terres agricoles identifiées font modifier le coût des exploitations en milieu paysan (Odoemenem and Otanwa, 2011). Dans une étude menée sur 5 variétés de maïs soumises à plusieurs systèmes de production dans la zone tropicale humide au Nord du Vietnam, (Hauswirth, 2014) insiste qu'il faille procéder avant tout par des évaluations économiques avant de procéder à la vulgarisation des systèmes agronomiquement performants. Plusieurs recherches menées dans le contexte des systèmes de production en zone tropicale malheureusement n'évaluent pas économiquement les performances des innovations mises en exergue.

Les recettes obtenues après évaluations des différents traitements appliqués au manioc font dégager un avantage net de l'association de l'inoculum de CMA au fumier. Les accroissements des recettes obtenus avec l'application seule de l'inoculum de CMA comparées à la non application des traitements (témoin) sont de 1217 \$/ha. (Sanginga, 2015) confirme que les apports des fertilisants sont susceptibles d'occasionner des recettes marginales favorables chez les plantes à racines et racines entre autres, le manioc, l'igname, la pomme de terre et la patate douce. Au Nigéria, (Obasi *et al.* 2015) avaient fait le même constat en évaluant l'association du manioc au maïs et au melon. Ils ont trouvé que cette association permettait d'obtenir jusqu'à 246 % d'accroissement de revenus par rapport à la monoculture du manioc. Ils ont enfin recommandé aux agriculteurs de pratiquer les associations des cultures en lieu et place de la monoculture car avec cette pratique on obtient à la fois un rendement net et un rendement par naira investi plus important.

5.4. Conclusion

L'acquisition des engrais à Kisangani est difficile et pour cette raison, ils coûtent chers et ne sont toujours pas à la portée des exploitants agricoles. Aussi, la tendance des paysans à ouvrir les espaces forestières pour pratiquer leur agriculture font croire qu'ils travaillent sur des sols fertiles et cela les poussent à rejeter toutes les pratiques recourant à la fertilisation minérale des emblavures sous leur gestion. Les paysans donc sont informés de manière erronée que les fertilisants surtout minéraux détruisent les sols pourtant en réalité, il s'agit juste d'un problème de rationaliser leur gestion. Les méthodes tendant à maintenir et/ou à améliorer la fertilité de leur sol sont quasi-inexistantes d'où la tendance à l'itinérance dans ces zones où la pression démographique actuelle compromet la préservation de la forêt. Et encore, faudra-t-il épingler les augmentations très importantes du coût de production lorsqu'il s'agit des champs d'ouverture en forêt vierge. Dans plusieurs sites, la richesse léguée à la descendance consiste à

ouvrir le maximum de forêts et disposer de plus de jachères pour la succession. Pour cette même cause, les écosystèmes naturels sont détruits par les abattages et l'utilisation du feu. Le recours aux champignons mycorhiziens fait augmenter la rentabilité du manioc avec un taux marginal de rentabilité estimé à 1,39 supérieur au TMR de référence égale à 0,5. Les charges d'exploitation avec ces applications sont faibles et le revenu est relativement grand. Cependant, les pratiques actuelles généralement empiriques sont irrationnelles et ne génèrent pas un bénéfice. Le manioc étant la principale culture vivrière en RDC, englobe les plus des espaces cultivés et est considéré dans la majorité des localités où il est pratiqué, comme culture de rente susceptible d'apporter du revenu dans le ménage. La rentabilité économique indique le contraire et c'est cela qui explique que les populations des zones rurales qui vivent essentiellement de l'agriculture demeurent pauvres. Les ressources étant précaires pour ces populations, un recours à l'application des endophytes locaux serait une alternative pour améliorer les conditions de pauvreté et d'insécurité alimentaire qui gangrènent la quasi-majorité des peuples en zone forestière.

Quatrième partie : Discussion et conclusion générales

Chapitre 6 : Discussion générale

6.1. 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 (Calleja *et al.*, 1980). Ces modifications ont influencé certaines propriétés du sol telles que l'acidité et la granulométrie. (Salvioli *et al.* 2008) avaient reconnu l'impact potentiel des CMA sur les cultures potagères et l'avait qualité de bio-engrais. Ils ont mené des études sur la culture de la tomate et ont observé des effets bénéfiques 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 de P résultant de l'application d'engrais et de fumier modifiaient la quantité de P dont les plantes disposaient dans le milieu mais surtout le développement de la symbiose avec les mycorhizes (Helber *et al.* 2011).

(Yagoob, 2015) 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 53,20 et 44,59 % 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 mg/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.

6.2. La relation entre les CMA 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 des économies en eau même durant les périodes sèches. Les filaments mycéliens couvrent des zones larges grâce à leur abondance et leur longueur (figure 37). 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.*, 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 organique (Maeda, 1954).

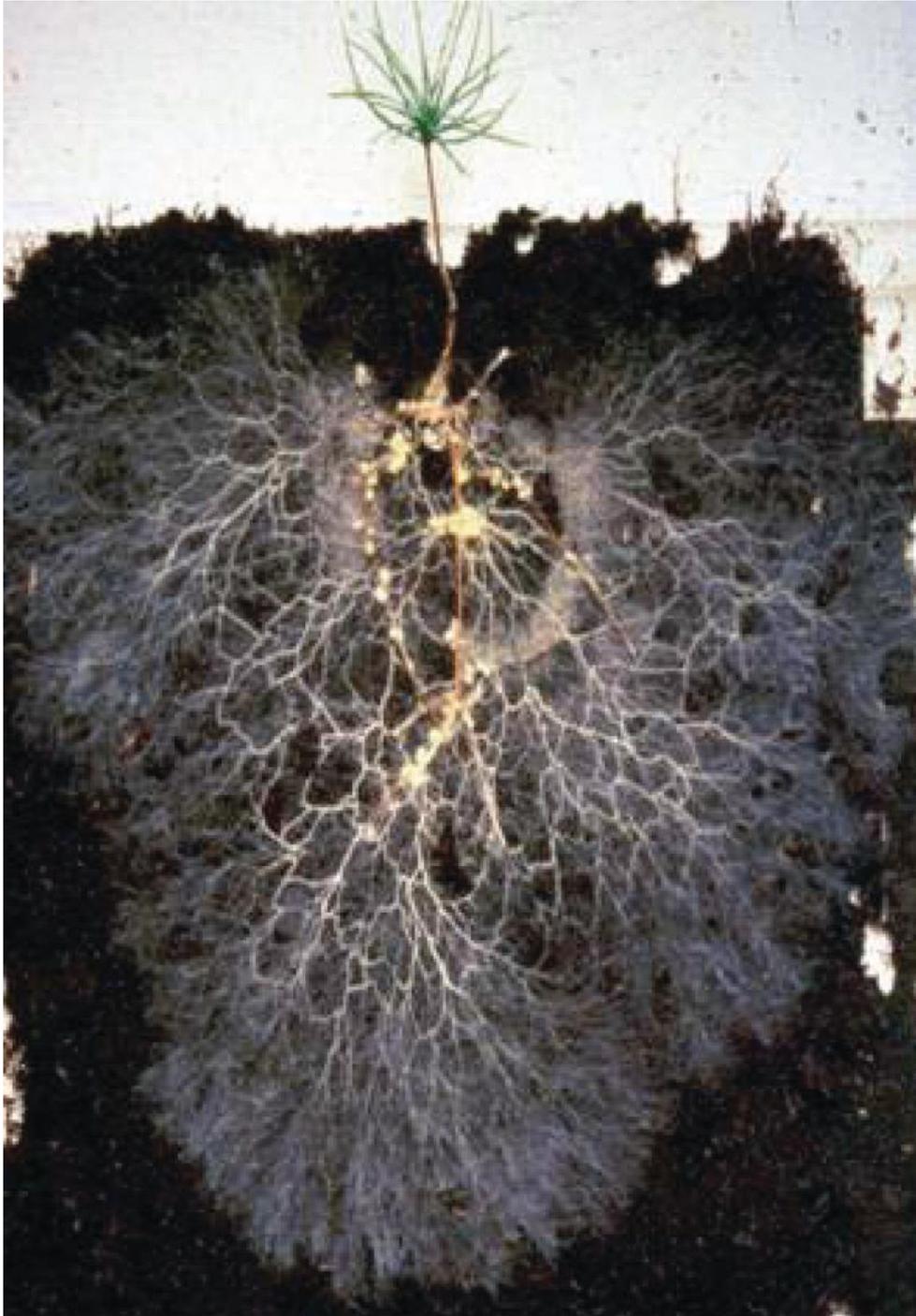


Figure 37: Photo d'un seedling de Pinus sylvestris indiquant le volume de sol colonisé par les champignons ectomycorhiziens (mycélium en blanc) et le volume de sol colonisé par les racines (en jaune)

Source: Read D.J Educational Purposes, Reading University, UK)

(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*.

6.3. 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 TCC 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 TCC 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 arbusculaires (CMA) peuvent augmenter la concentration des métabolites secondaires (Christian *et al.*, 2008). Ces deux chercheurs ont eu à observer des teneurs élevées des composés anti-oxydants 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.*

6.4. Les champignons mycorhiziens et leur rôle dans la protection des plantes

On a observé une réduction du nombre de nématodes des racines dans les parcelles infestées par les champignons mycorhiziens. A Simisimi par exemple, le nombre de nématodes était réduit jusqu'à 80 % dans les parcelles inoculées aux CMA par rapport au contrôle. Les mêmes tendances étaient observées dans les autres sites. Ceci est confirmé par (Inderjit et Mukerji 2006) qui avaient trouvé que les plantes mycorhizées induisaient des composés chimiques qui jouaient un rôle important dans la résistance contre les maladies. Ils ont observé une réduction des dommages causés par les pathogènes sur les racines dans le sol. Il pense que les champignons mycorhiziens arbusculaires de la famille de *Glomeraceae* protègent mieux les plantes contre les pathogènes des racines tandis que les *Gigasporaceae* sont plus efficaces pour améliorer l'absorption du phosphore par les plantes (Colonna, 1991).

Aussi, (Sushma, 2003) a trouvé que les CMA développent des exsudats sur les racines des cultures et ceux-ci ont un pouvoir chimio-attractants sur les bactéries pathogènes du sol. (Banuelos *et al.*, 2014) ont eu un résultat similaire sur une plante ornementale (*Impatiens balsamine L.*) qui était sévèrement infestée par les nématodes à galles (*Meloidogyne incongita*) et dont les inoculations des CMA ont atténué de manière significative les dégâts du

pathogène. (Al-Hmoud et Al-Momany, 2015) aussi, ont observé les mêmes comportements des CMA sur des variétés de tomate attaquées par *Fusarium oxysporum*. (Nele *et al.*, 2015) ont regroupé une bonne littérature qui établit de manière effective le rôle des CMA dans le biocontrôle de parasites des racines dont principalement les nématodes.

La pré-symbiose des champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA) est induite par la production d'exsudats racinaires spécifiques. Les relations symbiotiques entre les champignons mycorhiziens ont de nombreux avantages pour les plantes. Ces avantages comprennent l'amélioration de la croissance et du développement des plantes et une meilleure tolérance des plantes à plusieurs maladies. (Monther et Kamaruzaman, 2012) ont découvert qu'au cours de la phase pré-symbiotique, la racine libère les métabolites essentiels nécessaires à la croissance fongique et à la colonisation racinaire. Ces composés d'exsudats de racines contiennent du sucre, des acides aminés, des protéines, du carbone, certains composés lipophiles, des flavonoïdes et d'autres biomolécules et sont présentés comme un signal fondamental dans les bio-communications végétales, fongiques et microbiennes dans le sol. Les exsudats racinaires peuvent agir comme des messagers qui communiquent et initient les interactions biologiques et physiques entre les organismes du sol et les racines et ainsi, peuvent jouer un rôle protecteur de la racine vis-à-vis des pathogènes du sol (Benjamin, 2008).

6.5. Evaluation agroéconomique des systèmes culturaux

(Arega *et al.* 2013) recommande de tenir aussi compte des facteurs post-récolte des variétés et techniques sélectionnées dans la diffusion en plus des critères désignés par les chercheurs. C'est ainsi que l'adoption sera plus rationnelle. Ils ont même trouvé que cela attribue plus de 40 % de la valeur ajoutée à la variété diffusée.

Dans une étude couvrant onze cultures de base au Kenya (Maïs, Blé, Riz, Sorgho, Millet, Haricots, Pois Pigeon, Niébé, Pois Chiche, Manioc et Arachide) sur l'évaluation des marchés de ces aliments de base et l'analyse de leur chaîne de valeur pour fournir un plan stratégique pour améliorer la valeur et/ou le volume des aliments de base commercialisés au Kenya, (Karuga et Alfred, 2010) ont analysé les chaînes de valeur pour chaque culture et l'environnement propice aux échanges commerciaux de produits agricoles aux niveaux national et régional. Ils ont observé que l'adoption de ces spéculations, tiennent compte avant tout de leur rentabilité et de la demande sur le marché. Entretemps, (Adewale *et al.* 2016 ;

Stessens, 2002) attribuent la faible adoption des variétés améliorées et des techniques culturales résilientes au manque des évaluations économiques pertinentes avant la proposition de ces variétés et ces techniques aux paysans. Ceux-ci découvrent par l'auto-expérience un manque d'augmentation du revenu dans leur ménage. (Iyagba, 2010) avait obtenu des bons rendements sur les plantes à racines et racines en appliquant le désherbage chimique mais pourtant, les recettes marginales obtenues n'avaient pas permis de couvrir les coûts liés à l'acquisition et à l'application de ces produits chimiques ainsi qu'à leurs conséquences sur l'environnement. Au Kenya, (Fermont *et al.*, 2010) avait enquêté auprès de 120 agriculteurs sur leur perception de la rentabilité de la culture du manioc. Ils obtiendront plus de 56 % des avis qui ont indiqué que le manioc ne peut constituer une culture de rente quel que soit la performance des génotypes et les pratiques agricoles utilisées. Pour cette raison, ces paysans jugent inopportuns de recourir aux apports d'intrants qui occasionnent des charges supplémentaires. Entretemps, (Janske *et al.*, 2012) ont évalué la faisabilité économique potentielle de trois systèmes de production de petites cultures énergétiques (jatropha, manioc et eucalyptus) dans des conditions semi-arides typiques en Afrique de l'Est. Cette faisabilité était déterminée en évaluant les valeurs actualisées nettes (VAN), les taux de rendement interne (TRI), les ratios avantages-coûts (RAC) et les périodes de récupération (PP). De plus, les coûts de production étaient comparés aux coûts des systèmes énergétiques de référence, en l'occurrence l'essence, le diesel et les gaz. Les systèmes d'intrants faibles et intermédiaires étaient pris en compte et une attention particulière était accordée aux coûts d'opportunité du travail, en tenant compte à la fois du travail familial (sans coûts de main-d'œuvre) et du travail salarié. A la fin, ils ont fini par conclure que les accroissements de rendement à la production jouent un rôle de grande importance pour juguler les charges d'exploitation et rendre l'activité économiquement rentable. (Olukunle, 2016) préconise de mettre un accent particulier sur les superficies plantées, sur les hommes-jours de main-d'œuvre utilisés et sur les coûts de commercialisation si l'on veut rentabiliser l'exploitation du manioc. Il trouve trois déterminants significatifs de la production de manioc entre autres la superficie des terres plantées, coût de commercialisation et âge de l'agriculteur. Pour lui, une augmentation de 10% de la superficie plantée chez l'exploitant entraîne 4,8% d'augmentation de la production. Une augmentation de 10% des coûts de marketing entraîne une baisse de 5,5% du bénéfice net et une augmentation de 10 % de l'âge de l'agriculteur entraîne une baisse de 3,8 pour cent de la production.

Chapitre 7 : Conclusion générale

Au terme de cette thèse, il sied de vérifier si les hypothèses émises à l'introduction ont trouvé des réponses. Plusieurs littératures traitent des champignons mycorhiziens mais très peu seulement établissent une étroite relation entre ces organismes microscopiques et les cultures vivrières suivant la région de l'étude. Pour ce qui concerne cette thèse de doctorat, il était question de mener une étude sur les applications des champignons mycorhiziens dans l'exploitation agricole du manioc et vérifier s'ils ont des implications sur les modifications des conditions de fertilité des sols tropicaux et leurs apports dans l'amélioration des pratiques agricoles capables d'influencer rationnellement la gestion des écosystèmes.

Il vient d'être constaté que les champignons endomycorhiziens sont présents dans la zone de la forêt qui environne la ville de Kisangani. Etant des biotrophes obligatoires, nous avons tenté de vérifier si leur multiplication sous sorgho qui est supposé être une plante de prédilection avait une indication vérifiable. Les résultats obtenus ont démontré clairement que les spores de diverses morphologies ont présenté des accroissements en nombre lorsqu'elles étaient incorporées sous sorgho. On a obtenu des accroissements du nombre des spores rondes de l'ordre 127 % à Simisimi I, 38 % à Simisimi II, 91 % au PK 29 Route Ituri et 35 % à Litoy. Ces accroissements en nombre de spores après culture sous sorgho, étaient encore plus importants chez les spores mycorhiziennes avec hyphes. On a observé des augmentations du nombre des spores mycorhiziennes avec hyphes allant jusqu'à 3000 % à Simisimi I, 427 % à Simisimi II, 400 % au PK 29 Route Ituri et 150 % à Litoy. Aussi le contrôle de nématodes par les spores mycorhiziennes était aussi vérifié et on a obtenu une réduction de leur nombre de 67 % à Simisimi I, 80 % à Simisimi II, 20 % à Litoy. Cependant, un léger accroissement de ces nématodes était observé à PK 29 route Ituri et estimé à 25 %. Ceci avait permis de confirmer l'hypothèse selon laquelle les champignons mycorhiziens sont présents dans les Hinterlands de Kisangani et se multiplient convenablement sous la plante hôte. Dans cette condition donc, ils présentent des atouts de contrôle des pathogènes du sol entre autres les nématodes des racines de manioc.

Il nous fallait aussi évaluer les divers éléments minéraux en présence dans le sol avant et après la culture du manioc pour vérifier si les champignons mycorhiziens ont la capacité de modifier leur composition après leur incorporation sous-forme d'inoculum sous la culture de manioc. Dans un sol présentant des signes de fatigue dû à des cultures continues du manioc, il a été observé que les apports des champignons mycorhiziens sous forme d'inocula des terres

infectées ont joué un rôle important dans la réduction de l'acidité de surface dans le sol. Le pH était passé de 4.23 à 5.2 partant du contrôle à l'apport de l'inoculum des champignons mycorhiziens. Des augmentations étaient aussi obtenues pour la concentration du phosphore dans le sol avec des valeurs qui sont allées de 10 ppm à des valeurs supérieures de 16 ppm lorsqu'on apportait les inocula mycorhiziens. De la même manière, la structure des sols traités s'est vu modifier positivement après la culture du manioc. La fraction sablonneuse avait diminué au profit du limon et de l'argile dans les parcelles qui avaient reçu l'inoculum des CMA.

Les rendements frais du manioc ont été favorablement modifiés par les champignons mycorhiziens. On a eu des accroissements de rendement de l'ordre de 114 % lorsqu'on apportait les inocula des CMA combiné au fumier de ferme. Ces accroissements étaient de 94 %, 88 %, 72 %, 40 %, 37 %, 33 %, - 32 % respectivement lorsqu'on apportait les inocula des CMA seul, la combinaison NPK + Inocula des CMA + Fumier, le NPK + Fumier, le NPK seul, le Fumier seul, le NPK + Inocula des CMA et l'Association Manioc-Sorgho. Ceci confirme l'hypothèse selon laquelle les champignons mycorhiziens disposent des atouts susceptibles de mobiliser les éléments minéraux du sol et les disponibiliser pour la culture en symbiose mycorhizien et ainsi, favoriser une augmentation du rendement de la culture. On a noté entretemps une bonne mobilisation de l'eau dans les tissus végétaux qui constitue un facteur important de lutte contre le déficit hydrique. Cependant, cela constitue un revers pour les racines de manioc qui a occasionné une perte d'environ 23 % de la matière sèche pourtant utile pour les principaux usages du manioc.

Lorsqu'il s'est agi de mettre en évidence le rôle joué par le phosphore dans la biosynthèse du bêta carotène, il vient d'être prouvé que les modifications en phosphore apportés par les inoculations des champignons mycorhiziens ont influencé la concentration de la teneur en caroténoïde total dans les racines de manioc. Les apports mycorhiziens ont entraîné des accroissements de TCC de 31,3 % chez la variété *Kindisa* et 57,3 % chez la variété *Liyayi*. Il est donc établi selon l'hypothèse 2 que le phosphore joue un rôle catalytique dans la biosynthèse du TCC chez le manioc jaune. Cependant, les apports du phosphore sous-forme d'engrais minéraux dans les sols acides n'a pas un effet sur la biosynthèse du bêta-carotène. Ces effets apparaissent positivement lorsqu'on procède par un chaulage préalable du sol avant d'appliquer l'engrais phosphaté.

Le domaine visant l'application des endomycorhizes dans le système d'exploitation agricole est un pas réel vers une agriculture durable capable de contribuer aux pratiques inappropriées mais malheureusement en vogue chez les exploitants primaires (paysans). Les effets néfastes des systèmes agricoles actuels sur la production et sur l'environnement sont nombreux et les conséquences tant directes et/ou indirectes sur la population ne sont plus à rechercher. Cette thèse ouvre une voie de sortie vers des méthodes visant l'incorporation des ressources naturelles locales en vue de résoudre des problèmes persistants de faible fertilité des sols en zones tropicales. Il vient d'être prouvé que ces endophytes locaux sont à mesure de modifier les conditions des sols acides et de mobiliser des éléments minéraux généralement indisponibles dans les sols des régions des forêts tropicales. Ces avantages devront être capitalisés pour une application effective des résultats obtenus dans cette recherche. La biotrophie obligatoire chez les champignons mycorhiziens ne doit pas déconcentrer les chercheurs dans ce domaine de la microbiologie car une issue qui aboutirait à la production des mycorhizes locaux commerciaux constituerait un tournant vers l'utilisation effective de cette ressource. Dans un premier temps, nous sommes rassurés du taux de multiplication relativement grand sous le sorgho. Ce taux permet d'obtenir des inocula capables de modifier les conditions des sols acides des tropiques et par conséquent, les rendements du manioc et probablement aussi, ceux des autres cultures vivrières. La manipulation de l'inoculum nécessite cependant des précautions pour s'assurer de la vitalité des spores mycorhiziennes avant et pendant l'application sous la culture. La spécificité des champignons mycorhiziens n'est pas démontré 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 les 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 culturelles 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.

Références bibliographiques

ABOUBACAR K., MOUSSA Z.O., HAROUNA I.A., SEYDOU I., ALZOUUMA M., 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

ADEWALE O., TAHIROU A., MANYONG V., EKIN B., ASARE-MARFO D., KULAKOW P. AND ILONA P. 2016. A Technical Review of Modern Cassava Technology Adoption in Nigeria (1985–2013): Trends, Challenges, and Opportunities

ADJANOHOUN A., 2006. Nutrition du manioc sous différentes combinaisons de NPK au Sud du Bénin, *Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin* N° 52 – Juin 2006.

AKINNIFESI F.K., CHILANGA T.G., MKONDA A., KWESIGA F., MAGHEMBE J., 2001. La domestication de *Uapaca kirkiana* dans le sud Afrique : résultats préliminaires de provenances de dépistage au Malawi et en Zambie, Actes de l'agroforesterie régionale conférence sur les impacts agroforestiers sur les moyens de subsistance dans le sud de l'Afrique. *Mettre la recherche en pratique*, vol 21, n° 16, pp 85-92.

ALEXANDER 1983. A study of ageing of spruce *Piceasitchensis* (Bong) Carr. Ectomycorrhiza.

AL-HMOUD G. AND AL-MOMANY A., 2015. Effect of Four Mycorrhizal Products on Fusarium Root Rot on Different Vegetable Crops. *Plant Pathology & Microbiology*

AL-HMOUD G. AND AL-MOMANY, A. 2015, *Plant Pathol Microb* 6 :2 <http://dx.doi.org/10.4172/2157-7471.1000255>

AL-KARAKI G.N., 2000. Growth of mycorrhizal tomato and mineral acquisition under salt stress. *Mycorrhiza* 10: 51–54.

ANDERSON, 1967. Nucleic acids, derivates, and organic phosphates. *In: Soil Biochemistry*, vol 33, n° 7, pp 16-21.

ANDRE-FORTIN J., 2000, Structure cellulaire des mycorhizes Arbusculaires, *Dîners botaniques*, Université Laval

ANINO, E.O., 1992. Natural ecto-mycorrhiza of *Acacia mangium*. *Nitrogen Fixing Tree Res. Reports* 10, 96 p. Asai, T. (1934). Über das Vorkommen und die Bedeutung der Wurzelpilze in den Landpflanzen. *Japanese Journal of Botany*, 7 : 107-150.

ANNE, 1945. Sur le dosage rapide du carbone du sol. *Annuel agronomique* n°2.

AREGA D., ALENE R., KHATAZA C., CHIBWANA, NTAWURUHUNGA P. AND MOYO C., 2013. Economic impacts of cassava research and extension in Malawi and Zambia. Vol. 5(11), pp. 457-469, November 2013 DOI 10.5897/JDAE2013.0496 ISSN 2006-9774 © 2013 Academic Journals <http://www.academicjournals.org/JDAE>

AROCA R., PORCEL R., RUIZ-LOZANO J M., 2007. How does arbuscular mycorrhizal symbiosis regulate root hydraulic properties and plasma membrane aquaporins in *Phaseolus vulgaris* under drought, cold or salinity stresses? *The New phytologist* 173: 808–16.

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)

ATIBU KAZINGUVU E., (2004). Cinétique de l'élimination du cyanure dans le manioc. License en Sciences groupe Chimie, Université de Kinshasa.

AUGÉ R.M., 2004. Arbuscular mycorrhizae and soil/plant water relations. Department of Plant Sciences, 2431 Joe Johnson Drive, University of Tennessee, Knoxville, TN 37996-4561 USA. Received 6 January 2004, accepted 29 April 2004. Department of Plant Sciences, 2431 Joe Johnson Drive, University of Tennessee, Knoxville, TN 37996-4561 USA. Received 6 January 2004, accepted 29 April 2004

AZCON-AGUILAR C., BAREA J.M. 2003. Arbuscular mycorrhizas and biological control of soil-borne plant pathogens – An overview of the mechanisms involved. *Mycorrhiza* 6: 457-464.

BÂ A.M., SOUGOUFARA, B. & THOEN, D., 1987. The triple symbiosis of *Casuarina equisetifolia* in Senegal. In: *Mycorrhizae in the next decade*. Sylvia D. M., Hung L. L., Graham J. H. (éd.). Gainesville, États-Unis, University of Florida, 121 p.

BÂ A.M., (1990). Contribution à l'étude de la symbiose ectomycorhizienne chez deux essences forestières d'Afrique intertropicale : *Afzelia africana* et *Uapaca guineensis*. PhD thesis, University of Montpellier II, France.

BÂ A.M., & Guissou, T. (1996). Rock phosphate and mycorrhizas effects on growth and nutrient uptake of *Faidherbia albida* (Del.) in an alkaline sandy soil. *Agroforestry Systems* 34 : 129-137

BÂ A.M., Dalpé Y, Guissou T (1996). Les Glomales d'*Acacia holosericea* et d'*Acacia mangium*. *Bois et Forêt des Tropiques* 250 : 5-18.

BÂ A.M., Sanon, K.B., Duponnois, R. & Dexheimer, J. (1999). Growth responses of *Afzelia Africana* Sm. seedlings to ectomycorrhizal inoculation in nutrient- deficient soil. *Mycorrhiza*, 9: 91-95.

BÂ A.M., Sanon, K.B. & Duponnois, R. (2002). Influence of ectomycorrhizal inoculation on *Afzelia quanzensis* Welw. Seedlings in a nutrient-deficient soil. *Forest Ecology & Management*, 161: 215-219.

BAGO B., PFEFFER P.E., SHACHAR-HILL Y. 2000. Update on Symbiosis Arbuscular Mycorrhizas. *Plant physiology* 124: 949–957.

BAKSHI B.K., 1966. Mycorrhiza in eucalyptus in India. *Indian Forester*, 92 : 19-20.

BANUELOS J., ALARCON A., LARSEN J., CRUZ-SANCHEZ S., TREJO D., 2014. Interactions between arbuscular mycorrhizal fungi and *Meloidogyne incognita* in the ornamental plant *Impatiens Balsamina*. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2014, 14(1), 63-74

BARAMPAMA A., (1990). Le manioc en Afrique de l'Est. éd.: Karthala & IUED, Paris Genève, 1992, 287 p

BARBOSA R.I., SILVA DOS SANTOS J.R., SOUZA DE CUNHA M., PIMENTEL T.P., FEARNside P.M., 2012. Root biomass, root: shoot ratio and belowground carbon stocks in the open savannahs of Roraima, Brazilian Amazonia. *Australian Journal of Botany*, 60 :405-416.

BAST A., HAENEN G.R., VANDENBERG R. AND VANDENBERG, H., 1998. Antioxidant effects of carotenoids. *Internat. J. Vit. Nutr. Res.* 68, 399-403.

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

BÉCARD G., FORTIN J.A., 1988. Early events of vesicular-arbuscular mycorrhiza formation on Ri TDNA transformed roots. *New Phytologist* 108: 211–218.

BÉCARD G., KOSUTA S., TAMASLOUKHT M., ROUX C., 2004. Partner communication in the arbuscular mycorrhizal interaction. *Canadian Journal of Botany* 82 : 1186 –1197

BELTCHIKA N., (1989). Production et commercialisation du manioc de Bandundu. Travail de fin d'étude à Gembloux Agro-Bio-Tech orientation Economie et sociologies rurales, 75 p.

BENJAMIN A.S., 2008. When do arbuscular mycorrhizal fungi protect plant roots from pathogens? ISSN 0120-9965 *Agronomia Colombia* Vol 26 n°1, Bogota Jan/June 2008.

BJÖRKMAN E., 1960. — *Monotropa hypopitys* L. - An epiparasite on tree roots. — *Physiol. Plant.*, vol. 13, 1960, pp. 308-327

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

BOMBILY M.S., (1995). Le manioc : une ressource alimentaire importante en Guinée. In: Agbor E., Brauman A., Griffon D., Trèche S., éd.: Orstom. Paris. Transformation

alimentaire du manioc. 56-61 - CNUCED, (2012). Fiche produite : Manioc. Consultable : <http://www.unctad.info/fr/Infocomm/Produits-AAACP/FICHE-PRODUIT---Manioc/> (le 1/08/12)

BONDONGA M. H., BABOY L.L., KAUMBU J.M., 2011. Quantification de la symbiose mycorrhizienne des essences de la forêt claire (miomboV) du Katanga : application au reboisement. Cas de *Pterocarpus angolensis*, *P. tinctorius*, *Uapaka kirkiana* et *U. pilosa*. <http://www.memoireonline.com/up/publication.html>

BONFANTE P., GENRE A., 2008. Plants and arbuscular mycorrhizal fungi: an evolutionary developmental perspective. *Trends in plant science* 13: 492–8.

BONIFAS K.D., 2006. Lindquist J.L. 2006. Predicting biomass partitioning to root versus shoot in corn and velvet leaf (*Abutilon theophrasti*). *Weed Sci.* 54:133-137.

BOWEN G.D., 1994. The ecology of ectomycorrhiza formation and functioning. *Plant & Soil* 159: 61-67.

BRITTON G., LIAASEN-JENSEN S. AND PFANDER H., 1995. Carotenoids. Volume 1B: spectroscopy, 360 p. Birkhäuser, Basel.

BURGESS T., DELL B. AND MALAJCZUK N., 1994. Variation in mycorrhizal development and growth stimulation by 20 *Pisolithus* isolates inoculated onto *Eucalyptus grandis*. *New Phytologist*, 127: 731-739.

BRUNDRETT M., 1991. Mycorrhizas in natural ecosystems. *Advances in Ecological Research* 21: 171-313.

CALLEJA M., MOUSAIN D., LECOUVREUR B., AUZAC, 1980. Influence de la carence phosphatée sur les activités phosphatases acides de trois champignons mycorrhiziens. *Hebelomaedurum Metrod.*, *Suillusgranulatus* (L. ex Fr.)

CAMPOS-SORIANO L., GARCIA-MARTINEZ J., SEGUNDO B.S., 2011. The arbuscular mycorrhizal symbiosis promotes the systemic induction of regulatory defence-related genes in rice leaves and confers resistance to pathogen infection. *Molecular Plant Pathology* 13: 579– 592.

- CARIS C., HÖRDT W., HAWKINS H-J., RÖMHELD V., GEORGE E., 1998. Studies of iron transport by arbuscular mycorrhizal hyphae from soil to peanut and sorghum plants. *Mycorrhiza* 8: 35-39.
- CHEN Y.L., GONG M.Q., XU D.P., ZHONG C.L. ET WANG F.Z. 2000a. Screening and inoculant efficacy of Australian ectomycorrhizal fungi on *Eucalyptus urophylla* in field. *Forest Research*, 13: 569-570.
- CHEN, Y.L., BRUNDRETT, M.C. & DELL, B., 2000b. Effects of ectomycorrhizas and vesicular–arbuscular mycorrhizas, alone or in competition, on root colonization and growth of *Eucalyptus globulus* and *E. urophylla*. *New Phytologist*, 146: 545-556.
- CHEN, Y.L., KANG, L.H. & DELL, B., 2006. Inoculation of *Eucalyptus urophylla* with spores of *Scleroderma* in a nursery in south China: Comparison of field soil and potting mix. *Forest Ecology and Management*, 222: 439-449.
- CHEN, D.M., BASTIAS, B.A., TAYLOR, A.F.S. & CAIRNEY, J.W.G., 2007. Identification of laccase-like genes in ectomycorrhizal basidiomycetes and transcriptional regulation by nitrogen in *Piloderma byssinum*. *New Phytologist*, 157: 547-554.
- CHIDUMAYO E.N., 1997. Miombo ecology and management an introduction. Stockholm environment institute (SEI). *Southampton Row, London, WC 1B HH, UK*, 166 p.
- CHIDUMAYO E.N., 1997. Fruit production and seed predation in two Miombo woodland trees in Zambia. *Biotroca*, vol 29, n°4, 452-458.
- CHILVERS G.A., 1972. Host range of some eucalypt mycorrhizal fungi. *Australian Journal of Botany*, 21: 103-111.
- CHRISTIAN U., GERHARD F., CARMEN B. AND INGA M., 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.

COLONNA J.P., THOEN D., DUCOUSSO M. & BAJI S., 1991. Comparative effects of *Glomus mosseae* and P fertilizer on foliar mineral composition of *Acacia senegal* seedlings inoculated with *Rhizobium*. *Mycorrhiza*, 1: 35-38.

CORRADI N., BONFANTE P. 2012. The arbuscular mycorrhizal symbiosis: origin and evolution of a beneficial plant infection. *Plos pathogens* 8 : e1002600.

CIMMYT 1989. Formulation de recommandations à partir de données agronomiques Programme d'économie : *Manuel méthodologique d'évaluation*.

CORNET F. ET DIEM H.G. (1982). Etude comparative de l'efficacité des souches de *Rhizobium* d'*Acacia* isolées de sols du Sénégal et effet de la double symbiose *Rhizobium-Glomus mosseae* sur la croissance d'*Acacia holosericea* et *A. raddiana*. *Revue Bois et Forêts des Tropiques*, 198 : 3-15. Les champignons mycorhiziens : une composante majeure dans les processus biologiques régissant la stabilité et la productivité des écosystèmes forestiers tropicaux.

CROLL D., GIOVANNETTI M., KOCH A.M., SBRANA C., EHINGER M., LAMMERS P.J., SANDERS I.R., 2009. Non-self vegetative fusion and genetic exchange in the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus intraradices*. *The New phytologist* 181: 924–37.

DELWAULLE J.C., DIANGAWA D., GARBAYE J., 1987. Augmentation de la production du Spinaibes dans la région côtière du Congo pour introduction du champignon ectomycorhizien *Pisolithius tinctorius*. *Revue forestière française*, 39, 1, 409-417.

DEXHEIMER J., PARGNEY J-C., 1991. — Comparative anatomy of the host-fungus interface in mycorrhizas. — *Experientia*, vol. 47, 1991, pp. 312-321.

DEXHEIMER J., GERARD J., 1993. — Application de quelques techniques cytochimiques à l'étude des interfaces des ectendomycorhizes de *Monotropa hypopitys* L.). — *Acta Bot. Gallica*, vol. 140, 1993, pp. 459-472.

DEXHEIMER J., 2000. Étude structurale et fonctionnelle des interfaces entre le champignon et la plante-hôte

DJILEMO L., (2007). La farine de manioc (*Manihot Esculenta Crantz*) non fermentée : L'Avenir de la culture du manioc en Afrique. In : Atelier international manioc, Abidjan, Côte d'Ivoire, 04 au 07 juin 2007

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. Deoxy xylulose phosphate pathway to terpenoids. Trends Plant Sci. 6, 78-84.

FAO, (2009). Rapport national sur l'état des ressources phytogénétiques pour l'alimentation et l'agriculture. Projet FAO TCP/DRC/3104. <http://www.fao.org/docrep/013/i1500e/Democratic%20Republic%20Congo.pdf>, (23/06/2012)

FARZANE M., VIERHEILIG H., LÖSS A., KAUL H.P., 2011. Arbuscular mycorrhiza enhances nutrient uptake in chickpea. Plant Soil Environ., 57, 2011 (10): 465–470

FERMONT A.M., BABIRYE A., OBIERO H.M., ABELE S., GILLER K.E. 2010. False beliefs on the socio-economic drivers of cassava cropping. Agron. Sustain. Dev. 30 (2010) 433 – 444 c INRA, EDP Sciences, 2009 DOI: 10.1051/agro/2009044. Research article Available online at: www.agronomy-journal.org for Sustainable Development

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

FUKUDA W.W.G., GUEVARA. C.L., FERGUSON M.E., KAWUTI R., 2006. Descriptors for cassava morphological characterization, 27 p. IITA publications

GALBRUN C., ET CHARLES M-N., 2010. Les mycorhizes ou comment profiter du potentiel du sol

GARBAYE J., DELWAULLE J.C., DIANGANDA D., 1993. Growth response of *Encalyptus* to ectomycorrhizal inoculation in the Congo *Forest ecology and management* 24, pp 151-157.

GARRITY D.P., 2004. Agroforestry and the achievement of the millennium development goals. *Agroforestry Systems* 61 :5-17

GENRE A., CHABAUD M., TIMMERS A.C.J., BONFANTE P., BARKER D.G., 2005. Arbuscular Mycorrhizal Fungi Elicit a Novel Intracellular Apparatus in *Medicago truncatula* Root Epidermal Cells before Infection. *The Plant Cell* 17: 3489–3499.

GENRE A., CHABAUD M., FACCIO A., BARKER D.G., BONFANTE P., 2008. Prepenetration apparatus assembly precedes and predicts the colonization patterns of arbuscular mycorrhizal fungi within the root cortex of both *Medicago truncatula* and *Daucus carota*. *The Plant cell* 20: 1407–20.

GIOVANNETTI M., AZZOLINI D., CITERNESI A.S., 1999. Anastomosis formation and nuclear and protoplasmic exchange in arbuscular mycorrhizal fungi. *Applied and environmental microbiology* 65: 5571–5.

GOULD A.B., HENDRIX J.W., ET FERRISS R.S., 1996. Relationship of mycorrhizal activity to time following reclamation of surface mine land in western Kentucky. I. Propagule and spore

GRANT C., SHABTAI B., MARCIA M., CHRISTIAN P. AND CHRISTIAN M., 2011. Effects on plant P supply and mycorrhizal development; Soil and fertilizer phosphorus

HARLEY J.L., CREADY M.C., 1981. Mycorrhizal symbiosis. London, New-York. *Academic Press*, 1983. pp 123-133.

HARLEY J.L., SMITH S.E., 1983. *Mycorrhizal Symbiosis*. — London: Academic Press, 1983.

HARRISON M.J., VAN BUUREN M.L., 1995. A phosphate transporter from the mycorrhizal. *Fungus Glomus versiforme*. *Nature*, vol. 378, pp. 626-629. HM Stationery

Office, 1900: Bulletin information divers. Royal Botanic Gardens, Kew 1912 à Londres. 102 p.

HARRISON MJ, DEWBRE GARY R, LIU J. 2002. A Phosphate Transporter from *Medicago truncatula* Involved in the Acquisition of Phosphate Released by Arbuscular Mycorrhizal Fungi. *The Plant cell* 14 : 2413–2429.

HAUSWIRTH D., 2014. Evaluation agroéconomique *ex-ante* de systèmes de culture en agriculture familiale : Le cas de l'agriculture de conservation en zone tropicale humide de montagne au Nord Vietnam. Centre international d'études supérieures en sciences agronomiques. Montpellier/France. Préparée au sein de l'école doctorale SIBAGHE et des unités de recherche SCA / SYSTEM

HECHT S., EISENREICH W., ADAM P., AMSLINGER S., KIS K., BACHER A., ARIGONI D. AND ROHDICH F. 2001. Studies on the non-mevalonate pathway to terpenes: The role of the GcpE (IspG) protein. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 98, 14837-14842.

HEIKE B., ELLIOT L. AND PRASHANT A., 2012. The Role of the Mycorrhizal Symbiosis in Nutrient Uptake of Plants and the Regulatory Mechanisms Underlying. Thesis Transport Processes; 2012.

HELBER N., WIPPEL K., SAUER N., SCHAARSCHMIDT S., HAUSE B., REQUENA N., 2011. A versatile monosaccharide transporter that operates in the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus* sp is crucial for the symbiotic relationship with plants. *The Plant cell* 23: 3812–23.

HILDEBRANDT U., JANETTA K., BOTHE H., 2002. Towards Growth of Arbuscular Mycorrhizal Fungi Independent of a Plant Host Towards Growth of Arbuscular Mycorrhizal Fungi Independent of a Plant Host. *Applied and Environmental Microbiology* 68.

HILDEBRANDT U., REGVAR M., BOTHE H., 2007. Arbuscular mycorrhiza and heavy metal tolerance. *Phytochemistry* 68 : 139 – 46.

HOGBERG, 1986. La disponibilité des nutriments du sol, symbioses racinaires et la composition des espèces d'arbres en Afrique tropicale. *Revue journal of tropical Ecology* 2 (4); 359- 379.

HUMPHREYS C.P., FRANKS P.J., REES M., BIDARTONDO M.I., LEAKE J.R., BEERLING D.J., 2010. Mutualistic mycorrhiza-like symbiosis in the most ancient group of land plants. *Nature communications* 1: 103.

INDERJIT AND MUKERJI K.G., 2006. Disease resistance in plants through mycorrhizal fungi induced allelochemicals. Chemical Ecology Lab., Institute of Tropical & Subtropical Ecology, Agricultural College, South China Agricultural University Wushan, Tianhe District, Guangzhou, 510642 P.R. China Email: rszeng@scau.edu.cn; zengrs8@hotmail.com, *Allelochemicals: Biological Control of Plant Pathogens and Diseases*, – © 2006 Springer. 181-192.

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

IYAGBA A. G., 2010. A Review on root and tuber crop production and their weed management among small scale farmers in Nigeria.

JACKSON W. AND PIPER J. 1989. The necessary marriage between ecology and agriculture. *Ecology* 70 :1591-1593.

JANSKE V.E., EDWARD S. AND FAAIJ A., 2012. The economic performance of jatropha, cassava and Eucalyptus production systems for energy in an East African smallholder setting. *GCB Bioenergy* (2012) 4, 828–845, doi: 10.1111/j.1757-1707.2012.01179.x Vol. 5, N°. 4, July 2010 ISSN 1990-6145 ARPN Journal of Agricultural and Biological Science ©2006-2010 Asian Research Publishing Network (ARPN). All rights reserved. www.arpnjournals.com

JAVOT H., PENMETSIA R.V., TERZAGHI N., COOK D.R., HARRISON M.J., 2007a. A *Medicago truncatula* phosphate transporter indispensable for the arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 104: 1720–5.

JOLIEN V., KRIS A., JAN V., GEERT B., BOECKX P., MOANGO A.M., DHED'A B., VEREECKE D. AND HAESAERT G. 2017. Congolese Rhizospheric Soils as a Rich Source of New Plant Growth-Promoting Endophytic *Piriformospora* Isolates, *Frontiers in Microbiology*.

KAMI E., 1994. Etude de la variabilité des composantes du rendement du manioc (*Manihot esculenta* Crantz, var. 312-524) en fonction de la fertilité du sol.

KAPINGA, R., Ewell, P.T., Jeremiah, S.C., Kileo, R., (1995); Sweetpotato in Tanzania farming and food systems: Implications for research. CIP and Ministry of Agriculture, Tanzania. 57 p.

KARSENTY A., 2012. Le rôle de l'agriculture dans la déforestation et la dégradation en RDC Situation actuelle, perspectives et solutions possibles, CIRAD, 21 p.

KARUGA S. AND ALFRED, 2010. Stapes foods value chain analysis country report – Kenya. 2010 This publication was produced for review by the United States Agency for International Development. A Technical Review of Modern Cassava Technology Adoption in Nigeria (1985–2013): Trends, Challenges, and Opportunities No. 2 HarvestPlus Working Paper | March 2016

KHASA, 1990. Symbioses racinaires chez quelques essences forestières importées au Zaïre. Contribution N° 382, station de recherches, agriculture Canada, Sainte Foy. Québec. 27 - 33.

KIERS E.T., DUHAMEL M., BEESETTY Y., MENSAH J.A., FRANKEN O., VERBRUGGEN E., FELLBAUM C.R., KOWALCHUK G.A., HART M.M., BAGO A., 2011. Reciprocal rewards stabilize cooperation in the mycorrhizal symbiosis. *Science* 333: 880–2.

KUGLER M., 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

LACHANCE, 2012. Les Mycorhizes en étroite relation avec les racines des plantes. Cultures en santé supérieure.

LATHAM M. C., (1979). Human Nutrition in Tropical Africa. FAO, Rome. - - MAMPU. Consultable : <http://www.mampu.org> et <http://www.delcod.ec.europa.eu> (22/06/2012)

LATHAM M. C., (1979). Human Nutrition in Tropical Africa. FAO, Rome. - - MAMPU. Consultable : <http://www.mampu.org> et <http://www.delcod.ec.europa.eu> (22/06/2012)

LAZCANO C., FELIPE H., BARRIOS-MASIAS L., JACKSON E., 2014. Effects of arbuscular mycorrhizal symbiosis on plant water relations and greenhouse gas emissions under changing soil moisture regime. Department of Land, Air and Water Resources. University of California Davis.

LEBOT V., 2009. Tropical root and tuber crops: Cassava, Sweet potato, Yams and Aroids. Ed. Cabi, 413 p.

LINDERMAN R.G., 1988. Mycorrhizal interactions with the rhizosphere microflora: the mycorrhizosphere effect. *Phytopathology* 78: 366–371.

LIU J, MALDONADO-MENDOZA I., LOPEZ-MEYER M., CHEUNG F., TOWN C.D., HARRISON M.J., 2007. Arbuscular mycorrhizal symbiosis is accompanied by local and systemic alterations in gene expression and an increase in disease resistance in the shoots. *The Plant Journal* 50: 529 – 44

LOPEZ Z.M. VAZQUEZ Y E., LOPEZ R., 1994. Raices y Tuberculos. El cultivo de la yuca. Cali, Colombia

MAEDA M., 1954. The meaning of mycorrhiza in regard to systematic botany. *Kumamoto Journal of Science Ser. B.*, 3, 57–84.

MAHUNGU N.M., NDONDA A., FRANGOIE A., MOANGO A., 2015. Effet du labour et du mode de bouturage sur le rendement du manioc en racines et en feuilles de manioc

dans les zones de savane et les jachères herbeuses de la zone forestière en République Démocratique du Congo. *Tropicultura* 2015 33,3 176-185

MALAISSE F., 1973. L'homme dans la forêt clair zambézienne. Contribution à l'étude de l'écosystème forêt claire (Miombo). *African Economic history*, N° 7 pp 38- 64.

MAROUANE B., IDOIA G. AND NIEVES G., 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.

MARTIN F., GIANINAZZI-PEARSON V., HIJRI M., LAMMERS P.J., REQUENA N., SANDERS I.R., SHACHAR-HILL Y., SHAPIRO H., TUSKAN G.A., YOUNG J.P.W., 2008. The long hard road to a completed *Glomus intraradices* genome. *New Phytologist* 180: 747–750.

MATTHIAS C., RILLIG N., MARDATIN F., EVA F., LEIFHEIT P., ANTUNES M., 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 P., 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 C., AWONO E.T. ET NDJOUENKEU R., 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

MIKKELSEN B.L., ROSENDAHL S., JAKOBSEN I., 2008. Underground resource allocation between individual networks of mycorrhizal fungi. *The New phytologist* 180 : 890–8.

MINISTERE DES AFFAIRES ETRANGERES FRANÇAISES, (2002). Mémento de l'agronome. Éd. Quae, 1692 p.

MONTHER M.T. AND KAMARUZAMAN S., 2012. Arbuscular mycorrhizal fungi and plant root exudates bio-communications in the rhizosphere. *African Journal of Microbiology Research* Vol. 6(46), pp. 7295-7301, 4 December 2012. Available online at <http://www.academicjournals.org/AJMR> DOI: 10.5897/AJMR12.2250. ISSN 1996-0808 ©2012 Academic Journals

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.

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.

MOUSAIN M., 1993. La Symbiose mycorhizienne : Résultats obtenus avec l'*Hebeloma cylindrosporum* et le *Pisolithus tinctorius* et perspectives d'application agronomique. In *Mushroom Science X (Part I)*, Proceedings of the 10th International Congress on the Science and Cultivation of Edible Fungi.

MUKADI K. & TOLLENS E., (2001). Sécurité alimentaire au Congo-Kinshasa : Production, consommation et survie, Ed. Le Harmattan, 478 p.

MUNNS D.N., HOHENBER J.S., RICHETTI T.L., LAUTER D.J., 1981. Soil acidity tolerance of symbiotic and nitrogen fertilized soybeans. *Agron. J.* 73: 407 - 410.

MÜNZENBERGER B., KOTTKE I., OBERWINKLER F. 1992. Ultrastructural investigations of *Arbutus unedo*-*Laccaria amethystea* mycorrhiza synthesized *in vitro*. — *Trees*, vol. 7, 1992, pp. 40-47.

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.

NELE S., DIRK D.W., BART P. AND CHRISTINE M., 2015. Arbuscular Mycorrhizal Fungi for the Biocontrol of Plant-Parasitic Nematodes. REVIEW published: 17 November 2015 doi: 10.3389/fmicb.2015.01280 *Plant Biotic Interactions*, a section of the journal *Frontiers in Microbiology*

NDONDA, 2014. Evaluation des pratiques agricoles appropriées comme alternative de mitigation des changements climatiques. Cas du manioc sur une friche herbeuse dans la zone de transition de Kisangani. Mémoire de DES inédit, UNIKIS-FGRNR, 84 p.

NGONGO M.L., VAN R., BAERT G., KASONGO L.E., VERSOODT A., MUJINYA B.B., MUKALAY J. M., 2009. Guide des sols en RDC tome I. étude et gestion.

NSIHAN E.B., 2013. Labour choice decisions among cassava crop farmers in Akwa Ibom State, Nigeria. *International Journal of Food and Agricultural Economics* ISSN 2147-8988 Vol. 2 No. 3 pp. 145-156

OBASI P.C., HENRI-UKOHA A., ANOSIKE O.N., IBEKWE U.C., 2015. Net Returns to cassava-based crop mixtures in Imo State, Nigeria. *European Journal of Agriculture and Forestry Research* Vol.3, No.1, pp. 15-21, March 2015 Published by European Centre for Research Training and Development UK (www.eajournals.org). ISSN 2054-6319 (Print), ISSN 2054-6327(online)

ODOEMENEM I.U AND OTANWA L.B., 2011. Economic Analysis of Cassava Production in Benue State, Nigeria. *Current Research Journal of Social Sciences* 3(5): 406-411, 2011. ISSN: 2041-3246 © Maxwell Scientific Organization, 2011

OLUKUNLE O.T., 2016. Socio-economic determinants and profitability of cassava production in Nigeria. *International Journal of Agricultural Economics and Extension*

ISSN 2329-9797 Vol. 4 (4), pp. 229-249, April 2016. Available online at www.internationalscholarsjournals.org © International Scholars Journals

PALM C.A., MYERS R.J.K., NANDWA S.M., 1997. Combined use of organic and inorganic nutrient sources for soil fertility maintenance and replenishment. In Replenishment soil fertility in Africa. Buresh, R J Sanchez, P A. and Calhon, F., (eds), Madison, USA. 123-217.

PAUL C. (2011). Contribution of agroforestry activities to the financial, socioeconomic and environmental sustainability of a carbon sink project in the province of Kinshasa. School of Oriental and African Studies, University of London, 136p.

PICHOT J., ET ROCHE P., 1972. Phosphore dans les sols tropicaux. Communication au Séminaire sur la Fertilité des sols, Ibadan, 939-965.

PRIYANKU T., MANOJ K., RAM P., VIVEK K., NARENDRA T., AND AJIT V., 2017. Mobilization of Micronutrients by Mycorrhizal Fungi Springer. International Publishing AG 2017 A. Varma et al. (eds.), Mycorrhiza - Function, Diversity, State of the Art, DOI 10.1007/978-3-319-53064-2_2

PLASSARD C., RIGOU L., MIGNARD E., ARVIEU J.-C., REMY J.-C. 2000. Influence of ectomycorrhizal infection on the rhizosphere pH around roots of maritime pine (*Pinus pinaster* Soland. in Ait.). — *New Phytol.*, vol. 130, pp. 141-147.

RAFFAILLAC J.- P., (1992). Enracinement de la bouture de manioc (*Manihot esculenta* Crantz) au cours des premières semaines de croissance. *L'Agronomie Tropicale*, 46, p: 273-281

RAVEN J.A., EDWARDS D., 2001. Roots: evolutionary origins and biogeochemical significance. *Journal of experimental botany* 52: 381–401.

READ D.J., 2011. Educational purposes. Reading University, UK. 2011.

REDECKER D., KODNER R., GRAHAM L.E., 2000. Glomalean Fungi from the Ordovician. *Science* 289: 1920–1921.

- REMY W., TAYLOR T.N., HASS H., KERP H., 1994. Four hundred-million-year-old vesicular arbuscular mycorrhizae. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 91: 11841–11843.
- SALVIOLI A., NOVERO M., LACOURT., BONFANTE P.1., 2008. The impact of mycorrhizal symbiosis on tomato fruit quality. 16th IFOAM Organic World Congress, Modena, Italy, June 16-20, 2008
- SANDERS I.R AND CROLL D., 2010. Arbuscular mycorrhiza: the challenge to understand the genetics of the fungal partner. *Annual review of genetics* 44: 271–92.
- SANDMANN G., WOODS W.S. AND TUVESON R.W. (1990) Identification of carotenoids in *Erwinia herbicola* and in a transformed *Escherichia coli* strain. *FEMS Microbiol. Lett.* 71, 77-82.
- SANGINGA N., 2015. Root and Tuber Crops (Cassava, Yam, Potato and Sweet Potato) *Roots and Tubers*; IITA; Feeding Africa. 21-23 October 2015
- SELOSSE M.A. ET FRANÇOIS L., TACON F., 2006. La stratégie de la symbiose : *science et avenir*, N° 633, pp. 72-73.
- SINGH B.B. AND JONES J.P., 1976. Effect of liming on phosphate sorption by acid soils. *J. Soil Sci.* 41: 165-175.
- SMITH AND READ DJ. 2008. *Mycorrhizal Symbiosis* (AP London, Ed.). New York.
- SMITH S.E., SMITH A.F., 2011. Roles of arbuscular mycorrhizas in plant nutrition and growth: new paradigms from cellular to ecosystem scales. *Annual review of plant biology* 62: 227– 50.
- STANGE C. AND CARLOS F., 2010. Carotenoids and Photosynthesis - Regulation of Carotenoid Biosynthesis by Photoreceptors. www.intechopen.com *Advances in Photosynthesis – Fundamental Aspects*

STEINKELLNER S., LENDZEMO V., LANGER I., SCHWEIGER P., KHAOSAAD T., TOUSSAINT J-P., VIERHEILIG H., 2007. Flavonoids and strigolactones in root exudates as signals in symbiotic and pathogenic plant-fungus interactions. *Molecules* (Basel, Switzerland) 12 : 1290–306.

STESSENS J., 2002. Analyse technique et économique des systèmes de production agricole au Nord de la Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat No. 530 à la Faculté des Sciences Biologiques Appliquées de la KU/Leuven. Septembre 2002

STRULU D.G. 1986. — Vers un modèle unifié de fonctionnement des symbioses ectomycorhiziennes. — *Physiol. vég.*, vol. 24, 1986, pp. 219-225.

SUSHMA G.S., 2003. Chemotactic response of plant-growth-promoting bacteria towards roots of vesicular-arbuscular mycorrhizal tomato plants. *FEMS Microbiology Ecology* 45(2003) 219-227 www.fems-microbiology.org 6 2003 Federation of European Microbiological Societies.

SILVESTRE P. & ARRAUDEAU M., (1983). Le manioc. Ed. G.-P. Maisonneuve & Larose, Techniques agricoles et productions tropicales, 257 p.

THOEN D., 1993. Looking for ectomycorrhizal trees and ectomycorrhizal fungi in tropical.

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.

TOLLENS E., 2010. Agriculture et Déforestation en République Démocratique du Congo

TRAPNELL C.G., 1959. Ecological resultants of woodland burning experiment in northern Rhodesia. *J ecd* 47 pp 129-168.

TROUPA S.G.F. ET KONE M.H., 2003. Recensement National de l'Agriculture 2001 et sécurité alimentaire. Rapport de consultant FAO, EU Minagra, Abidjan/Côte d'Ivoire. 40 p

VALLERIE M., 1980 : Fertilité et fertilisation des sols tropicaux. Cours donné à l'Ecole Supérieure d'Agriculture, ORSTOM, Paris

VAN GYSEL J., MAMPAKA LUKUSA A. & ENTAMBODJI M., 2010. Etude sur les Opportunités de Valorisation Industrielle du Manioc en République Démocratique du Congo. Rapport final définitif. Wavre : Euro Consultants, Consultable sur <http://www.copirep.org/documents/Etudes/Etude%20Opportunit%20E9%20valorisation%20Manioc%20-%20Mai%202010.pdf>, (08/07/2012).

WILLIAMSON B., ALEXANDER I.J., 2002. Acid phosphatases localized in the sheath of beech mycorrhiza. *Soilbid. Biochenn*, vd. 7, pp 195-198.

Whipps JM. 2004. Prospects and limitations for mycorrhizas in biocontrol of root pathogens. *Canadian Journal of Botany* 82: 1198–1227.

YAGOOB H., 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. <http://www.academic:journals.org/AJEST> African journal of Environmental science and technology full length research paper. The effects of arbuscular mycorrhizal fungi and phosphorus levels on dry matter production and root traits in cucumber (*Cucumis sativus* L.)

ZIEGLER A., G. MERGEAI J., LEJOLY, 2012. Etude des possibilités d'amélioration de la filière de production et de transformation agro-industrielle du manioc à Ibi village (province de Kinshasa, rdc). Mémoire de Master bioingénieur en sciences agronomiques : Université de Liège, Gembloux agro bio tech

Annexes à la thèse

1. Les données brutes

Sites	Ech	Site	Rep	Génotype	Cultivar	Traitement	ModeCult-Trait.	Pieds	NRC	NRNC	NPR	PRC	PRNC	PRP	Poids total	Rendement
Kisangani	73	1	1	Kindisa	1	Ctrl	1	12	11	45	2	10,95	1,000278	0	11,95028	9,958565
Kisangani	91	1	2	Kindisa	1	Ctrl	1	11	27	25	0	10,68	2,97	0	13,65	12,40909
Kisangani	109	1	3	Kindisa	1	Ctrl	1	10	5	38	0	17,36	0,86	0	18,22	18,22
Kisangani	127	1	4	Kindisa	1	Ctrl	1	11	21	10	1	31,59	2,59	0	34,18	31,07273
Kisangani	74	1	1	Kindisa	1	Ass	2	7	13	6	0	2,5	0,33	0	2,83	4,042857
Kisangani	92	1	2	Kindisa	1	Ass	2	7	16	18	2	8,41	2,27	0	10,68	15,25714
Kisangani	110	1	3	Kindisa	1	Ass	2	5	7	4	0	9,2	0,34	0	9,54	19,08
Kisangani	128	1	4	Kindisa	1	Ass	2	9	16	16	0	7,16	1,97	0	9,13	10,14444
Kisangani	76	1	1	Kindisa	1	Fu	3	12	31	16	2	31,31	3,24	0	34,55	28,79167
Kisangani	94	1	2	Kindisa	1	Fu	3	10	26	33	0	22,61	6,18	0	28,79	28,79
Kisangani	112	1	3	Kindisa	1	Fu	3	10	16	13	2	29,69	2,828655	0	32,51866	32,51866
Kisangani	130	1	4	Kindisa	1	Fu	3	8	25	17	0	8,53	5,37	0	13,9	17,375
Kisangani	77	1	1	Kindisa	1	My	4	8	20	21	0	35,15	1,24	1,06587	37,45587	46,81984
Kisangani	95	1	2	Kindisa	1	My	4	9	17	20	0	8,8	2,648	0	11,448	12,72
Kisangani	113	1	3	Kindisa	1	My	4	6	17	20	5	25,97	1,08	0	27,05	45,08333
Kisangani	131	1	4	Kindisa	1	My	4	9	31	14	0	17,22	2,3	0	19,52	21,68889
Kisangani	78	1	1	Kindisa	1	NPK	5	9	43	35	0	12,56	4,89	0	17,45	19,38889
Kisangani	96	1	2	Kindisa	1	NPK	5	10	49	30	0	37,55	3,48	0	41,03	41,03
Kisangani	114	1	3	Kindisa	1	NPK	5	9	22	31	0	13,37	4,25	0	17,62	19,57778
Kisangani	132	1	4	Kindisa	1	NPK	5	12	47	18	0	33,09	3,03	0	36,12	30,1
Kisangani	75	1	1	Kindisa	1	F-My	6	10	25	26	0	22,1	4,03	0	26,13	26,13
Kisangani	93	1	2	Kindisa	1	F-My	6	10	52	15	0	34,11	1,45	0	35,56	35,56
Kisangani	111	1	3	Kindisa	1	F-My	6	8	19	21	0	25,17	3,5	0	28,67	35,8375
Kisangani	129	1	4	Kindisa	1	F-My	6	10	39	13	3	21,03	1,26	0,213174	22,50317	22,50317
Kisangani	79	1	1	Kindisa	1	NPK Fu	7	9	23	26	0	11,98	2,69	0	14,67	16,3
Kisangani	97	1	2	Kindisa	1	NPK Fu	7	11	25	24	0	31,53	3,86	0	35,39	32,17273
Kisangani	115	1	3	Kindisa	1	NPK Fu	7	11	19	20	0	19,23	2,21	0	21,44	19,49091
Kisangani	133	1	4	Kindisa	1	NPK Fu	7	9	22	18	0	23,3	3,36	0	26,66	29,62222

Sites	Ech	Site	Rep	Génotype	Cultivar	Traitement	ModeCult-Trait.	Pieds	NRC	NRNC	NPR	PRC	PRNC	PRP	Poids total	Rendement
Kisangani	81	1	1	Kindisa	1	NPK My	8	11	52	40	0	12,2	3,75	0	15,95	14,5
Kisangani	99	1	2	Kindisa	1	NPK My	8	8	16	20	0	12,2	3,75	0	15,95	19,9375
Kisangani	117	1	3	Kindisa	1	NPK My	8	11	34	36	0	15,88	3,26	0	19,14	17,4
Kisangani	135	1	4	Kindisa	1	NPK My	8	10	14	4	0	17,29	3,26	0	20,55	20,55
Kisangani	80	1	1	Kindisa	1	NPK Fu My	9	10	35	35	6	22,1	4,08	0	26,18	26,18
Kisangani	98	1	2	Kindisa	1	NPK Fu My	9	7	31	22	0	24,44	2,85	0	27,29	38,98571
Kisangani	116	1	3	Kindisa	1	NPK Fu My	9	10	32	30	9	21,91	3,5	0,467343	25,87734	25,87734
Kisangani	134	1	4	Kindisa	1	NPK Fu My	9	8	28	18	0	11,22	2,45	0	13,67	17,0875
Kisangani	82	1	1	Liyayi	2	Ctrl	1	11	43	20	0	22,97	2,69	0	25,66	23,32727
Kisangani	100	1	2	Liyayi	2	Ctrl	1	10	52	29	0	27,79	3,4	0	31,19	31,19
Kisangani	118	1	3	Liyayi	2	Ctrl	1	10	36	18	0	35,34	2,28	0	37,62	37,62
Kisangani	136	1	4	Liyayi	2	Ctrl	1	12	43	12	0	28,82	2,95	0	31,77	26,475
Kisangani	83	1	1	Liyayi	2	Ass	2	6	5	3	0	2,4	0,57	0	2,97	4,95
Kisangani	101	1	2	Liyayi	2	Ass	2	8	20	4	0	17,48	1,27	0	18,75	23,4375
Kisangani	119	1	3	Liyayi	2	Ass	2	6	5	4	3	3,9	0,3	0	4,2	7
Kisangani	137	1	4	Liyayi	2	Ass	2	9	16	4	0	21,98	1,1	0	23,08	25,64444
Kisangani	85	1	1	Liyayi	2	Fu	3	9	29	13	0	31,86	2,22	0	34,08	37,86667
Kisangani	103	1	2	Liyayi	2	Fu	3	8	28	8	6	35,13	0,2	5,321151	40,65115	50,81394
Kisangani	121	1	3	Liyayi	2	Fu	3	11	30	11	0	45,46	1,93	0	47,39	43,08182
Kisangani	139	1	4	Liyayi	2	Fu	3	10	26	16	0	29,09	0,18	0	29,27	29,27
Kisangani	86	1	1	Liyayi	2	My	4	7	46	16	0	57,3	2,55	0	59,85	85,5
Kisangani	104	1	2	Liyayi	2	My	4	8	25	18	1	20,53	1,22	0	21,75	27,1875
Kisangani	122	1	3	Liyayi	2	My	4	8	18	15	0	15,75	2,45	0	18,2	22,75
Kisangani	140	1	4	Liyayi	2	My	4	9	20	13	0	19,22	1,06	0	20,28	22,53333
Kisangani	87	1	1	Liyayi	2	NPK	5	8	36	27	0	16,49	3,58	0	20,07	25,0875

Sites	Ech	Site	Rep	Génotype	Cultivar	Traitement	ModeCult-Trait.	Pieds	NRC	NRNC	NPR	PRC	PRNC	PRP	Poids total	Rendement
Kisangani	105	1	2	Liyayi	2	NPK	5	8	33	16	0	32,48	2,61	0	35,09	43,8625
Kisangani	123	1	3	Liyayi	2	NPK	5	10	25	29	0	23,37	3,15	0	26,52	26,52
Kisangani	141	1	4	Liyayi	2	NPK	5	10	30	10	0	18,74	2,27	0	21,01	21,01
Kisangani	84	1	1	Liyayi	2	F-My	6	11	47	18	3	68,66	2,8	0	71,46	64,96364
Kisangani	102	1	2	Liyayi	2	F-My	6	9	43	12	0	47,25	1,44	0	48,69	54,1
Kisangani	120	1	3	Liyayi	2	F-My	6	12	39	13	0	56,76	2,29	0	59,05	49,20833
Kisangani	138	1	4	Liyayi	2	F-My	6	11	38	8	0	46,51	1,25	0	47,76	43,41818
Kisangani	88	1	1	Liyayi	2	NPK Fu	7	9	36	27	0	20,06	0,61	0	20,67	22,96667
Kisangani	106	1	2	Liyayi	2	NPK Fu	7	9	43	12	0	61,12	4,2	0	65,32	72,57778
Kisangani	124	1	3	Liyayi	2	NPK Fu	7	9	30	16	0	30,72	0,56	0	31,28	34,75556
Kisangani	142	1	4	Liyayi	2	NPK Fu	7	11	40	8	0	28,63	3,65	0	32,28	29,34545
Kisangani	90	1	1	Liyayi	2	NPK My	8	7	33	15	1	25,99	2,56	0	28,55	40,78571
Kisangani	108	1	2	Liyayi	2	NPK My	8	10	43	23	2	48,25	3,53	0	51,78	51,78
Kisangani	126	1	3	Liyayi	2	NPK My	8	10	27	15	1	9,33	1,73	0,090189	11,15019	11,15019
Kisangani	144	1	4	Liyayi	2	NPK My	8	11	34	16	0	28,16	3,07	0	31,23	28,39091
Kisangani	89	1	1	Liyayi	2	NPK Fu My	9	8	43	9	0	35,57	2,78	0	38,35	47,9375
Kisangani	107	1	2	Liyayi	2	NPK Fu My	9	8	50	9	0	67,22	1,35	0	68,57	85,7125
Kisangani	125	1	3	Liyayi	2	NPK Fu My	9	9	35	6	0	21,39	2,29	0	23,68	26,31111
Kisangani	143	1	4	Liyayi	2	NPK Fu My	9	9	41	17	0	27,91	1,18	0	29,09	32,32222
Litoy	1	2	1	Kindisa	1	Ctrl	1	12	25	56	2	13,36	1,22	0	14,58	12,15
Litoy	19	2	2	Kindisa	1	Ctrl	1	10	33	31	0	13,03	3,63	0	16,66	16,66
Litoy	37	2	3	Kindisa	1	Ctrl	1	7	6	47	0	21,18	1,06	0	22,24	31,77
Litoy	55	2	4	Kindisa	1	Ctrl	1	11	26	13	1	38,54	3,16	0	41,7	37,91
Litoy	2	2	1	Kindisa	1	Ass	2	3	4	6	0	3,05	0,48	0	3,53	11,77
Litoy	20	2	2	Kindisa	1	Ass	2	8	19	23	3	10,26	2,77	0	13,03	16,29

Sites	Ech	Site	Rep	Génotype	Cultivar	Traitement	ModeCult-Trait.	Pieds	NRC	NRNC	NPR	PRC	PRNC	PRP	Poids total	Rendement
Litoy	38	2	3	Kindisa	1	Ass	2	4	6	5	0	11,23	0,42	0	11,65	29,12
Litoy	56	2	4	Kindisa	1	Ass	2	9	20	20	0	11,9	2,41	0	14,31	15,9
Litoy	4	2	1	Kindisa	1	Fu	3	10	44	20	2	38,19	3,96	0	42,15	42,15
Litoy	22	2	2	Kindisa	1	Fu	3	8	32	41	0	27,58	7,54	0	35,12	43,9
Litoy	40	2	3	Kindisa	1	Fu	3	6	19	17	2	36,22	3,45	0	39,67	66,11
Litoy	58	2	4	Kindisa	1	Fu	3	7	31	21	0	10,41	6,56	0	16,97	24,24
Litoy	5	2	1	Kindisa	1	My	4	10	51	26	7	42,88	1,52	1,3	45,7	45,7
Litoy	23	2	2	Kindisa	1	My	4	9	21	25	0	10,74	3,23	0	13,97	15,52
Litoy	41	2	3	Kindisa	1	My	4	5	21	25	6	19,48	1,32	0	20,8	41,6
Litoy	59	2	4	Kindisa	1	My	4	9	26	18	0	9,07	2,81	0	11,88	13,2
Litoy	6	2	1	Kindisa	1	NPK	5	9	30	43	17	15,32	5,97	0	21,29	23,66
Litoy	24	2	2	Kindisa	1	NPK	5	11	60	37	0	45,8	4,25	0	50,05	45,5
Litoy	42	2	3	Kindisa	1	NPK	5	8	27	39	0	16,31	5,19	0	21,5	26,88
Litoy	60	2	4	Kindisa	1	NPK	5	11	57	22	0	40,37	3,7	0	44,07	40,06
Litoy	3	2	1	Kindisa	1	F-My	6	11	28	32	16	26,96	4,92	0	31,88	28,98
Litoy	21	2	2	Kindisa	1	F-My	6	10	64	19	0	41,61	1,77	0	43,38	43,38
Litoy	39	2	3	Kindisa	1	F-My	6	10	23	26	0	30,71	4,28	0	34,99	34,99
Litoy	57	2	4	Kindisa	1	F-My	6	9	47	17	4	25,65	1,54	0,26	27,45	30,5
Litoy	7	2	1	Kindisa	1	NPK Fu	7	11	28	32	16	14,62	3,1	0	17,72	16,11
Litoy	25	2	2	Kindisa	1	NPK Fu	7	10	31	30	0	38,46	4,71	0	43,17	43,17
Litoy	43	2	3	Kindisa	1	NPK Fu	7	10	23	25	0	23,46	2,7	0	26,16	26,16
Litoy	61	2	4	Kindisa	1	NPK Fu	7	8	27	23	0	28,43	4,1	0	32,53	40,66
Litoy	9	2	1	Kindisa	1	NPK My	8	11	64	49	0	14,89	4,58	0	19,47	17,7
Litoy	27	2	2	Kindisa	1	NPK My	8	8	19	25	0	14,89	4,58	0	19,47	24,34
Litoy	45	2	3	Kindisa	1	NPK My	8	10	41	44	0	19,38	3,98	0	23,36	23,36
Litoy	63	2	4	Kindisa	1	NPK My	8	9	17	6	0	21,09	3,98	0	25,07	27,86
Litoy	8	2	1	Kindisa	1	NPK Fu My	9	12	43	43	7	26,96	4,92	0	31,88	26,57

Sites	Ech	Site	Rep	Génotype	Cultivar	Traitement	ModeCult-Trait.	Pieds	NRC	NRNC	NPR	PRC	PRNC	PRP	Poids total	Rendement
Litoy	26	2	2	Kindisa	1	NPK Fu My	9	7	38	27	0	29,82	3,45	0	33,27	47,53
Litoy	44	2	3	Kindisa	1	NPK Fu My	9	10	39	37	11	26,73	4,28	0,57	31,58	31,58
Litoy	62	2	4	Kindisa	1	NPK Fu My	9	7	34	22	0	13,69	3	0	16,69	23,85
Litoy	10	2	1	Liyayi	2	Ctrl	1	10	52	25	0	52,33	3,21	0	55,54	55,54
Litoy	28	2	2	Liyayi	2	Ctrl	1	8	64	36	0	33,9	4,15	0	38,05	47,56
Litoy	46	2	3	Liyayi	2	Ctrl	1	9	44	23	0	43,11	2,79	0	45,9	51
Litoy	64	2	4	Liyayi	2	Ctrl	1	10	53	15	0	35,16	3,61	0	38,77	38,77
Litoy	11	2	1	Liyayi	2	Ass	2	3	6	4	0	2,93	0,43	0	3,36	11,2
Litoy	29	2	2	Liyayi	2	Ass	2	8	25	6	0	21,32	1,55	0	22,87	28,59
Litoy	47	2	3	Liyayi	2	Ass	2	3	6	6	4	3,67	0,37	0	4,04	13,48
Litoy	65	2	4	Liyayi	2	Ass	2	8	20	5	0	26,82	1,35	0	28,17	35,21
Litoy	13	2	1	Liyayi	2	Fu	3	5	35	16	0	38,87	2,71	0	41,58	83,16
Litoy	31	2	2	Liyayi	2	Fu	3	7	34	10	8	42,85	0,25	6,49	49,59	70,84
Litoy	49	2	3	Liyayi	2	Fu	3	10	37	14	0	55,45	2,36	0	57,81	57,81
Litoy	67	2	4	Liyayi	2	Fu	3	12	32	20	0	35,49	0,22	0	35,71	29,76
Litoy	14	2	1	Liyayi	2	My	4	7	56	20	0	69,89	3,45	0	73,34	104,77
Litoy	32	2	2	Liyayi	2	My	4	10	31	23	1	18,94	1,49	0	20,43	20,43
Litoy	50	2	3	Liyayi	2	My	4	7	22	19	0	19,21	3	0	22,21	31,73
Litoy	68	2	4	Liyayi	2	My	4	9	25	17	0	23,45	1,3	0	24,75	27,5
Litoy	15	2	1	Liyayi	2	NPK	5	10	44	34	0	20,12	4,42	0	24,54	24,54
Litoy	33	2	2	Liyayi	2	NPK	5	8	40	20	0	39,62	3,19	0	42,81	53,51
Litoy	51	2	3	Liyayi	2	NPK	5	9	30	36	0	28,51	3,85	0	32,36	35,95
Litoy	69	2	4	Liyayi	2	NPK	5	7	37	13	0	22,86	2,78	0	25,64	36,62
Litoy	12	2	1	Liyayi	2	F-My	6	9	57	22	4	83,75	3,22	0	86,97	79,06
Litoy	30	2	2	Liyayi	2	F-My	6	8	52	15	0	57,63	1,76	0	59,39	74,24
Litoy	48	2	3	Liyayi	2	F-My	6	11	48	17	0	69,24	2,8	0	72,04	65,49

Sites	Ech	Site	Rep	Génotype	Cultivar	Traitement	ModeCult-Trait.	Pieds	NRC	NRNC	NPR	PRC	PRNC	PRP	Poids total	Rendement
Litoy	66	2	4	Liyayi	2	F-My	6	10	46	9	0	56,73	1,53	0	58,26	58,26
Litoy	16	2	1	Liyayi	2	NPK Fu	7	10	44	34	0	24,47	0,79	0	25,26	25,26
Litoy	34	2	2	Liyayi	2	NPK Fu	7	8	52	15	0	74,55	5,13	0	79,68	99,6
Litoy	52	2	3	Liyayi	2	NPK Fu	7	9	36	20	0	37,48	0,69	0	38,17	42,41
Litoy	70	2	4	Liyayi	2	NPK Fu	7	8	49	10	0	34,93	4,46	0	39,39	49,24
Litoy	18	2	1	Liyayi	2	NPK My	8	8	40	19	1	31,7	2,44	0	34,14	42,68
Litoy	36	2	2	Liyayi	2	NPK My	8	9	53	29	2	58,85	4,31	0	63,16	70,18
Litoy	54	2	3	Liyayi	2	NPK My	8	7	33	19	1	11,38	2,12	0,11	13,61	19,45
Litoy	72	2	4	Liyayi	2	NPK My	8	9	41	20	0	34,35	3,75	0	38,1	42,33
Litoy	17	2	1	Liyayi	2	NPK Fu My	9	10	52	12	0	43,39	3,22	0	46,61	46,61
Litoy	35	2	2	Liyayi	2	NPK Fu My	9	7	61	12	0	81,99	1,65	0	83,64	119,49
Litoy	53	2	3	Liyayi	2	NPK Fu My	9	8	43	8	0	26,09	2,8	0	28,89	36,11
Litoy	71	2	4	Liyayi	2	NPK Fu My	9	8	50	21	0	34,05	1,44	0	35,49	44,36

Sites	Echantillon	Site	Rep	Génotype	Cultivar	Traitement	Mode cult-Trait.	Taux de reprise (%)	Matière sèche des racines	Amidon dans les racines	Matière sèche des feuilles à 6 MAP	Teneur en caroténoïde	pHH2O	pHKCl	#spores rondes	#Spores vertes
Kisangani	73	1	1	Kindisa	1	Ctrl	1	100	23,9	13,01875	19,36708	5,02	4,375	4,37	59	0
Kisangani	91	1	2	Kindisa	1	Ctrl	1	91,66667	25,8156	14,06221	19,82074	5,77	4,94	5,18	23	4
Kisangani	109	1	3	Kindisa	1	Ctrl	1	83,33333	21,80636	11,87831	16,30122	5,78	4,85	4,26	53	0
Kisangani	127	1	4	Kindisa	1	Ctrl	1	91,66667	26,72649	14,55839	19,82074	5,83	6,625	4,82	20	3
Kisangani	74	1	1	Kindisa	1	Ass	2	58,33333	24,2	13,18217	20,03046	7,14	4,375	4,62	30	0
Kisangani	92	1	2	Kindisa	1	Ass	2	58,33333	23,8158	12,97289	20,08103	7,21	6,15	5,18	148	0
Kisangani	110	1	3	Kindisa	1	Ass	2	41,66667	22,08008	12,02741	18,02609	7,22	5,28	4,26	27	0
Kisangani	128	1	4	Kindisa	1	Ass	2	75	24,72669	13,46907	20,08103	7,3	5,545	4,85	133	0
Kisangani	76	1	1	Kindisa	1	Fu	3	100	22,5	12,25615	21,03989	5,71	4,92	5,98	134	0
Kisangani	94	1	2	Kindisa	1	Fu	3	83,33333	23,634	12,87386	16,71896	5,77	6,1	5,11	85	0
Kisangani	112	1	3	Kindisa	1	Fu	3	83,33333	20,529	11,18251	18,56284	5,78	4,91	3,81	121	0
Kisangani	130	1	4	Kindisa	1	Fu	3	66,66667	24,54489	13,37004	15,96156	5,83	5,625	4,81	77	0
Kisangani	77	1	1	Kindisa	1	My	4	66,66667	20	10,89435	20,38589	7,38	6,17	5,89	182	0
Kisangani	95	1	2	Kindisa	1	My	4	75	22,2705	12,13114	22,14985	7,45	6,7	5,1	222	0
Kisangani	113	1	3	Kindisa	1	My	4	50	18,248	9,940009	23,25913	7,46	5,395	5,62	238	0
Kisangani	131	1	4	Kindisa	1	My	4	75	23,18139	12,62731	16,7507	7,54	6,575	4,75	200	0
Kisangani	78	1	1	Kindisa	1	NPK	5	75	19,7	10,73094	29,89538	5,56	6,55	5,82	52	1
Kisangani	96	1	2	Kindisa	1	NPK	5	83,33333	18,8163	10,24957	18,91094	5,62	5,04	5,1	93	0
Kisangani	114	1	3	Kindisa	1	NPK	5	75	17,97428	9,790909	23,1466	5,62	6,645	5,53	47	1
Kisangani	132	1	4	Kindisa	1	NPK	5	100	19,72719	10,74575	17,34021	5,68	7,175	4,74	175	0
Kisangani	75	1	1	Kindisa	1	F-My	6	83,33333	18,6	10,13175	20,3246	7,35	4,435	4,17	154	0
Kisangani	93	1	2	Kindisa	1	F-My	6	83,33333	19,7253	10,74472	15,6448	7,44	5,15	5,17	149	0
Kisangani	111	1	3	Kindisa	1	F-My	6	66,66667	16,97064	9,244208	22,68328	7,45	4,85	4,01	148	0
Kisangani	129	1	4	Kindisa	1	F-My	6	83,33333	20,63619	11,2409	16,50829	7,52	5,415	4,82	134	0
Kisangani	79	1	1	Kindisa	1	NPK Fu	7	75	25,3	13,78136	21,46233	6,43	5	5,81	36	0
Kisangani	97	1	2	Kindisa	1	NPK Fu	7	91,66667	22,1796	12,08162	18,53179	6,49	5,1	5,03	25	0
Kisangani	115	1	3	Kindisa	1	NPK Fu	7	91,66667	23,08372	12,57411	36,01368	6,49	7,025	5,46	32	0

Sites	Echantillon	Site	Rep	Génotype	Cultivar	Traitement	Mode cult-Trait.	Taux de reprise (%)	Matière sèche des racines	Amidon dans les racines	Matière sèche des feuilles à 6 MAP	Teneur en caroténoïde	pHH2O	pHKCl	#spores rondes	#Spores vertes
Kisangani	133	1	4	Kindisa	1	NPK Fu	7	75	23,09049	12,5778	16,80122	6,56	5,515	4,74	22	0
Kisangani	81	1	1	Kindisa	1	NPK My	8	91,66667	21,2	11,54802	22,11977	7,21	5,18	5,67	123	0
Kisangani	99	1	2	Kindisa	1	NPK My	8	66,66667	20,3616	11,09132	16,52991	7,28	4,96	4,76	145	0
Kisangani	117	1	3	Kindisa	1	NPK My	8	91,66667	19,34288	10,53641	17,47279	7,3	6,425	5,4	111	0
Kisangani	135	1	4	Kindisa	1	NPK My	8	83,33333	21,27249	11,5875	17,68838	7,37	6,325	5,44	140	0
Kisangani	80	1	1	Kindisa	1	NPK Fu My	9	83,33333	22,7	12,36509	17,66325	6,45	5,95	5,76	65	0
Kisangani	98	1	2	Kindisa	1	NPK Fu My	9	58,33333	17,6346	9,605879	19,38378	6,52	5,85	4,88	149	0
Kisangani	116	1	3	Kindisa	1	NPK Fu My	9	83,33333	20,71148	11,28191	17,52475	6,53	5,475	5,45	138	0
Kisangani	134	1	4	Kindisa	1	NPK Fu My	9	66,66667	18,54549	10,10206	24,63855	6,59	5,575	4,67	144	0
Kisangani	82	1	1	Liyayi	2	Ctrl	1	91,66667	29,1	15,85129	18,18429	3,5	6,15	5,6	24	0
Kisangani	100	1	2	Liyayi	2	Ctrl	1	83,33333	33,4313	18,21062	19,0595	3,54	5,46	4,74	36	0
Kisangani	118	1	3	Liyayi	2	Ctrl	1	83,33333	32,301	17,59493	18,18429	3,54	5,055	5,24	11	0
Kisangani	136	1	4	Liyayi	2	Ctrl	1	100	33,76561	18,39273	18,23021	3,58	5,995	5,31	32	0
Kisangani	83	1	1	Liyayi	2	Ass	2	50	23,8	12,96428	21,83304	5,24	4,58	5,6	185	3
Kisangani	101	1	2	Liyayi	2	Ass	2	66,66667	24,4174	13,30059	16,75608	5,29	5,52	4,75	112	0
Kisangani	119	1	3	Liyayi	2	Ass	2	50	26,418	14,39035	20,7121	5,3	5,655	5,31	167	3
Kisangani	137	1	4	Liyayi	2	Ass	2	75	24,66157	13,4336	14,55733	5,34	5,435	5,32	101	0
Kisangani	85	1	1	Liyayi	2	Fu	3	75	25,5	13,8903	18,45132	4,3	4,8	5,48	65	0
Kisangani	103	1	2	Liyayi	2	Fu	3	66,66667	23,3905	12,74122	15,76794	4,34	4,71	4,71	30	0
Kisangani	121	1	3	Liyayi	2	Fu	3	91,66667	28,305	15,41824	18,45132	4,35	6,315	5,16	59	0
Kisangani	139	1	4	Liyayi	2	Fu	3	83,33333	23,6244	12,86863	14,20285	4,39	5,575	5,29	27	0
Kisangani	86	1	1	Liyayi	2	My	4	58,33333	24,80283	13,51054	19,10068	5,5	5,94	5,36	161	0
Kisangani	104	1	2	Liyayi	2	My	4	66,66667	21,4508	11,68463	17,97781	5,56	5,79	4,68	154	0
Kisangani	122	1	3	Liyayi	2	My	4	66,66667	27,53114	14,9967	19,10068	5,57	5,275	5,12	145	0
Kisangani	140	1	4	Liyayi	2	My	4	75	21,66531	11,80148	15,17801	5,64	5,185	5,27	148	0
Kisangani	87	1	1	Liyayi	2	NPK	5	66,66667	24,01722	13,08261	18,50697	3,6	6,35	5,29	51	0
Kisangani	105	1	2	Liyayi	2	NPK	5	66,66667	29,7801	16,22175	18,85914	3,66	5,32	4,55	103	0

Sites	Echantillon	Site	Rep	Génotype	Cultivar	Traitement	Mode cult-Trait.	Taux de reprise (%)	Matière sèche des racines	Amidon dans les racines	Matière sèche des feuilles à 6 MAP	Teneur en caroténoïde	pHH2O	pHKCl	#spores rondes	#Spores vertes
Kisangani	123	1	3	Liyayi	2	NPK	5	83,33333	26,65911	14,52169	18,50697	3,64	6,415	5	46	0
Kisangani	141	1	4	Liyayi	2	NPK	5	83,33333	30,0779	16,38397	20,10835	3,67	6,265	5,24	92	0
Kisangani	84	1	1	Liyayi	2	F-My	6	91,66667	20,7	11,27566	17,58206	5,56	5,84	5,52	71	0
Kisangani	102	1	2	Liyayi	2	F-My	6	75	21,2226	11,56033	11,61315	5,95	5,1	4,73	143	1
Kisangani	120	1	3	Liyayi	2	F-My	6	100	22,977	12,51598	17,58206	5,62	6,625	5,24	64	0
Kisangani	138	1	4	Liyayi	2	F-My	6	91,66667	21,43483	11,67593	17,9939	6,02	5,935	5,3	39	1
Kisangani	88	1	1	Liyayi	2	NPK Fu	7	75	27,94527	15,22228	27,13998	3,91	5,17	5,25	63	2
Kisangani	106	1	2	Liyayi	2	NPK Fu	7	75	23,2764	12,67907	18,55931	3,94	4,75	4,48	154	3
Kisangani	124	1	3	Liyayi	2	NPK Fu	7	75	31,01925	16,89673	27,13998	3,96	6,825	4,93	57	1
Kisangani	142	1	4	Liyayi	2	NPK Fu	7	91,66667	23,50916	12,80586	17,16796	3,99	5,795	5,11	139	3
Kisangani	90	1	1	Liyayi	2	NPK My	8	58,33333	25,47621	13,87734	16,03527	4,89	5,07	5,21	79	0
Kisangani	108	1	2	Liyayi	2	NPK My	8	83,33333	24,4174	13,30059	20,65834	4,94	4,8	4,3	97	0
Kisangani	126	1	3	Liyayi	2	NPK My	8	83,33333	28,27859	15,40385	16,03527	4,97	5,105	4,88	70	0
Kisangani	144	1	4	Liyayi	2	NPK My	8	91,66667	24,66157	13,4336	17,59721	5	5,485	4,94	87	0
Kisangani	89	1	1	Liyayi	2	NPK Fu My	9	66,66667	26,59851	14,48868	19,4842	4,44	4,63	5,24	43	0
Kisangani	107	1	2	Liyayi	2	NPK Fu My	9	66,66667	19,6252	10,69019	20,39998	4,47	5,01	4,38	104	0
Kisangani	125	1	3	Liyayi	2	NPK Fu My	9	75	29,52435	16,08243	19,4842	4,49	5,645	4,89	39	0
Kisangani	143	1	4	Liyayi	2	NPK Fu My	9	75	19,82145	10,7971	16,82375	4,52	5,225	5,04	193	0
Litoy	1	2	1	Kindisa	1	Ctrl	1	100	27,41916	14,9357	20,28609	4,77	3,97	6,7	73	0
Litoy	19	2	2	Kindisa	1	Ctrl	1	83,3	26,49391	14,4317	22,52336	4,81	5,15	5,83	75	4,320072
Litoy	37	2	3	Kindisa	1	Ctrl	1	58,3	28,2	15,36104	19,36708	4,82	3,96	4,53	33	0
Litoy	55	2	4	Kindisa	1	Ctrl	1	91,7	28,4	15,46998	12,79218	4,86	4,675	5,53	47	3
Litoy	2	2	1	Kindisa	1	Ass	2	25	26,16058	14,25013	18,98274	5,95	5,1	6,87	37	0
Litoy	20	2	2	Kindisa	1	Ass	2	66,7	23,17095	12,62163	27,52294	6,01	4,2	5,89	182	0
Litoy	38	2	3	Kindisa	1	Ass	2	33,3	26,7	14,54396	20,03046	6,02	3,9	4,73	66	0
Litoy	56	2	4	Kindisa	1	Ass	2	75	26,2	14,2716	20,99452	6,08	4,465	5,54	165	0
Litoy	4	2	1	Kindisa	1	Fu	3	83,3	24,6323	13,41765	22,94574	4,76	5,6	6,54	166	0

Sites	Echantillon	Site	Rep	Génotype	Cultivar	Traitement	Mode cult-Trait.	Taux de reprise (%)	Matière sèche des racines	Amidon dans les racines	Matière sèche des feuilles à 6 MAP	Teneur en caroténoïde	pHH2O	pHKCl	#spores rondes	#Spores vertes
Litoy	22	2	2	Kindisa	1	Fu	3	66,7	20,20722	11,00723	28,08511	4,81	4,09	5,82	105	0
Litoy	40	2	3	Kindisa	1	Fu	3	50	25,1	13,67241	21,03989	4,81	5,695	6,25	48	0
Litoy	58	2	4	Kindisa	1	Fu	3	58,3	26	14,16266	19,80301	4,86	6,225	5,46	95	0
Litoy	5	2	1	Kindisa	1	My	4	83,3	23,10402	12,58517	22,48569	6,15	4,05	6,53	53	0
Litoy	23	2	2	Kindisa	1	My	4	75	18,32121	9,97989	43,69748	6,21	4,15	5,75	296	0
Litoy	41	2	3	Kindisa	1	My	4	41,7	23,3	12,69192	20,38589	6,22	6,075	6,18	149	0
Litoy	59	2	4	Kindisa	1	My	4	75	24,5	13,34558	20,77382	6,28	4,565	5,46	247	0
Litoy	6	2	1	Kindisa	1	NPK	5	75	22,11513	12,0465	23,51946	4,64	5	6,48	65	1,20001
Litoy	24	2	2	Kindisa	1	NPK	5	91,7	23,70981	12,91515	21,26379	4,68	4,9	5,6	38	0
Litoy	42	2	3	Kindisa	1	NPK	5	66,7	24,6	13,40006	29,89538	4,69	4,525	6,17	58	1
Litoy	60	2	4	Kindisa	1	NPK	5	91,7	20,7	11,27566	20,44355	4,73	4,625	5,39	214	0
Litoy	3	2	1	Kindisa	1	F-My	6	91,7	22,83432	12,43826	26,8757	6,14	5,22	6,61	67	0
Litoy	21	2	2	Kindisa	1	F-My	6	83,3	21,19513	11,54536	28,22165	6,2	5,75	5,82	184	0
Litoy	39	2	3	Kindisa	1	F-My	6	83,3	22,2	12,09273	20,3246	6,21	4,445	6,34	60	0
Litoy	57	2	4	Kindisa	1	F-My	6	75	21,7	11,82037	17,36878	6,27	5,625	5,47	166	0
Litoy	7	2	1	Kindisa	1	NPK Fu	7	91,7	22,74442	12,38929	20,0567	5,36	4,23	6,39	44	0
Litoy	25	2	2	Kindisa	1	NPK Fu	7	83,3	19,39893	10,56694	21,20075	5,41	4,01	5,48	131	0
Litoy	43	2	3	Kindisa	1	NPK Fu	7	83,3	20,8	11,33013	21,46233	5,41	5,475	6,12	40	0
Litoy	61	2	4	Kindisa	1	NPK Fu	7	66,7	24,4	13,29111	22,47109	5,47	5,375	5,24	28	0
Litoy	9	2	1	Kindisa	1	NPK My	8	91,7	20,22725	11,01814	23,126	6,01	5,2	6,32	152	0
Litoy	27	2	2	Kindisa	1	NPK My	8	66,7	24,60791	13,40436	22,06406	6,07	4,51	5,46	256	0
Litoy	45	2	3	Kindisa	1	NPK My	8	83,3	24,1	13,1277	22,11977	6,08	4,105	5,96	138	0
Litoy	63	2	4	Kindisa	1	NPK My	8	75	22,4	12,20168	19,8562	6,14	5,045	5,11	150	0
Litoy	8	2	1	Kindisa	1	NPK Fu My	9	100	21,21614	11,55681	20,33113	5,38	3,63	6,32	80	0
Litoy	26	2	2	Kindisa	1	NPK Fu My	9	58,3	17,78236	9,686364	25,1312	5,43	4,57	5,47	161	0
Litoy	44	2	3	Kindisa	1	NPK Fu My	9	83,3	21,9	11,92932	17,66325	5,44	4,705	6,03	72	0
Litoy	62	2	4	Kindisa	1	NPK Fu My	9	58,3	19,4	10,56752	22,75569	5,49	4,485	5,12	55	0

Sites	Echantillon	Site	Rep	Génotype	Cultivar	Traitement	Mode cult-Trait.	Taux de reprise (%)	Matière sèche des racines	Amidon dans les racines	Matière sèche des feuilles à 6 MAP	Teneur en caroténoïde	pHH2O	pHKCl	#spores rondes	#Spores vertes
Litoy	10	2	1	Liyayi	2	Ctrl	1	83,3	34,272	18,66857	19,13215	2,92	3,85	6,2	153	0
Litoy	28	2	2	Liyayi	2	Ctrl	1	66,7	29	15,79681	22,38806	2,95	3,76	5,43	44	0
Litoy	46	2	3	Liyayi	2	Ctrl	1	75	24,9	13,56347	17,23314	2,95	5,365	5,88	38	0
Litoy	64	2	4	Liyayi	2	Ctrl	1	83,3	29,3	15,96023	24,9862	2,98	4,625	5,09	39	0
Litoy	11	2	1	Liyayi	2	Ass	2	25	31,178	16,98321	14,09091	4,37	4,89	6,24	229	3,60003
Litoy	29	2	2	Liyayi	2	Ass	2	66,7	21,5	11,71143	21,33333	4,41	4,15	5,45	138	0
Litoy	47	2	3	Liyayi	2	Ass	2	25	26,1	14,21713	21,83304	4,42	5,675	5,96	206	3
Litoy	65	2	4	Liyayi	2	Ass	2	66,7	21,4	11,65696	17,9562	4,45	4,985	5,1	124	0
Litoy	13	2	1	Liyayi	2	Fu	3	41,7	29,869	16,27017	22,88288	3,59	5,4	6,01	81	0
Litoy	31	2	2	Liyayi	2	Fu	3	58,3	25,5	13,8903	22,45557	3,62	4,37	5,27	37	0
Litoy	49	2	3	Liyayi	2	Fu	3	83,3	24	13,07323	24,39862	3,63	5,465	5,72	73	0
Litoy	67	2	4	Liyayi	2	Fu	3	100	20,5	11,16671	25,62052	3,66	5,315	5,04	33	0
Litoy	14	2	1	Liyayi	2	My	4	58,3	29,631	16,14053	22,51908	4,59	4,22	5,97	198	0
Litoy	32	2	2	Liyayi	2	My	4	83,3	23,1	12,58298	32,93051	4,64	3,8	5,2	167	0
Litoy	50	2	3	Liyayi	2	My	4	58,3	22,1	12,03826	20,83088	4,64	5,875	5,65	179	0
Litoy	68	2	4	Liyayi	2	My	4	75	18,8	10,24069	25,49656	4,7	4,845	4,91	260	0
Litoy	15	2	1	Liyayi	2	NPK	5	83,3	27,251	14,8441	24,75248	3	3,68	5,96	63	0
Litoy	33	2	2	Liyayi	2	NPK	5	66,7	19,6	10,67647	23,6413	3,03	4,06	5,1	127	0
Litoy	51	2	3	Liyayi	2	NPK	5	75	21,4	11,65696	20,41323	3,03	4,695	5,61	57	0
Litoy	69	2	4	Liyayi	2	NPK	5	58,3	26,1	14,21713	39,66997	3,06	4,275	4,84	114	0
Litoy	12	2	1	Liyayi	2	F-My	6	91,7	28,441	15,49232	21,81352	4,64	4,99	6,08	88	0
Litoy	30	2	2	Liyayi	2	F-My	6	66,7	22,6	12,31062	23,17597	4,96	4,84	5,4	154	1
Litoy	48	2	3	Liyayi	2	F-My	6	91,7	23,3	12,69192	18,41636	4,69	4,325	5,84	79	0
Litoy	66	2	4	Liyayi	2	F-My	6	83,3	18,6	10,13175	20,44743	5,02	4,235	5,07	148	1
Litoy	16	2	1	Liyayi	2	NPK Fu	7	83,3	32,606	17,76107	25,06596	3,26	4,12	5,93	78	1,440024
Litoy	34	2	2	Liyayi	2	NPK Fu	7	66,7	23,7	12,90981	19,45652	3,29	3,85	5,02	191	3
Litoy	52	2	3	Liyayi	2	NPK Fu	7	75	24,9	13,56347	21,35172	3,3	4,155	5,6	70	2

Sites	Echantillon	Site	Rep	Génotype	Cultivar	Traitement	Mode cult-Trait.	Taux de reprise (%)	Matière sèche des racines	Amidon dans les racines	Matière sèche des feuilles à 6 MAP	Teneur en caroténoïde	pHH2O	pHKCl	#spores rondes	#Spores vertes
Litoy	70	2	4	Liyayi	2	NPK Fu	7	66,7	20,4	11,11224	19,30395	3,33	4,535	4,74	171	2
Litoy	18	2	1	Liyayi	2	NPK My	8	66,7	25,942	14,13107	19,77921	4,08	3,99	5,9	95	0
Litoy	36	2	2	Liyayi	2	NPK My	8	75	20,2	11,0033	24,04965	4,12	3,9	4,98	120	0
Litoy	54	2	3	Liyayi	2	NPK My	8	58,3	22,7	12,36509	18,45725	4,13	5,675	5,54	87	0
Litoy	72	2	4	Liyayi	2	NPK My	8	75	21,4	11,65696	22,81491	4,17	4,805	4,62	208	0
Litoy	17	2	1	Liyayi	2	NPK Fu My	9	83,3	30,821	16,78874	21,8721	3,7	5,2	5,9	53	0
Litoy	35	2	2	Liyayi	2	NPK Fu My	9	58,3	21,1	11,49354	24,36548	3,73	4,33	4,98	228	0
Litoy	53	2	3	Liyayi	2	NPK Fu My	9	66,7	23,7	12,90981	18,20811	3,74	4,595	5,57	48	0
Litoy	71	2	4	Liyayi	2	NPK Fu My	9	66,7	17,2	9,369145	19,24672	3,77	4,325	4,66	115	0

Sites	Ech	Rep	GENOTYPE	Traitement	#spores avec hyphes	#Nématodes	#Spores en amas	#Total spores par 10 g de terre	Sable /100g	Limon /100g	Argile /100g	Carbone (% CO)	Azote (%)	Phosphore (ppm)
Kisangani	73	1	Kindisa	Ctrl	0	2	0	59	54,86007	17,64271	27,49721	2,396105	0,2	12,27
Kisangani	91	2	Kindisa	Ctrl	6	2	0	33	84,21419	8,776572	7,009238	2,654885	0,5	12,84
Kisangani	109	3	Kindisa	Ctrl	0	2	0	53	72,32289	8,816206	18,86091	1,407473	0,1	11,74
Kisangani	127	4	Kindisa	Ctrl	50	2	0	73	51,60185	10,38996	38,00819	1,471615	0,2	13,09
Kisangani	92	2	Kindisa	Ass	30	2	2	180	62,16865	12,25114	25,58021	1,725196	0,4	15,67
Kisangani	110	3	Kindisa	Ass	6	0	0	33	54,09362	17,20954	28,69684	1,876631	0,2	14,67
Kisangani	128	4	Kindisa	Ass	27	2	2	162	86,22434	7,504748	6,270908	1,635128	0,3	14,37
Kisangani	76	1	Kindisa	Fu	9	8	0	143	61,56959	15,24646	23,18396	2,875326	0,2	15,44
Kisangani	94	2	Kindisa	Fu	10	3	0	95	79,54149	9,13601	11,3225	0,58457	0,3	14,4
Kisangani	112	3	Kindisa	Fu	8	7	0	129	69,43768	17,86527	12,69705	3,65943	0,4	13,98
Kisangani	130	4	Kindisa	Fu	88	3	0	165	74,02778	12,35714	13,61507	0,981077	0,4	17,95
Kisangani	77	1	Kindisa	My	43	1	0	225	68,87816	18,24178	12,88006	3,035067	0,4	15,59
Kisangani	95	2	Kindisa	My	14	7	0	236	73,07161	13,20964	13,71875	1,252651	0,1	15,11
Kisangani	113	3	Kindisa	My	35	9	0	273	45,30685	13,40631	41,28684	2,908778	0,35	20,74
Kisangani	131	4	Kindisa	My	113	6	0	313	58,81487	7,76704	33,41809	0,735808	0,4	16,93
Kisangani	78	1	Kindisa	NPK	29	4	0	82	46,83262	14,16814	38,99924	1,916884	0,5	16,09
Kisangani	96	2	Kindisa	NPK	13	11	0	106	59,17333	9,016197	31,81047	1,670201	0,35	14,14
Kisangani	114	3	Kindisa	NPK	3	3	0	51	64,19185	14,71777	21,09038	2,580367	0,35	18,66
Kisangani	132	4	Kindisa	NPK	11	10	0	186	59,20831	8,422769	32,36892	1,324454	0,3	16,86
Kisangani	75	1	Kindisa	F-My	10	5	5	169	71,51404	9,974699	18,51126	3,194807	0,35	10,81
Kisangani	93	2	Kindisa	F-My	34	6	0	183	52,58363	11,41245	36,00392	2,55904	0,25	13,83
Kisangani	111	3	Kindisa	F-My	1	4	2	151	61,43779	14,58662	23,97559	2,533451	0,3	16,49
Kisangani	129	4	Kindisa	F-My	130	5	0	264	81,10966	7,898186	10,99216	1,553372	0,2	14,52
Kisangani	79	1	Kindisa	NPK Fu	3	3	1,944015	40,94402	64,08565	15,36627	20,54808	1,437663	0,4	17
Kisangani	97	2	Kindisa	NPK Fu	0	0	0	25	59,53277	9,615261	30,85197	1,503181	0,4	14,37
Kisangani	115	3	Kindisa	NPK Fu	26	3	2	60	67,38486	5,275269	27,33988	2,655432	0,4	16,86

Sites	Ech	Rep	GENOTYPE	Traitement	#spores avec hyphes	#Nématodes	#Spores en amas	#Total spores par 10 g de terre	Sable /100g	Limon /100g	Argile /100g	Carbone (% CO)	Azote (%)	Phosphore (ppm)
Kisangani	133	4	Kindisa	NPK Fu	5	0	0	27	83,47028	12,35714	4,172575	1,9131	0,2	13,75
Kisangani	81	1	Kindisa	NPK My	25	2	0	148	74,8688	13,92852	11,20268	3,737924	0,35	15
Kisangani	99	2	Kindisa	NPK My	8	4	3	156	80,85943	9,255823	9,884743	1,002121	0,2	16,67
Kisangani	117	3	Kindisa	NPK My	23	2	0	134	65,10987	9,996518	24,89361	4,19427	0,35	16,61
Kisangani	135	4	Kindisa	NPK My	17	4	3	160	83,86372	9,078498	7,057783	1,071713	0,4	18,81
Kisangani	80	1	Kindisa	NPK Fu My	18	4	3	86	30,41828	6,739756	62,84197	2,587794	0,25	18,1
Kisangani	98	2	Kindisa	NPK Fu My	57	2	0	206	81,69812	13,20964	5,092234	1,586691	0,25	19,91
Kisangani	116	3	Kindisa	NPK Fu My	52	4	0	190	75,99497	13,14402	10,86101	3,190272	0,2	19,91
Kisangani	134	4	Kindisa	NPK Fu My	51	2	0	195	82,55226	8,029331	9,418408	1,520669	0,4	19,12
Kisangani	82	1	Liyayi	Ctrl	8	5	0	32	54,62045	9,016197	36,36336	2,635716	0,4	11,84
Kisangani	100	2	Liyayi	Ctrl	3	1	0	39	63,84603	11,41245	24,74152	1,352863	0,4	12,91
Kisangani	118	3	Liyayi	Ctrl	25	4	0	36	89,10955	5,537561	5,352888	2,43962	0,3	13,37
Kisangani	136	4	Liyayi	Ctrl	3	1	0	35	74,9458	11,70141	13,35278	3,062038	0,2	11,55
Kisangani	83	1	Liyayi	Ass	47	2	0	235	64,92434	11,05301	24,02264	2,971171	0,35	11,4
Kisangani	101	2	Liyayi	Ass	73	7	0	185	82,05756	10,21432	7,728114	0,751591	0,35	15,27
Kisangani	119	3	Liyayi	Ass	42	2	0	212	53,83133	7,76704	38,40163	3,546832	0,4	14,98
Kisangani	137	4	Liyayi	Ass	66	6	0	167	63,92956	10,38996	25,68049	2,296528	0,3	13,13
Kisangani	85	1	Liyayi	Fu	12	6	0	77	78,22355	12,8502	8,926241	3,258703	0,5	11,21
Kisangani	103	2	Liyayi	Fu	2	3	3	35	76,30655	7,81807	15,87538	1,553287	0,35	13,61
Kisangani	121	3	Liyayi	Fu	1	5	0	60	84,25716	9,340789	6,402054	3,096441	0,3	15,37
Kisangani	139	4	Liyayi	Fu	22	2	2	51	72,19174	9,078498	18,72976	2,908936	0,35	16,2
Kisangani	86	1	Liyayi	My	84	9	0	245	82,417	10,45395	7,12905	4,284236	0,4	14,04
Kisangani	104	2	Liyayi	My	49	3	0	203	71,39423	10,21432	18,39145	1,094701	0,5	17,45
Kisangani	122	3	Liyayi	My	94	8	0	239	75,07695	12,09485	12,8282	1,688968	0,3	15,82
Kisangani	140	4	Liyayi	My	44	3	0	192	78,88018	13,14402	7,975804	1,837223	0,4	17,41
Kisangani	87	1	Liyayi	NPK	5	1	4	60	74,03011	12,97002	12,99987	3,622911	0,25	17,46

Sites	Ech	Rep	GENOTYPE	Traitement	#spores avec hyphes	#Nématodes	#Spores en amas	#Total spores par 10 g de terre	Sable /100g	Limon /100g	Argile /100g	Carbone (% CO)	Azote (%)	Phosphore (ppm)
Kisangani	105	2	Liyayi	NPK	21	2	0	124	77,50468	13,92852	8,566803	2,345788	0,35	15,38
Kisangani	123	3	Liyayi	NPK	4	1	3	53	73,76549	12,61943	13,61507	2,599134	0,3	16,96
Kisangani	141	4	Liyayi	NPK	19	2	0	111	81,63424	4,750686	13,61507	1,377917	0,25	15,46
Kisangani	84	1	Liyayi	F-My	42	2	0	113	86,85007	6,979381	6,170549	2,712391	0,3	18,58
Kisangani	102	2	Liyayi	F-My	24	2	0	168	73,9103	12,61058	13,47912	1,954136	0,4	13,43
Kisangani	120	3	Liyayi	F-My	73	2	0	137	79,66705	11,96371	8,369241	3,847093	0,45	16,39
Kisangani	138	4	Liyayi	F-My	3	2	0	43	77,56872	6,455582	15,9757	2,755834	0,15	15,13
Kisangani	88	1	Liyayi	NPK Fu	4	4	0	69	72,83198	13,44927	13,71875	2,491949	0,3	9,95
Kisangani	106	2	Liyayi	NPK Fu	38	6	0	195	80,02074	6,260505	13,71875	3,127718	0,45	16,77
Kisangani	124	3	Liyayi	NPK Fu	31	3	0	89	67,33935	16,29152	16,36914	2,505302	0,3	14,61
Kisangani	142	4	Liyayi	NPK Fu	35	2	0	177	69,30653	12,61943	18,07403	2,48025	0,5	17,59
Kisangani	90	1	Liyayi	NPK My	70	5	0	149	69,71685	19,32009	10,96306	3,162859	0,25	16,17
Kisangani	108	2	Liyayi	NPK My	21	4	0	118	66,84135	14,16814	18,99051	2,971332	0,25	17,8
Kisangani	126	3	Liyayi	NPK My	63	4	0	133	62,09351	11,30798	26,59851	1,226346	0,5	16,93
Kisangani	144	4	Liyayi	NPK My	19	4	0	106	53,25467	16,73539	30,00994	2,847695	0,3	16,56
Kisangani	89	1	Liyayi	NPK Fu My	35	4	0	78	66,96116	16,80402	16,23482	3,929613	0,3	14,71
Kisangani	107	2	Liyayi	NPK Fu My	24	4	0	128	68,75835	13,44927	17,79238	2,814946	0,5	17,37
Kisangani	125	3	Liyayi	NPK Fu My	31	3	0	70	70,3557	19,04558	10,59872	0,572295	0,4	16,99
Kisangani	143	4	Liyayi	NPK Fu My	211	4	0	404	67,2082	13,40631	19,38549	3,582584	0,3	17,65
Litoy	1	1	Kindisa	Ctrl	8	2	0	81	70,3	11,2	18,5	1,335	0,2	15,421
Litoy	19	2	Kindisa	Ctrl	69	3	0	148,3201	68,6	19,8	11,6	3,1	0,3	12,971
Litoy	37	3	Kindisa	Ctrl	8	2	0	41	66,2	15,5	18,3	0,784179	0,3	11,86
Litoy	55	4	Kindisa	Ctrl	2	3	0	52	62,23729	13,1128	24,64991	3,700622	0,2	14,05
Litoy	2	1	Kindisa	Ass	0	0	0	37	58,1	12,5	29,4	0,623	0,2	18,851
Litoy	20	2	Kindisa	Ass	37	3	4	223	66,3	17,7	16	3,9	0,4	15,834
Litoy	38	3	Kindisa	Ass	0	0	0	66	67,8	14,9	17,3	1,045573	0,25	14,82

Sites	Ech	Rep	GENOTYPE	Traitement	#spores avec hyphes	#Nématodes	#Spores en amas	#Total spores par 10 g de terre	Sable /100g	Limon /100g	Argile /100g	Carbone (% CO)	Azote (%)	Phosphore (ppm)
Litoy	56	4	Kindisa	Ass	34	3	4	203	69,13321	19,57088	11,29591	4,376133	0,4	14,52
Litoy	4	1	Kindisa	Fu	11	10	0	177	56,2	18,4	25,4	1,602	0,3	15,596
Litoy	22	2	Kindisa	Fu	12	4	0	117	80,7	11	8,3	2,83	0,2	14,546
Litoy	40	3	Kindisa	Fu	10	9	0	58	70,77509	11,03308	18,19183	2,038867	0,25	14,13
Litoy	58	4	Kindisa	Fu	11	3	0	106	53,48057	12,34659	34,17284	4,013902	0,3	18,13
Litoy	5	1	Kindisa	My	5	1	0	58	70,1	12	17,9	1,691	0,5	15,75
Litoy	23	2	Kindisa	My	2	9	0	298	54,3	13,2	32,5	3,4	0,2	15,267
Litoy	41	3	Kindisa	My	4	1	0	153	61,69	15,84928	22,46073	1,620638	0,3	20,951
Litoy	59	4	Kindisa	My	62	8	0	309	78,10885	10,26687	11,62429	3,230702	0,4	17,11
Litoy	6	1	Kindisa	NPK	4	4	0	70,20001	61,8	16,4	21,8	1,068	0,4	16,25
Litoy	24	2	Kindisa	NPK	16	14	0	54	76,8	11,3	11,9	4,47	0,4	14,287
Litoy	42	3	Kindisa	NPK	3	3	0	62	68,36699	18,58575	13,04725	1,142167	0,35	18,851
Litoy	60	4	Kindisa	NPK	14	12	0	228	72,19806	13,98847	13,81347	1,762201	0,4	17,03
Litoy	3	1	Kindisa	F-My	1	6	5	73	61,1	13,4	25,5	1,78	0,4	10,927
Litoy	21	2	Kindisa	F-My	42	7	0	226	62,3	13,9	23,8	2,75	0,25	13,972
Litoy	39	3	Kindisa	F-My	11	5	5	76	55,56029	18,03846	26,40125	1,411523	0,3	16,66
Litoy	57	4	Kindisa	F-My	38	7	0	204	82,37775	9,93849	7,683764	2,545401	0,3	14,67
Litoy	7	1	Kindisa	NPK Fu	4	4	3	51	67,9	18,9	13,2	0,801	0,4	17,192
Litoy	25	2	Kindisa	NPK Fu	0	0	0	131	71,4	14,7	13,9	3,78	0,3	14,518
Litoy	43	3	Kindisa	NPK Fu	3	3	2	45	48,22654	14,86415	36,90932	2,447501	0,4	17,03
Litoy	61	4	Kindisa	NPK Fu	0	0	0	28	59,50082	10,15741	30,34178	2,711832	0,3	13,89
Litoy	9	1	Kindisa	NPK My	31	2	0	183	63,9	16,5	19,6	2,0826	0,3	15,141
Litoy	27	2	Kindisa	NPK My	1	5	4	261	60,1	11,7	28,2	4,1	0,15	16,835
Litoy	45	3	Kindisa	NPK My	28	2	0	166	58,69166	8,077687	33,23066	2,937002	0,3	16,78
Litoy	63	4	Kindisa	NPK My	19	5	4	173	80,07911	13,98847	5,93242	0,597109	0,5	19
Litoy	8	1	Kindisa	NPK Fu My	7	5	0	87	49,5	15,5	35	1,4418	0,2	18,284

Sites	Ech	Rep	GENOTYPE	Traitement	#spores avec hyphes	#Nématodes	#Spores en amas	#Total spores par 10 g de terre	Sable /100g	Limon /100g	Argile /100g	Carbone (% CO)	Azote (%)	Phosphore (ppm)
Litoy	26	2	Kindisa	NPK Fu My	7	2	0	168	59,8	11,2	29	2,6	0,2	20,167
Litoy	44	3	Kindisa	NPK Fu My	7	4	0	79	63,98863	15,95874	20,05263	3,263335	0,2	20,12
Litoy	62	4	Kindisa	NPK Fu My	2	2	0	57	59,82919	10,7047	29,4661	2,613932	0,4	19,32
Litoy	10	1	Liyayi	Ctrl	35	6	0	188	72,9	15,3	11,8	1,166667	0,3	11,963
Litoy	28	2	Liyayi	Ctrl	4	1	0	48	77,9	11,4	10,7	1,8	0,3	13,041
Litoy	46	3	Liyayi	Ctrl	31	5	0	69	64,75485	12,01821	23,22694	1,958001	0,3	13,51
Litoy	64	4	Liyayi	Ctrl	1	1	0	40	80,40748	11,252	8,340518	1,706027	0,3	11,67
Litoy	11	1	Liyayi	Ass	58	2	0	290,6	54,9	9,3	35,8	1,6554	0,35	11,522
Litoy	29	2	Liyayi	Ass	9	8	0	147	78,6	14,7	6,7	3,3	0,4	15,428
Litoy	47	3	Liyayi	Ass	52	2	0	261	73,83994	14,64523	11,51483	3,100168	0,5	15,13
Litoy	65	4	Liyayi	Ass	8	7	0	132	79,31289	10,37633	10,31078	1,27952	0,5	13,27
Litoy	13	1	Liyayi	Fu	2	7	0	83	56	11,2	32,8	3,333333	0,4	11,326
Litoy	31	2	Liyayi	Fu	3	3	3	43	63,7	13,2	23,1	2,67	0,5	13,755
Litoy	49	3	Liyayi	Fu	1	7	0	74	84,78584	8,296605	6,917551	2,643302	0,5	15,53
Litoy	67	4	Liyayi	Fu	3	4	2	38	72,96427	13,44118	13,59455	1,620726	0,5	16,37
Litoy	14	1	Liyayi	My	13	12	0	211	82,9	9,5	7,6	3	0,4	14,189
Litoy	32	2	Liyayi	My	6	4	0	173	72,1	14,2	13,7	0,609917	0,1	17,633
Litoy	50	3	Liyayi	My	12	10	0	191	76,9048	13,6601	9,435108	3,818102	0,4	15,98
Litoy	68	4	Liyayi	My	15	4	0	275	75,15345	9,062818	15,78373	1,023616	0,4	17,59
Litoy	15	1	Liyayi	NPK	6	1	5	74	75,7	14,4	9,9	3,166667	0,25	17,64
Litoy	33	2	Liyayi	NPK	26	2	0	153	74,1	10,2	15,7	1,306966	0,15	15,533
Litoy	51	3	Liyayi	NPK	5	1	4	66	80,73586	11,47092	7,793223	3,034902	0,3	17,13
Litoy	69	4	Liyayi	NPK	4	2	0	118	70,66563	11,252	18,08237	0,767712	0,25	15,62
Litoy	12	1	Liyayi	F-My	10	3	0	98	64,6	12,9	22,5	2,5	0,4	18,767
Litoy	30	2	Liyayi	F-My	3	3	0	158	78,9	12,2	8,9	2,77	0,5	13,573
Litoy	48	3	Liyayi	F-My	9	3	0	88	55,34137	10,15741	34,50122	1,468501	0,5	16,56

Sites	Ech	Rep	GENOTYPE	Traitement	#spores avec hyphes	#Nématodes	#Spores en amas	#Total spores par 10 g de terre	Sable /100g	Limon /100g	Argile /100g	Carbone (% CO)	Azote (%)	Phosphore (ppm)
Litoy	66	4	Liyayi	F-My	3	3	0	152	63,76972	12,34659	23,8837	1,535424	0,5	15,63
Litoy	16	1	Liyayi	NPK Fu	4	4	0	83,44002	79,2	12,4	8,4	2	0,2	10,031
Litoy	34	2	Liyayi	NPK Fu	48	2	0	242	70	12,2	17,8	1,742621	0,5	16,94
Litoy	52	3	Liyayi	NPK Fu	4	4	0	76	73,07373	13,76956	13,15671	2,692252	0,2	14,76
Litoy	70	4	Liyayi	NPK Fu	13	2	0	186	76,24804	14,64523	9,106731	1,381882	0,6	17,77
Litoy	18	1	Liyayi	NPK My	9	6	0	104	71,2	14,9	13,9	2,7	0,2	16,338
Litoy	36	2	Liyayi	NPK My	26	5	0	146	77,2	8,9	13,9	1,65549	0,2	17,983
Litoy	54	3	Liyayi	NPK My	8	5	0	95	66,61565	17,27224	16,11211	3,328602	0,4	17,11
Litoy	72	4	Liyayi	NPK My	23	5	0	231	68,25754	14,20739	17,53507	1,586605	0,4	16,73
Litoy	17	1	Liyayi	NPK Fu My	5	4	0	58	72,2	14,5	13,3	1,5	0,25	14,861
Litoy	35	2	Liyayi	NPK Fu My	29	5	0	257	75,1	15,3	9,6	1,568359	0,4	17,549
Litoy	53	3	Liyayi	NPK Fu My	4	4	0	52	71,97914	14,20739	13,81347	2,770572	0,5	17,16
Litoy	71	4	Liyayi	NPK Fu My	26	5	0	141	78,54668	7,639851	13,81347	1,996052	0,5	17,83

Données brutes d'analyse des sols : Granulométrie

N°	TRAITEMENT	SABLE/100g	LIMON/100g	ARGILE/100g
1	Butamu T2E	58,1	12,5	29,4
2	Kindisa R2T2E	70,3	11,2	18,5
3	Kindisa R1T1E	61,1	13,4	25,5
4	Kindisa R2T1E	56,2	18,4	25,4
5	Témoin av manioc 2	70,1	12	17,9
6	Butamu T1SE	61,8	16,4	21,8
7	Kindisa T2E	67,9	18,9	13,2
8	Butamu T2SE	49,5	15,5	35
9	Kindisa R1T1E	63,9	16,5	19,6
10	Kindisa R1SE	35,8	9,3	54,9
11	Liyayi R1T1SE	72,9	15,3	11,8
12	Liyayi R1T0SE	64,6	12,9	22,5
13	Kindisa T2SE	56	11,2	32,8
14	Liyayi T1T1E	82,9	9,5	7,6
15	Kindisa R2T1SE	75,7	14,4	9,9
16	Kindisa T0SE	79,2	12,4	8,4
17	Butamu T0SE	72,2	14,5	13,3
18	Liyayi R1T2SE	71,2	14,9	13,9
19	Témoin av manioc r2	66,3	17,7	16
20	Kindisa R1T0SE	68,6	19,8	11,6
21	Liyayi R1T1SE	62,3	13,9	23,8
22	Liyayi R1T0E	80,7	11	8,3
23	Kindisa T2SE	54,3	13,2	32,5
24	Liyayi R1T1E	76,8	11,3	11,9
25	Kindisa R2T1SE	71,4	14,7	13,9
26	Kindisa T0SE	59,8	11,2	29
27	Butamu T0SE	60,1	11,7	28,2
28	Liyayi R1T2SE	78,6	14,7	6,7
29	Témoin av man r1	77,9	11,4	10,7
30	Kindisa R1T0SE	78,9	12,2	8,9
31	Kindisa R2T0SE	63,7	13,2	23,1
32	Liyayi R2T2E	72,1	14,2	13,7
33	Kindisa R2T2E	74,1	10,2	15,7
34	Kindisa T0E	70	12,2	17,8
35	Kindisa T1E	75,1	15,3	9,6
36	Kindisa R2T0E	77,2	8,9	13,9
37	Kindisa T2E	67,8	14,9	17,3
38	Kindisa R1T2SE	66,2	15,5	18,3

Données brutes d'analyse des sols : Dosage carbone

Echantillon	Traitements	Témoin(V/ml)	1er Ess(V/ml)	2è Ess(V/ml)	Moyenne	% Carbone
Kindisa	T2SE	300	250	280	265	1,17
Kindisa	R2T0E	300	240	210	225	2,50
Kindisa	T2E	300	200	200	200	3,33
Liyayi	R2T1SE	300	200	220	210	3,00
Kindisa	R2T0SE	300	210	200	205	3,17
Liyayi	R2T2SE	300	250	230	240	2,00
Butamu	T0SE	300	150	120	135	5,50
Liyayi	R1T1E	300	150	150	150	5,00
Butamu	T2SE	300	200	150	175	4,17
Témoin av manioc	R1	300	150	150	150	5,00
Kindisa	R2T0SE	300	120	135	127,5	5,75
Kindisa	R1T0E	300	150	160	155	4,83
Liyayi	R1T0E	300	150	190	170	4,33
Liyayi	R1T2SE	300	100	100	100	6,67
Kindisa	R1T2SE	300	100	100	100	6,67
Kindisa	T1E	300	150	150	150	5,00
Kindisa	T1SE	300	200	200	200	3,33
Kindisa	R2T2E	300	180	200	190	3,67
Kindisa	T0E	300	150	150	150	5,00
Liyayi	R2T1E	300	80	100	90	7,00
Liyayi	R1T2E	300	100	100	100	6,67
Butamu	T1E	300	150	120	135	5,50
Kindisa	T0SE	300	95	100	97,5	6,75
Liyayi	R1T1SE	300	100	100	100	6,67
Liyayi	R2T0	300	180	150	165	4,50
Liyayi	R2T0E	300	100	100	100	6,67
Liyayi	R2T0SE	300	200	200	200	3,33
Kindisa	R1T1E	300	180	150	165	4,50
Butamu	T2E	300	150	100	125	5,83
Liyayi	R2T2E	300	100	100	100	6,67
Kindisa	T1SE	300	100	120	110	6,33
Kindisa	T1E	300	100	100	100	6,67
Kindisa	R1T2E	300	50	50	50	8,33
Kindisa	R2T2E	300	50	85	67,5	7,75
Kindisa	R2T2SE	300	100	120	110	6,33
Tem av manioc 2	(R2)	300	100	100	100	6,67
Butamu	T1SE	300	150	100	125	5,83
Butamu	T0E	300	100	100	100	6,67

Données brutes d'analyse des sols : Dosage Azote

Echantillon	Traitements	V/virage/ml
Kindisa	T2SE	4
Kindisa	R2T0E	2
Kindisa	T2E	3
Liyayi	R2T1SE	3,5
Liyayi	R2T2SE	3
Témoin av manioc	R1	4
Kindisa	R1T0E	4
Liyayi	R1T1E	4
Liyayi	R1T2SE	2,5
Kindisa	R1T0SE	2
Liyayi	R2T1E	2,5
Liyayi	R1T2E	2
Kindisa	T0SE	4
Liyayi	R1T1SE	3
Liyayi	R2T0	2,5
Liyayi	R2T0E	2
Liyayi	R2T0SE	2
Butamu	T2E	4
Liyayi	R2T2E	3
Kindisa	T1SE	2
Kindisa	T1E	1,5
Kindisa	R1T2E	4
Témoin av manioc	(R2)	3
Butamu	T1SE	5
Butamu	T0E	5
Kindisa	T0E	1
Liyayi	R1T0SE	1,5
Kindisa	R2T1E	5
Kindisa	R1T1E	4
Kindisa	R1T2SE	2
Kindisa	R2T2SE	2,5
Kindisa	R2T2E	3
Kindisa	R2T0SE	3
Kindisa	R2T1SE	2,5
Butamu	T0SE	3
Butamu	T2SE	3,5
Butamu	T1E	4
Kindisa	T2SE	2

Données brutes d'analyse des sols : Dosage du phosphore assimilable

Echantillon	Traitements	(λ) Absorbance	ppm
Kindisa	T2SE	2,693	18,851
Kindisa	R2T0E	2,203	15,421
Kindisa	T2E	1,561	10,927
Liyayi	R1T1SE	2,228	15,596
Liyayi	R2T2SE	2,25	15,75
Témoin av manioc	R1	1,75	12,25
Kindisa	R1T0E	2,456	17,192
Liyayi	R1T1E	2,027	14,189
Liyayi	R2T1SE	2,163	15,141
Kindisa	R1T0SE	1,646	11,522
Liyayi	R2T1E	1,709	11,963
Liyayi	R1T2E	2,681	18,767
Kindisa	T0SE	2,612	18,284
Liyayi	R1T2SE	1,618	11,326
Liyayi	R2T0E	2,52	17,64
Liyayi	R1T0E	1,433	10,031
Liyayi	R2T0SE	2,123	14,861
Butamu	T2E	2,334	16,338
Liyayi	R2T2E	2,262	15,834
Kindisa	T1SE	1,853	12,971
Kindisa	T1E	1,996	13,972
Kindisa	R1T2E	2,078	14,546
Témoin av manioc	(R2)	2,181	15,267
Butamu	T1SE	2,041	14,287
Butamu	T0E	2,881	20,167
Kindisa	T0E	2,074	14,518
Liyayi	R1T0SE	2,405	16,835
Kindisa	R2T1E	2,204	15,428
Kindisa	R1T1E	1,863	13,041
Kindisa	R1T2SE	1,939	13,573
Kindisa	R2T2SE	1,965	13,755
Kindisa	R2T2E	2,519	17,633
Kindisa	R2T0SE	2,219	15,533
Kindisa	R2T1SE	2,42	16,94
Butamu	T0SE	2,507	17,549
Butamu	T2SE	2,569	17,983
Butamu	T1E	2,993	20,951
Kindisa	T2SE	2,693	18,851

$$\mu\text{g P g}^{-1} \text{ soil} = C_e \frac{\mu\text{g P}}{\text{mL Ex}} \times \frac{17.5 \text{ mL Ex}}{2.5 \text{ g soil}} = C_e \times 7$$

where: Ex = extract

$$\frac{17.5 \text{ mL Ex}}{2.5 \text{ g sol}} = 7 \quad C_e \frac{\mu\text{g P}}{\text{mL Ex}}$$

Ce= (λ) Absorbance

ppm= Ce x 7

Dosage du pH

Echantillons	Variétés	Traitements	μS(conductivité)	pH KCl	pHeau
1	Liyayi	R2T1SE	259	3,97	6,7
2	Butamu	T1E	334	5,22	6,61
3	Liyayi	R1T0SE	243	3,8	5,2
4	Liyayi	R1T1SE	224	4,15	5,75
5	Liyayi	R2T0SE	209	3,85	5,02
6	Kindisa	R2T2SE	64,2	3,76	5,43
7	Butamu	T2SE	106	5,4	6,01
8	Liyayi	R1T2E	84,9	4,51	5,46
9	Butamu	T0SE	54	4,89	6,24
10	Kindisa	T1E	31,5	5,6	6,54
11	Kindisa	R2T0E	1	4,01	5,48
12	Kindisa	R2T1E	31,7	3,9	4,73
13	Kindisa	T0E	1	5,2	5,9
14	Liyayi	R1T2SE	37	4,06	5,1
15	Kindisa	R1T1E	31,8	5,15	5,83
16	Butamu	T0E	58,4	4,57	5,47
17	Kindisa	R2T2E	15,08	4,37	5,27
18	Témoin avant manioc	R1	20	3,96	4,53
19	Kindisa	R1T0E	1	4,33	4,98
20	Kindisa	T2SE	40,5	5,75	5,82
21	Liyayi	R2T2SE	-1	4,22	5,97
22	Kindisa	T0SE	1	4,9	5,6
23	Kindisa	R2T1SE	203	4,99	6,08
24	Kindisa	R1T0SE	196	3,63	6,32
25	Kindisa	T1SE	189	4,2	5,89
26	Liyayi	R1T0E	120	3,9	4,98
27	Kindisa	R2T1SE	46	5,1	6,87
28	Kindisa	R1T2E	53	4,05	6,53
29	Liyayi	R2T2E	103	5	6,48

Echantillons	Variétés	Traitements	μS(conductivité)	pH KCl	pHeau
30	Kindisa	T1SE	193	3,68	5,96
31	Liyayi	R2T1E	221	4,09	5,82
32	Butamu	T2E	139	3,99	5,9
33	Liyayi	R1T1E	89	5,2	6,32
34	Butamu	T1SE	92	4,23	6,39
35	Tem av manioc	(R2)	85	4,12	5,93
36	Kindisa	R2T0SE	72	4,84	5,4
37	Liyayi	R2T0E	1	3,85	6,2
38	Kindisa	R1T2SE	1	4,15	5,45

Table des matières

Dédicace	2
Remerciements	3
Abstract	8
Liste des abréviations et des sigles	10
Liste des figures	12
Liste des tableaux	14
1. Problématique	15
2. Les questions de recherche	19
a. Question principale	19
b. Questions spécifiques	20
3. Les hypothèses	20
2.1. Hypothèse générale	20
2.2. Les hypothèses spécifiques sont les suivantes :	20
4. Objectifs	21
a. Objectif général	21
5. Intérêt du travail	22
6. Subdivision de la thèse	22
I. Les Champignons mycorhiziens	23
1.1. Brève historique	23
1.2. Quelques notions sur les mycorhizes	23
1.3. Les types des mycorhizes	25
1.3.1. Les endomycorhizes à vésicules et arbuscules (VA)	25
1.3.2. Les endomycorhizes à pelotons intracellulaires	30
1.3.3. Les ectomycorhizes	30
1.3.4. Les ectendomycorhizes	32
1.4. Les champignons mycorhiziens dans les agrosystèmes : leur rôle écologique	33
1.5. Les partenaires à la mycorhization, leurs rôles dans la symbiose et la biotrophie chez les CMA	35
1.5.1. Les partenaires à la mycorhization	35
1.5.1.1. La plante	35
1.5.1.2. Le champignon	36
1.5.1.3. L'organisation fine des interfaces	36
1.5.1.4. Le fonctionnement des symbioses mycorhiziennes	37
1.5.1.5. Rôle des mycorhizes dans la nutrition organo- minérale des végétaux	41
1.5.2. La nutrition azotée	42
1.5.3. La nutrition phosphatée	42

1.5.4. La nutrition hydrique	44
1.6. Intérêt de mycorhizes dans la lutte biologique	46
1.7. La biotrophie chez les champignons mycorhiziens	47
2. Quelques généralités sur le manioc	49
Chapitre 1 : Le Milieu d'étude	55
1.1. Situation géographique des sites	55
1.2. Le climat	56
1.3. La végétation et le sol	58
Chapitre 2 : Matériels et méthodes	60
2.2. Echantillons des sols	60
2.3. Extraction et multiplication <i>ex-situ</i> des champignons mycorhiziens	61
2.4. Préparation de l'inoculum et du thé de compost	62
2.5. Inoculation dans les essais	63
2.6. Analyse des sols	63
2.7. Dosage du Caroténoïde, de la matière sèche et de l'amidon	66
2.8. Prise des données et analyses statistiques	66
2.9. Prise des données au champ et à la récolte	67
Chapitre 3 : Restauration de la fertilité des sols dégradés par les cultures successives de manioc à partir des CMA	69
3.0. Introduction	69
3.1. Matériels et méthodes	70
3.1.1. Dispositif expérimental	70
3.1.2. Schémas des dispositifs expérimentaux (figure 12)	72
3.1.3. Comptage des spores, éclaircissement et coloration des mycorhizes	74
3.1.4. Prises des données à la levée et à la récolte	75
3.1.4.2. Détermination de la teneur en β -Carotène (Extraction avec l'acétone)	77
3.2. Résultats	78
3.2.1. Comptage des spores viables	78
3.2.2. Relations entre les variables du sol et du manioc après apport des CMA suivant les sites	83
3.2.2.1. Site de Kisangani	83
3.2.2.2. Site de Litoy	89
3.2.3. Relations entre les variables du sol et du manioc après apport des CMA suivant les saisons culturales	95
3.2.3.1. Saison culturale 1 (Année agricole 2015)	95
a) Les effets du phosphore sur le rendement du manioc :	96
b) L'acidité du sol sur le rendement du manioc	98

c)	La granulométrie du sol et le rendement du manioc.....	99
d)	Relation entre le phosphore et l'acidité du sol	100
e)	Relation entre le phosphore et la présence des spores vivantes dans le sol.....	100
3.2.3.2.	Saison culturale 2 (Année agricole 2016).....	100
a)	Relation nombre de racines commercialisables et le rendement du manioc.....	101
b)	Relation entre l'acidité du sol et le rendement en racines fraîches du manioc.....	102
c)	Rapport entre la matière sèche des racines et le rendement du manioc.....	102
d)	La population des spores mycorhiziennes dans le sol par rapport au rendement du manioc 102	
e)	Relation entre le phosphore et le rendement par rapport aux traitements appliqués dans le sol 103	
f)	Le carbone par rapport au rendement du manioc.....	104
g)	Relation entre la population des spores mycorhiziennes et le phosphore dans le sol	104
3.2.3.3.	Les Apports des fertilisants sur le rendement du manioc.....	105
3.2.3.4.	Les données agronomiques obtenues durant la croissance jusqu' à la récolte du manioc 109	
3.2.3.4.1.	Le taux de reprise du manioc après la plantation	110
3.2.3.4.2.	Nombre de grosses racines	110
3.2.3.4.3.	Nombre de petites racines et des racines pourries	110
3.2.3.4.4.	Evolution du rendement suivant la succession des saisons et les performances des mycorhizes. 111	
3.2.3.4.5.	La matière sèche dans les racines tubéreuses et les feuilles.	113
3.2.3.4.6.	L'amidon des racines.	114
3.3.	Discussion	114
3.3.1.	Multiplication des spores sous plante- hôte pour contourner la biotrophie obligatoire (Objectif spécifique 1)	114
3.3.2.	Les effets de champignons mycorhiziens arbusculaires sur le phosphore et l'eau du sol 115	
3.3.2.1.	Utilisation des phosphates organiques ou minéraux par les symbiotes mycorhiziens 115	
3.3.2.2.	Le rôle des endomycorhizes sur l'eau du sol.....	117
3.4.	CONCLUSION	118
Chapitre 4 : Effet des champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA) sur la mobilisation du phosphore en sol acide des forêts tropicales et leur relation dans la biosynthèse du caroténoïde chez le manioc à pulpe jaune.....		119
4.1.	Introduction	119
4.2.	Matériels et méthodes.....	121
4.2.1.	Dispositif expérimental	121
4.2.2.	Schéma du dispositif expérimental	123

4.2.3. Dosage du caroténoïde par iCheck.....	125
4.3. Résultats et discussion.....	127
4.3.1. Résultats	127
4.3.1.1. Evaluation du β -carotène (TCC), de la matière sèche et de l'amidon des racines suivant les variétés du manioc et les applications de l'inoculum d'endomycorhizes	127
4.3.1.2. Mobilisation des éléments du sol par les CMA	130
4.3.2. Discussion (Objectifs spécifiques 2 et 3)	138
4.4. Conclusion.....	140
Chapitre 5 : Les considérations agro-économiques sur les applications et implications des CMA dans le système agricole en zone forestière	141
Résumé	141
5.1. Introduction	141
5.2. Matériels et méthodes.....	142
5.2.1. Calcul du coût de production	142
5.2.2. Analyse de la rentabilité économique.....	143
5.3. Résultat et discussion	143
5.3.1. Résultat.....	144
5.3.1.1. Le coût de production	144
5.3.1.2. Le revenu marginal	144
5.3.1.3. Le taux marginal de rentabilité	145
5.3.2. Discussion	146
5.4. Conclusion.....	147
Chapitre 6 : Discussion générale	149
6.1. Mobilisation des éléments minéraux en sol acide grâce aux CMA.....	149
6.2. La relation entre les CMA et l'eau du sol.....	150
6.3. Le rôle du phosphore du sol et des CMA dans la biosynthèse du bêta-carotène.....	153
6.4. Les champignons mycorhiziens et leur rôle dans la protection des plantes	153
6.5. Evaluation agroéconomique des systèmes culturaux	154
Chapitre 7 : Conclusion générale	156
Références bibliographiques	160
Annexes à la thèse.....	180