

UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR

-----****-----

ECOLE DOCTORALE SCIENCES DE LA VIE, DE LA SANTE ET DE
L'ENVIRONNEMENT

-----****-----

FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES

Année : 2019

N° d'ordre : 201932



THESE DE DOCTORAT

Spécialité : Biotechnologies Végétales et Microbiennes et Amélioration des Plantes

Présentée par :

Demba DIAW

**Evaluation du potentiel des inoculants mycorhiziens et rhizobactériens sur le
développement de la culture intensive de la tomate au Sénégal**

Soutenue le 17 janvier 2020 devant le jury composé de :

Président :	M. Aliou GUISSÉ	Professeur Titulaire	UCAD
Rapporteurs :	M. Anicet Manga	Maître de Conférences	UGB
	M. Aboubacry KANE	Maître de Conférences	UCAD
	Mme Mame Arama Fall Ndiaye	Maître de Conférences	UCAD
Examineurs :	M. Ahmed Tidjane DIALLO	Maître de Conférences	UT
	M. Tahir Abdoulaye DIOP	Professeur Titulaire	UAM

Directeur de thèse : M. Tahir Abdoulaye Diop

Professeur Titulaire UAM

THESE DE DOCTORAT

Spécialité : Biotechnologies Végétales et Microbiennes et Amélioration des Plantes

Prénom et nom du candidat : Demba Diaw

Titre de la thèse : Evaluation du potentiel des inoculants mycorhiziens et rhizobactériens sur le développement de la tomate au Sénégal.

Date et lieu de la soutenance : Le 17 janvier 2020 à la salle du jardin botanique du département de Biologie Végétale de la FST

Composition du jury :

M. Aliou GUISSSE	Professeur Titulaire	UCAD	Président
M. Anicet Manga	Maître de Conférences	UGB	Rapporteur
M. Aboubacry KANE	Maître de Conférences	UCAD	Rapporteur
Mme Mame Arama Fall Ndiaye	Maître de Conférences	UCAD	Rapporteur
M. Ahmed Tidjane DIALLO	Maître de Conférences	UT	Examineur
M. Tahir Abdoulaye Diop	Professeur Titulaire	UAM	Examineur

Résumé : La tomate (*Solanum lycopersicum* L.) est l'une des principales cultures industrielles pratiquées. Cette culture est très sensible aux attaques parasitaires, ce qui justifie l'utilisation intensive des intrants de synthèse pour augmenter la productivité. Toutefois, l'utilisation abusive de ces produits présente des effets néfastes sur la santé humaine et l'environnement. Des études ont été menées pour évaluer l'impact de l'inoculation des microorganismes bénéfiques (Champignons mycorhiziens arbusculaires – *Pseudomonas* fluorescents) dans les itinéraires de production maraîchère afin de réduire l'utilisation des produits phytosanitaires. Les prélèvements de sol effectués au niveau de la rhizosphère de plantes de tomate ont permis de caractériser différents isolats de rhizobactéries appartenant au groupe des *Pseudomonas* fluorescents. L'identification de ces isolats à partir d'approches phénotypiques et de la spectrométrie de masse MALDI-TOF a révélé une appartenance de tous les isolats au même genre et à la même espèce (*Pseudomonas putida*) avec des pourcentages de similarité compris entre 76 % et 92 %. Les tests réalisés en milieu contrôlé ont montré que ces rhizobactéries sont capables de s'associer avec des champignons mycorhiziens arbusculaires. C'est le cas de l'association du couple *Pseudomonas putida* – *Funneliformis mosseae* qui se traduit par une stimulation efficace de la croissance des plantes de tomate. A partir de ces résultats, un essai a été lancé pour évaluer l'impact de différentes doses de pesticides sur ces microorganismes. Les résultats ont montré que l'application des produits phytosanitaires comme le fongicide (Ethoprophos) et le nématicide (Thiofanate méthyl) ont un impact sur les microorganismes lorsqu'ils sont appliqués à de fortes doses. Les essais menés en plein champ pour évaluer l'impact de l'inoculation sur le rendement, en agriculture intensive, ont montré que l'apport des microorganismes s'est révélé plus bénéfique comparé à l'application des produits phytosanitaires à des doses réduites, car le rendement le plus important a été obtenu chez les plantes de tomate inoculées avec *Pseudomonas putida* (12,59 t/ha).

Mots clés : Inoculation - *Funneliformis mosseae* – *Pseudomonas putida* – pesticides - rendement

First and last name: Demba Diaw

Title: Evaluation of the potential of mycorrhizal and rhizobacterial inoculants on tomato development in Senegal

Abstract:

Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) is one of the main industrial crops. This crop is very sensitive to parasitic attacks. This justifies the intensive use of synthetic inputs to increase productivity. However, misuse of these products has adverse effects on human health and the environment. The objective of this study is to evaluate the impact of inoculation of beneficial microorganisms (arbuscular mycorrhizal fungi - fluorescent *Pseudomonas*) in vegetable production routes in order to reduce the use of phytosanitary products. Soil samples from the rhizosphere of tomato plants have been used to isolate and characterize different rhizobacterial isolates belonging to the group of fluorescent *Pseudomonas*. The identification of these isolates from phenotypic approaches and MALDI-TOF mass spectrometry revealed that all isolates belong to the same genus and species (*Pseudomonas putida*). The percentages of similarity obtained are between 76% and 92%. Tests carried out in a controlled environment have shown that these rhizobacteria are capable of associating with arbuscular mycorrhizal fungi. This is the case of the combination of the pair *Pseudomonas putida* - *Funneliformis mosseae* which results in an effective stimulation of the growth of tomato plants. High-performance couples were used to evaluate the impact of different doses of pesticides on these microorganisms. The results showed that the application of phytosanitary products such as fungicide (Ethoprophos) and nematicide (Thiofanate methyl) have a negative impact on microorganisms when applied at high doses. Field trials have shown that the contribution of microorganisms is more beneficial compared to reduced dose pesticides because the highest yield was obtained in tomato plants inoculated with *Pseudomonas putida* with 12.59 t / ha.

Key words: Inoculation – *Funneliformis mosseae* - *Pseudomonas putida* - pesticides - yield

Dédicaces

Je rends grâce au Tout Puissant Allah. Que la paix et la bénédiction soient sur le noble prophète Mouhammad, sa famille ainsi que les fidèles qui le suivront jusqu'au jour dernier.

Je dédie ce travail

A la mémoire de mon père Cheikh DIAW et de ma petite sœur Yaye Bineta DIAW,

A ma mère Thiouna DIOP, en reconnaissance d'affectueuse estime et de tendresse envers moi. Trouve ici tout ce dont je puisse faire ou formuler pour atteindre ton bonheur ici-bas et dans l'au-delà,

A tous mes frères et sœurs sans exception aucune,

A mon épouse Ndèye Arame DIAGNE, par son soutien, ses conseils et constants encouragements. Elle occupe une place importante dans mon cœur et m'a permis de surmonter les moments de doute et de découragement.

A mes enfants Fatima, Cheikh, Souleymane, et Thiouna DIAW

A ma belle-famille, Khary Gueye, Souleymane DIAGNE, Mame Aminata DIAGNE, Cheikh et Massar DIAGNE,

A mes oncles Manoumbé DIOP et toute Pape Omar DIOP.

Remerciements

Je rends grâce à ALLAH, le tout puissant, le miséricordieux, qui a exaucé mon rêve et m'a donnée force et patience pour accomplir ce modeste travail. Que la paix et la bénédiction soient sur le noble prophète Mouhammad, sa famille ainsi que les fidèles qui le suivront jusqu'au jour dernier.

Cette thèse de Doctorat a été réalisée au Laboratoire de Biotechnologies des Champignons (LBC) du département de Biologie Végétale de l'Université Cheikh Anta DIOP de Dakar.

Par ces quelques lignes, j'adresse mes sincères remerciements à tout le personnel avec lequel j'ai eu à collaborer, de près ou de loin, pour la réalisation de ce travail.

Je tiens à remercier Monsieur Aliou GUISSSE, Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de l'Université Cheikh Anta DIOP de Dakar, qui m'a fait l'honneur d'assurer la présidence de ce jury de thèse.

Je remercie également Madame Mame Arama FALL NDIAYE, Professeur à l'Université Cheikh Anta DIOP, pour son soutien, ses conseils, ses remarques et suggestions pertinents à améliorer la qualité de ce travail et d'en être rapporteur.

Un grand merci à Monsieur Anicet MANGA, Professeur à l'Université Gaston Berger de Saint Louis, pour avoir accepté de juger ce travail et d'en être rapporteur.

J'adresse mes vifs remerciements également à Monsieur Aboubacry KANE, Professeur à l'Université Cheikh Anta DIOP, pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail de recherche, en acceptant d'en être rapporteur.

Mes remerciements vont également à Monsieur Amadou Tidiane DIALLO, Professeur à l'Université de Thiès, pour avoir accepté d'examiner ce travail.

J'estime toute ma reconnaissance à mon directeur de thèse, Pr. Tahir Abdoulaye DIOP, Professeur à l'Université Amadou Mahtar Mbow (UAM) de Diamniadio, pour m'avoir

offre l'opportunité de réaliser cette thèse, d'assurer la direction et l'encadrement de mes travaux. Je vous suis reconnaissant pour vos conseils, votre patience, votre disponibilité et votre compréhension à mon égard. Merci autant de fois que vous le méritiez.

J'adresse mes sincères remerciements à toute l'équipe du Laboratoire de Biotechnologies des Champignons (LBC), en l'occurrence Dr Malick NDIAYE, Dr Bathie SARR, Dr Idy Carras SARE, Dr Ndiogou GUEYE, pour leurs conseils, disponibilités, leurs suggestions à améliorer la qualité de ce travail. Je leur souhaite beaucoup de succès dans leur carrière. Un grand merci également à Ndèye Fatou DEME, Diégane WADE, Adiouma DANGUE, Youssoupha Ali OUBEIDILLAH, Assane DIOP, Baye Mamadou MBAYE et Ibrahima FAYE.

Je remercie également tous les chercheurs associés au LBC, en l'occurrence le Professeur Adama DIOUF et Dr. Fatima NDIAYE.

Je remercie du fond du cœur, Monsieur Nalla MBAYE, Professeur à l'Université Cheikh Anta DIOP, pour avoir mis à ma disposition la parcelle expérimentale.

Je remercie particulièrement Monsieur Kassa DIAGNE, qui a facilité mon affection à Dakar pour la réalisation de ce travail, Monsieur Arébénor BASSENE et Monsieur Mbaye Babacar DIOUF pour leurs conseils et soutiens manifestes à mon égard.

Je remercie également Monsieur Cheikh Tidiane SY, ancien Principal du Collège d'Enseignement Moyen Ndiarka DIAGNE, Serigne Modou Moustapha POUYE, pour leur soutien à mon égard, ainsi que tous mes collègues et surveillants sans exception aucune.

Un grand merci à Abdallah LOUM et toute la famille de Darou Hikmah.

Je remercie également mes frères et sœurs en la foi, pour toute l'attention, le soutien sans faille que vous avez manifesté à mon égard, Younoussa DIALLO, Fatima DIA, Yaya Younoussa COLY, Zeynab DJIBA, Oumar NIANG, Mouhamed LO ainsi que les autres que je n'ai pas pu citer.

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Mécanismes d'action des bactéries solubilisant les phosphates (Khan et al., 2009)	6
Figure 2 : Principaux types mycorhiziens représentés sur une coupe transversale de racine d'après Le Tacon, 1985	12
Figure 3 : Arbre phylogénétique des glomérromycètes (Redecker et al., 2013)	14
Figure 4 : Aspects de la tige, de la fleur et des fruits chez la tomate	21
Figure 5 : Disposition des planches pour la pépinière.....	45
Figure 6 : Dispositif pour le repiquage des plantes de tomate.....	46
Figure 7 : Spectre de masse de l'isolat PS1a.....	51
Figure 8 : Spectre de masse de l'isolat PS1b.....	51
Figure 9 : Spectre de masse de l'isolat PS2.....	52
Figure 10 : Spectre de masse de l'isolat PS3a.....	52
Figure 11 : Spectre de masse de l'isolat PS3b.....	52
Figure 12 : Spectre de masse de l'isolat PS4.....	53
Figure 13 : Spectre de masse de l'isolat PS6.....	53
Figure 14 : Spectre de masse de l'isolat PS7.....	53
Figure 15 : Spectre de masse de l'isolat PS8.....	54
Figure 16 : Spectre de masse de l'isolat PS9.....	54
Figure 17 : Spectre de masse de l'isolat PS10.....	54
Figure 18 : Dendrogramme des 16 isolats bactériens.....	56
Figure 19 : Production d'inoculum mycorhizien.....	57
Figure 20 : Aspects des racines de maïs mycorhizées avec <i>Glomus aggregatum</i>	58
Figure 21 : Disposition des plantes de tomate au niveau des parcelles	70
Figure 22 : Fruits de tomates récoltés au niveau des parcelles.....	70
Figure 23 : Effet des microorganismes et produits phytosanitaires sur le rendement	71
Figure 24 : Indice de galle.....	72

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Classification de la tomate.....	20
Tableau 2 : Caractéristiques physico-chimiques du sable de plage (Diop, 2003).....	37
Tableau 3 : Caractéristiques physico-chimiques du sol de Sangalkam (Bâ <i>et al.</i> , 1999).....	39
Tableau 4 : calendrier, doses et mode d'application des produits phytosanitaires.....	43
Tableau 5 : Calendrier, doses et mode d'application des produits phytosanitaires en station expérimentale.....	47
Tableau 6 : Aspects macroscopiques de quelques isolats bactériens cultivés sur milieu King B.....	49
Tableau 7 : Pourcentages de similarité des isolats bactériens.....	55
Tableau 8 : Effet de l'inoculation sur les poids secs aériens, racinaires et la croissance en hauteur de la tomate sur sol stérile.....	60
Tableau 9 : Effet de l'inoculation sur les poids secs aériens, racinaires et la croissance en hauteur de la tomate sur sol non stérile.....	62
Tableau 10 : Effet des fongicide et nématicide aux doses recommandées sur la hauteur, les poids secs aériens et racinaires des plants de tomate après 3 mois de culture.....	65
Tableau 11 : Effet des fongicide et nématicide aux doses réduites sur la hauteur, les poids secs aériens et racinaires des plants de tomate après 3 mois de culture.....	67
Tableau 12 : Effet des microorganismes et produits phytosanitaires sur l'établissement de la mycorhization.....	69

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1: Annexe 1 : Milieu King B (King et al., 1954)	i
Annexe 2 : Principe MALDI-TOF	ii
Annexe 3 : Solution minérale de Long Ashton (Hewitt, 1966).....	iii
Annexe 4 : Notation de l'infection mycorhizienne (classe 0 à classe 5) selon Trouvelot et al. (1986) ..	iv
Annexe 5 : Notation : Echelle de Zeck, 1971	v

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

ACC : Acide 1- aminocyclopropane -1- carboxylique

AIA : Acide indole-3-acétique

CDH : Centre pour le Développement de l'Horticulture

CILSS : Comité permanent Inter-Etats de Lutte contre la Sécheresse dans le Sahel

CMA : Champignons Mycorhiziens Arbusculaires

DAPG : 2,4-diacetylphloroglucinol

E : Ethoprophos

FAO : Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'agriculture

Fm : *Funneliformis mosseae*

Ga : *Glomus aggregatum*

HCNI : Acide cyanhydrique

HPLC: High-Performance Liquid Chromatography

INSERM : Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale

ISR : Résistance Systémique Induite

ISRA : Institut National de Recherche Agricole

KB : King B

KOH : Hydroxyde de potassium

MALDI-TOF : Matrix-Assisted Laser Desorption/Ionization Time-Of- Flight

PAN : Pesticide Action Network

PGPR: Plant Growth Promoting Rhizobacteria

Ps : *Pseudomonas*

SENCHIM : Société Nationale des Produits Chimiques

SOCAS : Société de Conserves Alimentaires au Sénégal

SPIA : Société de Produits Industriels et Agricoles

Th : Thiofanate méthyle

ToMV : *Tomatomosaic virus*

TYLCV: *Tomato Yellow Leaf Curl Virus*

U.V : Ultraviolet

SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES	vi
LISTE DES TABLEAUX	vii
LISTE DES ANNEXES	viii
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS.....	ix
Introduction générale.....	1
REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	
I. La rhizosphère.....	4
1. Généralités.....	4
2. Les microorganismes de la rhizosphère : les CMA et les <i>Pseudomonas</i>	4
2.1. Les <i>Pseudomonas</i> spp fluorescents.....	5
2.1.1. Les effets directs	5
2.1.1.1. La solubilisation des phosphates par les <i>Pseudomonas</i> spp fluorescents.....	5
2.1.1.2. La production de sidérophores	7
2.1.1.3. La production de régulateurs de croissance.....	7
2.1.2. Les effets indirects	8
2.1.2.1. L'antibiose	8
2.1.2.2. La compétition	9
2.1.2.3. La résistance systémique induite ou ISR.....	9
2.2. La symbiose mycorhizienne.....	10
2.2.1. Généralités.....	10
2.2.2. Les types de mycorhizes	10
2.2.2.1. Les ectomycorhizes	11
2.2.2.2. Les ectendomycorhizes.....	11
2.2.2.3. Les endomycorhizes	11
2.2.3. Taxonomie des champignons mycorhiziens arbusculaires	12
2.2.4. Les effets bénéfiques des mycorhizes	14
2.2.4.1. L'amélioration de la nutrition minérale.....	15
2.2.4.2. La nutrition hydrique	16
2.2.4.3. La conservation de la structure du sol	16
2.2.4.4. La protection phytosanitaire	17
2.3. Les interactions entre champignons mycorhiziens arbusculaires et PGPR	18
II. La tomate	19
1. Généralités.....	19
2. La nomenclature et classification	19
3. Description botanique de la plante	20
4. Les variétés de tomate	21
4.1. Les variétés à port déterminé	21
4.2. Les variétés à port indéterminé	22
5. L'importance et la production de la tomate dans le monde	22

6.	La culture de la tomate au Sénégal.....	23
7.	Les exigences écologiques et climatiques de la plante de tomate.....	23
7.1.	La température	23
7.2.	La lumière	23
7.3.	L'eau et l'humidité.....	24
7.4.	Le pH	24
8.	Les pathologies et ravageurs de la tomate.....	24
8.1.	Les maladies parasitaires	24
8.1.1.	Les pathologies bactériennes	24
8.1.1.1.	Le flétrissement bactérien	24
8.1.1.2.	Le chancre bactérien	24
8.1.2.	Les pathologies virales	24
8.1.3.	Les pathologies fongiques	25
8.1.3.1.	La fusariose	25
8.1.3.2.	L'alternariose	25
8.2.	Les maladies non parasitaires	25
8.3.	Les ravageurs	25
8.3.1.	Les nématodes	25
8.3.2.	Les insectes	26
8.4.	Les méthodes de lutte contre les ennemis des cultures.....	26
8.4.1.	La lutte chimique.....	26
8.4.2.	La lutte biologique	26
8.4.3.	La lutte intégrée.....	27
III.	Les pesticides	27
1.	Définition	27
2.	La classification des pesticides et leur mode d'action	28
2.1.	Les herbicides	28
2.2.	Les fongicides	29
2.3.	Les insecticides	29
3.	L'utilisation des pesticides en agriculture au Sénégal	30
3.1.	Les modes d'utilisation des pesticides	30
3.2.	La fréquence d'utilisation des pesticides	31
4.	L'impact des pesticides	31
4.1.	Sur la santé humaine et animale.....	31
4.2.	Sur les microorganismes	32
4.3.	Sur l'environnement	32
MATERIEL ET METHODES		
I.	Isolement, identification des <i>Pseudomonas</i> et production d'inoculum	34
1.	Matériel bactérien.....	34
1.1.	Prélèvement des échantillons	34

1.2.	Isolement des souches	34
1.3.	Identification des isolats	34
1.3.1.	Approche phénotypique.....	35
1.3.2.	Identification protéomique par MALDI-TOF	35
1.4.	Conservation	36
1.5.	Préparation de l'inoculum bactérien	36
2.	Matériel fongique	36
2.1.	Production d'inoculum mycorhizien.....	36
2.2.	Caractérisation de l'inoculum mycorhizien	37
2.3.	Observations	38
II.	Interactions entre les champignons mycorhiziens et les bacteries en serre.....	38
1.	Préparation des terreaux	38
2.	Matériel végétal.....	39
3.	Semis	39
4.	Paramètres mesurés	40
III.	Effets de différentes doses de pesticides associées à des microorganismes (<i>Pseudomonas putida</i> et <i>Funneliformis mosseae</i>) sur la croissance de la tomate en conditions controlées	41
1.	Préparation du sol.....	41
2.	Application des produits phytosanitaires	41
3.	Dispositif expérimental	41
4.	Paramètres mesurés	44
5.	Analyses statistiques	44
IV.	Impact de l'inoculation de plants de tomate par des CMA et des <i>Pseudomonas putida</i> en agriculture intensive	44
1.	La pépinière.....	44
2.	Le repiquage.....	45
2.1.	Dispositif expérimental.....	45
2.2.	Le traitement phytosanitaire.....	47
2.3.	La fertilisation.....	47
3.	Paramètres mesurés	47
V.	Analyses statistiques.....	48

RESULTATS

I.	Isolement, identification des microorganismes et production d'inoculum	49
1.	Identification des isolats bactériens.....	49
1.1.	Approche phénotypique	49
1.2.	Identification protéomique (MALDI-TOF MS)	51

2. Caractérisation de l'inoculum mycorhizien.....	57
Conclusion.....	58
II. Interactions entre les champignons mycorhiziens et les bacteries en serre.....	58
1. Sol stérile.....	58
2. Sol non stérile.....	61
Conclusion.....	62
III. Effets de différentes doses de pesticides associées à des microorganismes (<i>Pseudomonas putida</i> et <i>Funneliformis mosseae</i>) sur la croissance de la tomate en conditions contrôlées	63
1. Effet des fongicide et nématocide aux doses recommandées	63
1.1. La croissance en hauteur	63
1.2. Effet sur le poids sec aérien	63
1.3. Effet sur le poids sec racinaire	64
2. Effet des fongicide et nématocide aux doses réduites sur la croissance	65
2.1. Effet sur la croissance en hauteur	65
2.2. Effet sur les poids secs aériens et racinaires	66
Conclusion.....	68
IV. Impact de l'inoculation de plants de tomate par des CMA et des <i>Pseudomonas putida</i> en agriculture intensive	68
1. Le taux de mycorhization.....	68
2. Le rendement.....	69
3. L'indice de Galle.....	72
Conclusion.....	73
DISCUSSION	
I. Isolement, identification des microorganismes et production d'inoculum	74
II. Interactions entre les champignons mycorhiziens et les bacteries en serre.....	75
III. Effets de différentes doses de pesticides associées à des microorganismes (<i>Pseudomonas putida</i> et <i>Funneliformis mosseae</i>) sur la croissance de la tomate en conditions contrôlées	77
IV. Impact de l'inoculation de plants de tomate par des CMA et des <i>Pseudomonas putida</i> en agriculture intensive	80
Conclusion générale et perspectives	85
Références bibliographiques	87
Annexes.....	i
Publications et Communications.....	vi

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

L'agriculture a constitué pendant longtemps la base de l'économie sénégalaise par sa contribution à la sécurité alimentaire des populations urbaines et rurales et la provision de ressources en devises, grâce notamment au dynamisme des exportations de produits arachidières. Ces dernières décennies, la contribution de l'agriculture au produit intérieur brut a progressivement diminué et se maintient actuellement autour de 10 %. Malgré tout, le secteur agricole continue de jouer un rôle primordial car il emploie près de 70 % de la population active (FAOSTAT, 2013). Parmi les types d'agriculture pratiqués au Sénégal, on peut citer : l'agriculture sous pluie et l'agriculture irriguée.

L'agriculture pluviale est fortement tributaire des conditions pluviométriques qui ne cessent de se dégrader ainsi que des disponibilités en terres productives. L'essentiel de la production agricole est à l'actif des cultures pluviales. Ce type d'agriculture, de nature particulièrement extensive, repose essentiellement sur l'activité des petites exploitations familiales qui constituent la majorité des ménages ruraux et elle est pratiquée dans toutes les zones agroécologiques du pays. Les principales spéculations concernées par ce type d'agriculture sont l'arachide (*Arachis hypogaea*), le mil (*Pennisetum glaucum*), le coton (*Gossypium barbadense*), le maïs (*Zea mays*) et le niébé (*Vigna unguiculata*) (F.A.O., 2007 ; Sall, 2015).

L'agriculture irriguée est aussi pratiquée dans toutes les zones agroécologiques du pays avec des proportions faibles de 5% par rapport à la culture sous pluie. Parmi les principales spéculations, nous avons la tomate (*Solanum lycopersicon* L.) qui occupe le deuxième rang des cultures horticoles après l'oignon. C'est une culture de saison sèche et fraîche, qui est utilisée pour la consommation interne au pays, mais aussi pour l'exportation, surtout comme produit transformé (APIX, 2007). Ce secteur revêt une importance stratégique dans l'agriculture sénégalaise, vu son rôle dans le renforcement des industries alimentaires en plus de la satisfaction de la consommation locale en tomates fraîches. Cependant, l'agriculture irriguée est principalement pratiquée dans la Vallée du fleuve Sénégal et la zone des Niayes. De nos jours, elle est une activité économique qui nécessite des investissements et des coûts de production plus élevés que lorsqu'il s'agit de l'agriculture sous pluie. Ainsi, l'obtention de rendements élevés est la seule préoccupation des producteurs maraîchers dont certains en ce qui concerne la zone des Niayes sont des « locataires » de parcelles mises en culture. Ces derniers, peu soucieux de la préservation du capital foncier, de la qualité des produits

alimentaires, encore moins de l'équilibre environnemental pratiquent un itinéraire technique de production maraichère basée sur l'utilisation élevée de ressources externes telles que les intrants de synthèse.

Parmi ces intrants, les pesticides occupent une place prépondérante et représentent dans certains cas, plus de la moitié des coûts de production. Les traitements phytosanitaires peuvent se faire jusqu'à trois fois dans la semaine, qu'il s'agisse de traitements préventifs ou curatifs, ceci en vue d'éradiquer les ravageurs des cultures et d'accéder à des rendements satisfaisants dans un contexte propice au développement des parasites (Cissé *et al.*, 2003). Plusieurs produits phytosanitaires sont utilisés parmi lesquels des insecticides (Diméthoate), des fongicides (Thiofanate méthyl, Soufre, Manèbe), des acaricides (Péropal, Tétradifon), des nématocides (Ethoprophos). Parfois, les usagers procèdent à des mélanges de produits dont ils ne maîtrisent ni le dosage, ni la rémanence, encore moins les propriétés physico-chimiques du produit (Cissé *et al.*, 2003).

Cependant, le recours aux pesticides comme facteur de protection et d'amélioration des rendements agricoles suscite de nombreuses inquiétudes liées à leur impact négatif sur l'homme et l'environnement. En ce qui concerne l'homme, plusieurs pathologies lui sont directement associées dans le long terme, notamment les cancers, les stérilités, les malformations congénitales, les déficiences mentales, les troubles neurologiques et de reproduction. A tous ces effets négatifs viennent s'ajouter les phénomènes de résistance de plus en plus accrue des agents pathogènes aux différents produits phytosanitaires, la dégradation des ressources naturelles et la contamination de la nappe phréatique (Cissé *et al.*, 2003).

Compte tenu de tous ces facteurs, il convient de proposer un itinéraire de production maraichère basée sur une réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires par une exploitation judicieuse de microorganismes telluriques. En effet, la rhizosphère est colonisée par de nombreux microorganismes parmi lesquels les champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA) et les bactéries nommées « Plant Growth Promoting Rhizobacteria » ou PGPR telles que les *Pseudomonas* fluorescents non pathogènes. Ces microorganismes peuvent jouer un rôle bénéfique pour la croissance le développement et la protection des cultures.

Les CMA sont capables de s'associer avec les racines des plantes pour former un organe mixte appelé mycorhize arbusculaire (MA). Cette association améliore la nutrition hydrominérale grâce aux transferts de l'eau et des éléments minéraux, en particulier le phosphore et l'azote, du CMA vers la plante hôte ; mais aussi la protection contre certains

pathogènes (Smith et Read, 2008 ; Sharma *et al.*, 2016). De nombreuses études ont aussi montré que les mycorhizes arbusculaires ont des effets positifs significatifs qui se traduisent par une amélioration de la croissance des plantes et des rendements (Usharani *et al.*, 2014). Par ailleurs, les PGPR présentent un énorme potentiel car ils sont considérés comme agent de biocontrôle des plantes en réduisant les effets délétères des phytopathogènes par la synthèse d'antibiotiques spécifiques (Fischer *et al.*, 2007). En plus, ils peuvent synthétiser les hormones de croissances (phytohormones) pour stimuler la croissance de la racine et aussi la plante (Baca et Elmerich, 2007) ou bien augmenter le rendement des cultures (Vessey, 2003). Ces résultats prometteurs permettent d'envisager avec l'utilisation de ces microorganismes dans la production maraîchère, des systèmes culturaux plus sains, avec une réduction de l'usage des pesticides, tout en assurant la rentabilité des cultures et la durabilité des sols.

Ainsi, l'objectif principal de cette étude est d'évaluer l'impact de l'inoculation de *Funneliformis mosseae* (CMA) et *Pseudomonas putida* (PGPR) dans la culture intensive de la tomate au Sénégal. Cette étude passera par deux objectifs spécifiques comportant chacun deux activités.

- Obtenir de l'inoculum de bonne qualité
 - Produire de l'inoculum à base de biofertilisants (champignons mycorhiziens arbusculaires et *Pseudomonas* fluorescents)
 - Sélectionner des microorganismes performants
- Vérifier la performance des souches
 - Evaluer l'impact des pesticides et de l'inoculation sur la croissance de la tomate en conditions contrôlées
 - Evaluer l'impact de l'inoculation des CMA et des *Pseudomonas* en agriculture intensive.

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

I. La rhizosphère

1. Généralités

Le terme de rhizosphère tire son origine du grec « *rhiza* » signifiant racine et du latin « *sphaira* » signifiant sphère. Le concept de rhizosphère a été introduit pour la première fois en 1904 par Lorenz Hiltner. La rhizosphère est définie comme étant la portion du sol immédiatement en contact avec les racines. Cet environnement est caractérisé par des interactions entre les exsudats racinaires et les microorganismes (Campbell et Greaves, 1990 ; Bell-Prekins et Lynch, 2002). Cette zone d'interaction s'étend de quelques micromètres à plus de 2 mm en dehors de la surface racinaire (Kennedy et de Luna, 2004). La rhizosphère comporte trois parties : l'endorhizosphère (intérieur de la racine), le rhizoplan (surface racinaire) et l'exorhizosphère ou le sol rhizosphérique (sol lié à la racine par opposition au sol distant) (Gray et Smith, 2005; Brimecombe *et al.*, 2007). De même, la densité des bactéries est plus élevée dans la rhizosphère que dans le sol distant des racines, il s'agit de « l'effet rhizosphère » (Lemanceau, 1992 ; Whipps, 2001 ; Lugtenberg et Kamilova, 2009) qui est un processus dynamique résultant d'interactions entre la plante hôte, le sol, les conditions climatiques, les pratiques culturales et les interactions au sein des communautés microbiennes (Katznelson *et al.*, 1962).

2. Les microorganismes de la rhizosphère : les CMA et les Pseudomonas

Parmi les microorganismes retrouvés dans le sol, certains vivent en symbiose ou en mutualisme avec les végétaux. Dans ces associations, les microorganismes peuvent être classés en deux catégories :

- Les micro-organismes qui colonisent l'extérieur de la racine c'est-à-dire, la rhizosphère ou le rhizoplan : ce sont les ectosymbiontes. C'est le cas des rhizobactéries comme les *Pseudomonas* (Gray et Smith, 2005).
- Les micro-organismes vivant à l'intérieur des cellules de la plante hôte : ce sont les endosymbiontes. Cette catégorie est constituée majoritairement de champignons dits endomycorhiziens, dont les hyphes pénètrent dans les cellules végétales jusqu'au plasmalemme en formant des arbuscules. Ces champignons sont définis sous le nom de champignons mycorhiziens arbusculaires et regroupent principalement l'ordre des glomales.

2.1. Les *Pseudomonas* spp fluorescents

Dans la rhizosphère, les bactéries constituent les microorganismes le plus nombreux et les plus variés. Certaines de ces bactéries peuvent jouer un rôle bénéfique pour la plante. C'est le cas des bactéries dites PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria) (Kloepper et Schroth 1978 ; Lugtenberg et Kamilova, 2009) également appelées rhizobactéries. Ces bactéries appartiennent à différents genres et espèces parmi lesquels les *Pseudomonas* spp fluorescents (Broadbent *et al.*, 1977 ; Leong, 1986). Le genre *Pseudomonas* découvert en 1894 par Migula appartient au phylum des Proteobacteria, classe des Gammaproteobacteria, famille des Pseudomonaceae, ordre des Pseudomonales (Moore *et al.* ; 2006). Il comprend plus d'une centaine d'espèces ubiquistes (Bossis *et al.*, 2000 ; Palleroni et Moore, 2004). Les bactéries appartenant au groupe des *Pseudomonas* spp. fluorescents sont parmi les plus abondantes dans la rhizosphère. Dans certains cas, elles représentent plus de 60 % de la microflore bactérienne totale du sol (Digat et Gardan, 1987). Ces bactéries mobiles sont des bacilles à Gram négatif de 0,5 à 5 micromètres de long, (Bell-Perkins et Lynch, 2002). Les différentes espèces de *Pseudomonas* sont divisées en 5 groupes selon leur ARNr. Le sous-groupe des *Pseudomonas* fluorescents est certainement le plus étudié. Il se caractérise par la production de pigments jaune-vert fluorescents (pyroverdine ou pseudobactine) dans des conditions de carence en fer. Parmi les espèces appartenant à ce groupe, on peut citer : *Pseudomonas aeruginosa*, espèce pathogène pour l'homme, *P. syringae*, espèce phytopathogène et *P. fluorescens*, *P. putida* et *P. Chlororaphis* rassemblent des espèces saprophytes (Hofte et Altier, 2010). Certaines de ces espèces de *Pseudomonas* influencent de manière bénéfique la plante en stimulant sa croissance (voie directe) et ou en la protégeant contre des infections par des agents phytopathologiques (voie indirecte) (Suslow, 1982 ; Kloepper *et al.*, 1991 et Digat, 1992).

2.1.1. Les effets directs

2.1.1.1. La solubilisation des phosphates par les *Pseudomonas* spp fluorescents

Après l'azote, le phosphore est l'élément le plus limitant pour les plantes qui sont capables seulement d'absorber ses formes solubles mono et dibasiques (H_2PO_4^- , HPO_4^{2-}) (Ramos Solano *et al.*, 2008b ; Keneni *et al.*, 2010). L'amélioration de l'alimentation minérale de la plante en phosphore a été la première hypothèse proposée pour expliquer l'effet bénéfique enregistré à la suite de la bactérisation des plantes (Gerretsen, 1948). En présence

de PGPR, le phosphore insoluble peut être rendu disponible pour les plantes soit par solubilisation des phosphates inorganiques, sous l'effet d'acides ; soit par une minéralisation des phosphates organiques grâce à des phosphatases, (Richardson, 2001 ; Chung *et al.*, 2005 ; Khan *et al.*, 2009 ; Kim *et al.*, 1998 in Weyens *et al.*, 2010). Dans le cas de la solubilisation des phosphates sous l'effet des acides, les acides gluconiques et 2 - céto gluconique sont les plus fréquemment rencontrés. Les acides glycolique, oxalique, malonique et succinique, ont également été identifiés. Certaines souches sont capables de produire en plus des mélanges d'acides lactiques, isovalérique, isobutyrique et acétique. La libération de ces acides mobilisant le phosphore par l'intermédiaire d'interactions ioniques avec les cations du sel de phosphate conduisent à l'acidification des cellules microbiennes et de leur environnement, permettant la libération du phosphate sous forme ionique (figure 1). La libération des groupements phosphates liés à la matière organique est assurée par l'action des phosphatases (Kumar et Narula 1999 ; Whitelaw, 2000 ; Gyaneshwar *et al.*, 2002). Les espèces de *Pseudomonas* spp. fluorescents comme *P. chlororaphis*, *P. putida* et *P. aeruginosa* ont été identifiées comme des rhizobactéries solubilisant le phosphate (Cattelan *et al.*, 1999 ; Bano et Musarat, 2003). Ces bactéries rhizosphériques solubilisant le phosphate pourraient être une source prometteuse comme agent biofertilisant dans l'agriculture (Sharma *et al.*, 2007).

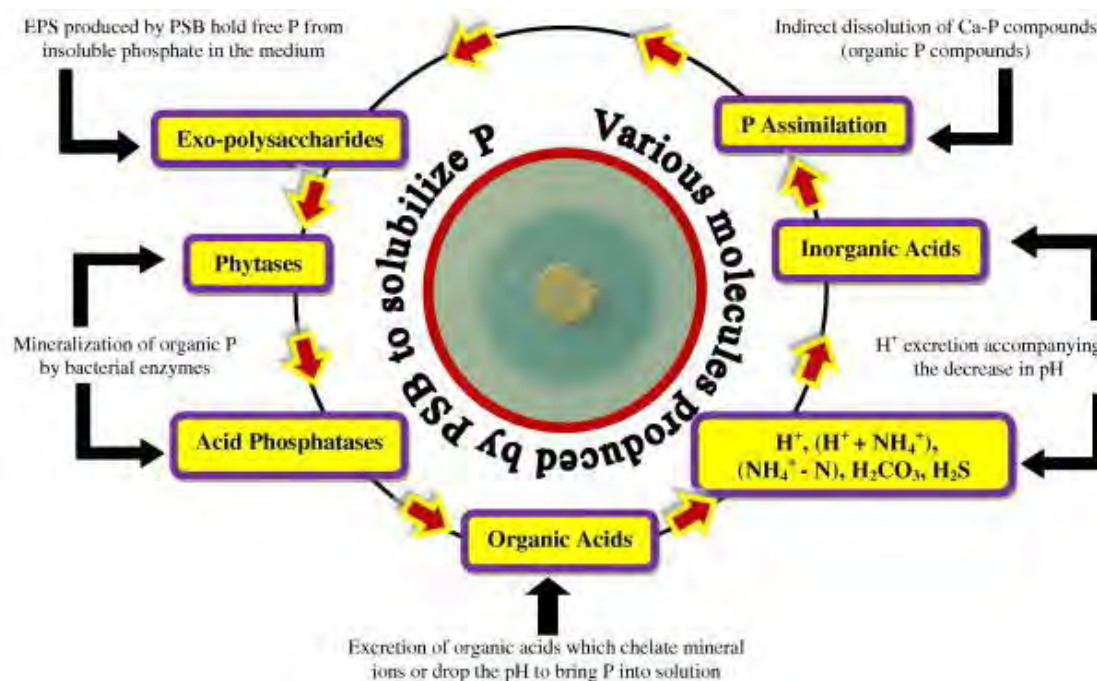


Figure 1: Mécanismes d'action des bactéries solubilisant les phosphates (Khan *et al.*, 2009)

2.1.1.2. La production de sidérophores

Le fer est un élément capital aussi bien pour les bactéries, les champignons ainsi que pour les plantes. Il est abondant dans le sol et se présente sous forme d'oxydes de fer (Compant *et al.*, 2005), mais il demeure souvent un facteur limitant pour la croissance des bactéries et des plantes. Pour acquérir cet élément indispensable et peu soluble, la plupart des microorganismes comme les *Pseudomonas* ont développé un mécanisme d'acquisition du fer qui repose sur la synthèse de sidérophores (Neilands, 1976 ; Leong, 1986). Ce sont des métabolites de faibles poids moléculaires qui présentent une forte affinité pour le fer (Fe^{3+}) (Neilands, 1976). Les sidérophores de bactéries rhizosphériques peuvent influencer directement l'alimentation de la plante en fer, comme ils peuvent causer l'inhibition des autres micro-organismes y compris les phytopathogènes dont l'affinité pour le fer est faible (O'sullivan et O'gara, 1992 ; Kapulnik 1996). Ils jouent également le rôle de chélateurs de métaux rhizosphériques ayant une faible disponibilité pour les plantes tels le Zn et le Pb (Dimkpa *et al.*, 2009).

2.1.1.3. La production de régulateurs de croissance

Plusieurs étapes de la croissance et du développement des plantes telles que l'élongation, la division cellulaire, la différenciation tissulaire et la dominance apicale sont régulées par des hormones. Les PGPR appartenant au genre *Pseudomonas* sont capables de produire des régulateurs de croissance végétale (Karnwal, 2009) : l'auxine (Acide indole-3-acétique AIA), les gibbérellines, les cytokinines, l'éthylène et l'acide abscissique (Mitter *et al.*, 2002 ; Lucy *et al.*, 2004 ; Zahir *et al.*, 2004 ; Tsakelova *et al.*, 2006; Joo *et al.*, 2009).

- L'AIA est le plus important du groupe des auxines, et les rhizobactéries produisant cette hormone sont connues pour leurs capacités à stimuler la croissance et augmenter la longueur des racines (Spaepen *et al.*, 2007 ; Ashrafuzzaman *et al.*, 2009) grâce à ces régulateurs de croissance. Il en résulte une surface racinaire plus grande et une accessibilité pour plus de nutriments pour la plante. Patten et Glick (2002), ont rapporté le rôle de l'AIA produit par *P. putida*, chez la plante hôte, dans le développement de son système racinaire.
- Les cytokinines forment une classe de phytohormones qui stimulent les divisions cellulaires, l'élargissement et le développement des tissus (Salisbury, 1994). La production de cytokinines a été rapportée chez *P. fluorescens* (Garcia *et al.*, 2001) .

- Les gibbérellines interviennent dans plusieurs processus tels que la germination des graines, la floraison, la fructification et la sénescence dans de nombreux organes d'une large gamme d'espèces végétales (MacMillan, 2002). Elles sont également impliquées dans la promotion de la croissance de la racine car elles régulent l'abondance des poils racinaires (Bottini *et al.*, 2004). La stimulation de la croissance des plantes par les PGPR productrices de gibbérellines est rapportée par plusieurs travaux et cet effet positif sur la biomasse végétale est souvent associé à une teneur accrue en gibbérellines dans les tissus végétaux (Atzhorn *et al.*, 1988 ; Gutierrez-Manero *et al.*, 2001; Joo *et al.*, 2009).
- L'éthylène est une phytohormone au rôle central dans la modulation de la croissance et du métabolisme cellulaire des végétaux (Ping et Boland, 2004). Elle est capable de lever la dormance des graines, favorise également la maturation des fruits et déclenche l'abscission des feuilles (Bleecker et Kende, 2000). La production d'éthylène par la plante peut être induite par n'importe quelle perturbation physique ou chimique des tissus (Salisbury, 1994). Cependant, l'élévation de sa concentration peut être à l'origine de l'inhibition de l'élongation racinaire et de la croissance des racines latérales (Mayak *et al.*, 2004). La diminution de la teneur de l'éthylène peut être réalisée en dégradant son précurseur direct, l'acide 1- Aminocyclopropane -1-carboxylique (ACC), à l'aide de l'ACC-désaminase. Cette enzyme est exprimée chez plusieurs rhizobactéries telles que les *Pseudomonas* spp (Glick *et al.*, 1994) . L'activité de l'ACC désaminase diminuerait la production d'éthylène et favoriserait un allongement des racines.

2.1.2. Les effets indirects

2.1.2.1. L'antibiose

L'antibiose consiste en une inhibition directe de la croissance du pathogène via la production de métabolites aux propriétés antifongiques et/ou antibiotiques. Les souches de *Pseudomonas* produisent une variété de métabolites antifongiques puissants. Il s'agit par exemple de l'acide cyanhydrique (HCN), la viscosamide, la pyolutéorine, le 2,4-diacetylphloroglucinol (DAPG), la pyrrolnitrine, les phénazines, les butyrolactones, les tensines et les tropolones (Haas et Defago, 2005). Howell et Stipanovic (1980) ont mis en évidence la synthèse de deux antibiotiques, la Pyrrolnitrine et la pyolutéorine, par une souche de *P. fluorescens*, capables d'inhiber *in-vitro* la croissance de *Pythium ultimum* (agent causal

de la fonte des semis et de la pourriture du collet des plantes) et de *rhizoctonia solani* (agent de la fonte des semis et de la pourriture des racines des plantes). Des études récentes rapportent que ces deux antibiotiques sont le support de l'activité biologique de plusieurs souches de *Pseudomonas* fluorescents envers une multitude d'agents pathogènes (Ligon *et al.*, 2000 ; Ramette *et al.*, 2011 ; Rosas *et al.*, 2011). Par ailleurs, Lindberg (1981) a établi le spectre d'activité d'un antibiotique, la tropolone, synthétisée par une souche de *Pseudomonas* qui manifeste des propriétés antagonistes à l'encontre de différents champignons : *Alternaria*, *cladosporium*, *Dioplotia*, *Fusarium*, *Helminthosporium*, *Pyricularia*, *Pythium*, *Rhizoctonia*.

2.1.2.2. La compétition

Les interactions microbiennes sont conditionnées par la nature et l'intensité de la compétition entre microorganismes (Lockwood, 1981 ; Alabouvette, 1983). Cette compétition s'exerce pour l'espace et les nutriments. Les *Pseudomonas* fluorescents participent à ces deux types de compétition. Toutefois, les PGPR doivent être présents sur les racines en nombre suffisant pour avoir un effet bénéfique et être capable d'instaurer une compétition pour les nutriments dans la rhizosphère (Haas et Defago, 2005). Cette colonisation importante des racines réduit le nombre de sites habitables pour les micro-organismes pathogènes et par conséquent, leur croissance (Piano *et al.*, 1997). L'essentiel de la compétition instaurée par les *Pseudomonas* fluorescents est de nature trophique, en particulier pour le fer. Ces micro-organismes bénéfiques ont la capacité de synthétiser des composés s'appropriant les ions ferriques présents dans la rhizosphère et les rendent ainsi indisponibles pour les microorganismes pathogènes, entraînant une diminution de leur croissance. Outre la vitesse de croissance intrinsèque, les autres propriétés renforçant le potentiel colonisateur d'une souche sont la mobilité grâce au flagelle (Jofre *et al.*, 2004), le chimiotactisme et la faculté d'utilisation des composés excrétés par les racines en tant que sources de carbone et d'azote (Berggren *et al.*, 2001; Gupta, 2003).

2.1.2.3. La résistance systémique induite ou ISR

La reconnaissance par la plante de certaines bactéries de la rhizosphère peut conduire à une réaction d'immunisation lui permettant de mieux se défendre vis-à-vis d'une attaque par un organisme pathogène (Van Loon, 2007). Cette « immunisation » de la plante est appelée résistance systémique induite (ISR) (Jourdan *et al.*, 2008). Elle s'initie suite à la perception par la plante de molécules dites élicitrices produites par le microorganisme bénéfique (Jourdanet *et al.*, 2008). Plusieurs molécules ont été identifiées comme étant des éliciteurs et

impliqués dans l'ISR : la flagelline (protéine du filament flagellaire) des rhizobactéries, les lipopolysaccharides (Meziane *et al.*, 2005), les sidérophores tels que les pyoverdines et la pyochéline (Bakker *et al.*, 2007 ; Meziane *et al.*, 2005), les antibiotiques (Audenaert *et al.*, 2002). Ce phénomène d'induction de résistance systémique par les rhizobactéries est considéré comme une stratégie prometteuse dans la lutte biologique contre les maladies des cultures (Ramos Solano *et al.*, 2008b). L'ISR peut être induite par des bactéries à Gram négatif qui appartiennent au genre *Pseudomonas* (*fluorescens*, *putida*, *aeruginosa*) (Jourdan *et al.*, 2008). Wei *et al.*, (1991) ont pu montrer que des souches du genre *Pseudomonas* suppriment l'antracnose par l'induction de la résistance systémique des plantes vis-à-vis de *Colletotrichum orbiculare*.

2.2. La symbiose mycorhizienne

2.2.1. Généralités

Depuis leur extension dans l'écosystème terrestre, les plantes ont adopté diverses stratégies d'adaptation. Parmi celles-ci, les systèmes racinaires ont établi des relations mutualistes, avec des microorganismes telluriques, désignées sous le nom de mycorhizes. D'origine gréco-latine, les mycorhizes (mukēs = champignon et rhiza = racine) sont apparues sur terre il y a environ 400 millions d'années (Simon *et al.*, 1993). Actuellement, les mycorhizes sont décrits comme étant des associations symbiotiques contractées par les racines des végétaux avec certains champignons du sol (Strullu, 1991). Ces relations symbiotiques sont caractérisées par un état d'équilibre physiologique permettant aux symbiotes impliqués, d'en retirer des bénéfices mutuels. La presque totalité des plantes vertes terrestres vivent en symbiose mycorhizienne. Seuls des membres de quelques familles en sont quelques fois dépourvus, par exemple, les crucifères et les chénopodiacées (Strullu, 1991 ; Norman *et al.*, 1995 ; Fortin *et al.*, 2008). A partir de l'examen de plus de 10 000 espèces en majorité des angiospermes, des structures mycorhiziennes ont été observées chez 86 % d'entre elles (Brundrett, 2009 ; Tedersoo *et al.*, 2010) sur une diversité végétale de 220 000 à 420 000 espèces de plantes terrestres (Scotland *et al.*, 2003).

2.2.2. Les types de mycorhizes

Les différents types de mycorhizes existant se distinguent à la fois par les groupes taxonomiques des partenaires symbiotiques impliqués et par les structures typiques formées par la symbiose. La position taxonomique de la plante et des partenaires fongiques définit les

types de mycorhizes que sont : les ectomycorhizes, les endomycorhizes ou ectendomycorhizes, selon les caractères anatomiques de l'association (Peyronel *et al.*, 1969).

2.2.2.1. Les ectomycorhizes

Les ectomycorhizes se développent essentiellement autour de la racine, en formant un manchon mycélien (le manteau) à partir duquel se développent des hyphes qui s'insèrent entre les cellules corticales de la racine (réseau de Hartig). La symbiose ectomycorhizienne ne concerne que 3 % des espèces végétales (Mousain, 1991). Les champignons ectomycorhiziens appartiennent aux ascomycètes (*Tuber*, *Elaphomyces*, etc) et surtout aux basidiomycètes (Bolets, Russules, Laccaire, etc). C'est plus de 25 000 espèces de plantes vasculaires qui portent ce type de mycorhize (Fortin *et al.*, 2008). Ces types de mycorhizes sont visibles à l'œil nu et varient en forme et en couleur suivant l'espèce fongique responsable de la symbiose (Ducouso et Thoen, 1991).

2.2.2.2. Les ectendomycorhizes

Les ectendomycorhizes sont caractérisées à la fois par la présence du manteau mycélien et le développement d'hyphes inter et intracellulaires. Elles se rencontrent chez les Arbutacées, les Monotropacées et sont formées par des Basidiomycètes (*Cortinarius*, *Boletus...*) (Mikola, 1948).

2.2.2.3. Les endomycorhizes

Les endomycorhizes sont caractérisées par l'absence de manchon mycélien externe et par la pénétration des hyphes fongiques dans les cellules corticales. Les champignons endomycorhiziens ne sont pas spécifiques et sont normalement associés aux plantes comme les plantes forestières agricoles et horticoles. Ces symbiotes à colonisation intracellulaire corticale, forment des arbuscules, des vésicules ou des hyphes. Trois types sont rencontrés (figure 2):

- Les endomycorhizes des Orchidées et des Ericacées formées respectivement par des Basidiomycètes et des Ascomycètes de la famille des Pezizaceae ; dans ces deux cas, le mycélium forme des pelotons à l'intérieur des cellules du parenchyme cortical.
- Les endomycorhizes des Cistacées où les pénétrations endocellulaires prennent une forme coralloïde ; les champignons symbiotiques responsables appartiennent aux Ascomycètes hypogés, de la famille des Terfeziaceae.

- Les endomycorhizes à arbuscules sont formées par des champignons inférieurs et concernent environ 80 % des espèces végétales (Smith et Read, 1997 ; Gavériaux, 2012 ; Garbaye, 2013). Ces associations doivent leur nom aux structures fongiques résultant des hyphes intracellulaires qui se ramifient intensément à l'intérieur des cellules du cortex racinaire pour former des structures appelées arbuscules. Ces hyphes peuvent former des vésicules (Bonfante-Fasolo, 1984).

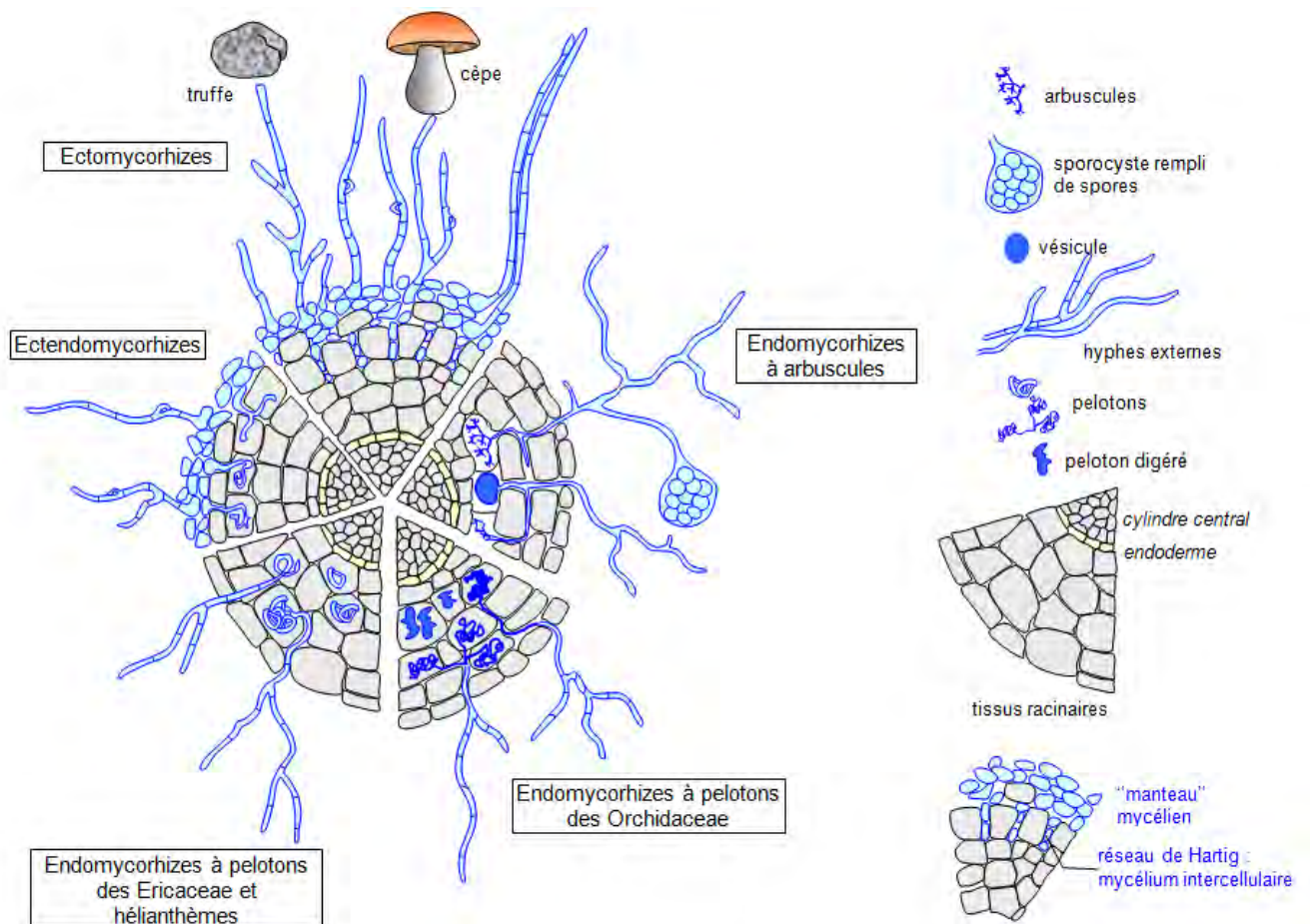


Figure 2 : Principaux types mycorhiziens représentés sur une coupe transversale de racine d'après Le Tacon, 1985

2.2.3. Taxonomie des champignons mycorhiziens arbusculaires

La systématique des champignons mycorhiziens à arbuscules reposait essentiellement sur des critères morphologiques des spores (Morton et Benny, 1990), mais cette classification restait limitée puisqu'elle ne permettait pas de décrire finement cette diversité fongique (Giovanetti et Gianinazzi-Pearson, 1994). La taxonomie actuelle, basée sur des analyses moléculaires a permis de regrouper toutes les espèces mycorhiziennes à arbuscules dans le

phylum des Gloméromycètes (Schüßler *et al.*, 2001) et de distinguer quatre ordres : les Glomérales, les Paragloméra, les Archéosporales et les Diversispora (Oehl *et al.*, 2011; Redecker *et al.*, 2013). Cependant, cette classification fait encore l'objet de plusieurs modifications et ou réorganisations majeures des rangs supérieurs de Glomeromycota (Oehl *et al.*, 2011) avec comme exemple le genre *Glomus* devenu *Rhizophagus* (Redecker *et al.*, 2013). Ce qui traduit une complexité supplémentaire de la taxonomie des champignons mycorhiziens arbusculaires (figure 3). Aujourd'hui, on dénombre environ 18 genres comprenant 250 espèces. La biodiversité des CMA est probablement sous-estimée (Wang et Li, 2013) du fait que la taxonomie actuelle repose sur des espèces isolées à partir de spores, alors que des techniques moléculaires émergentes permettent d'obtenir des séquences à partir de racines ou du sol, donnant ainsi accès à des espèces non-sporogènes ou difficilement détectables (Öpik *et al.*, 2013).

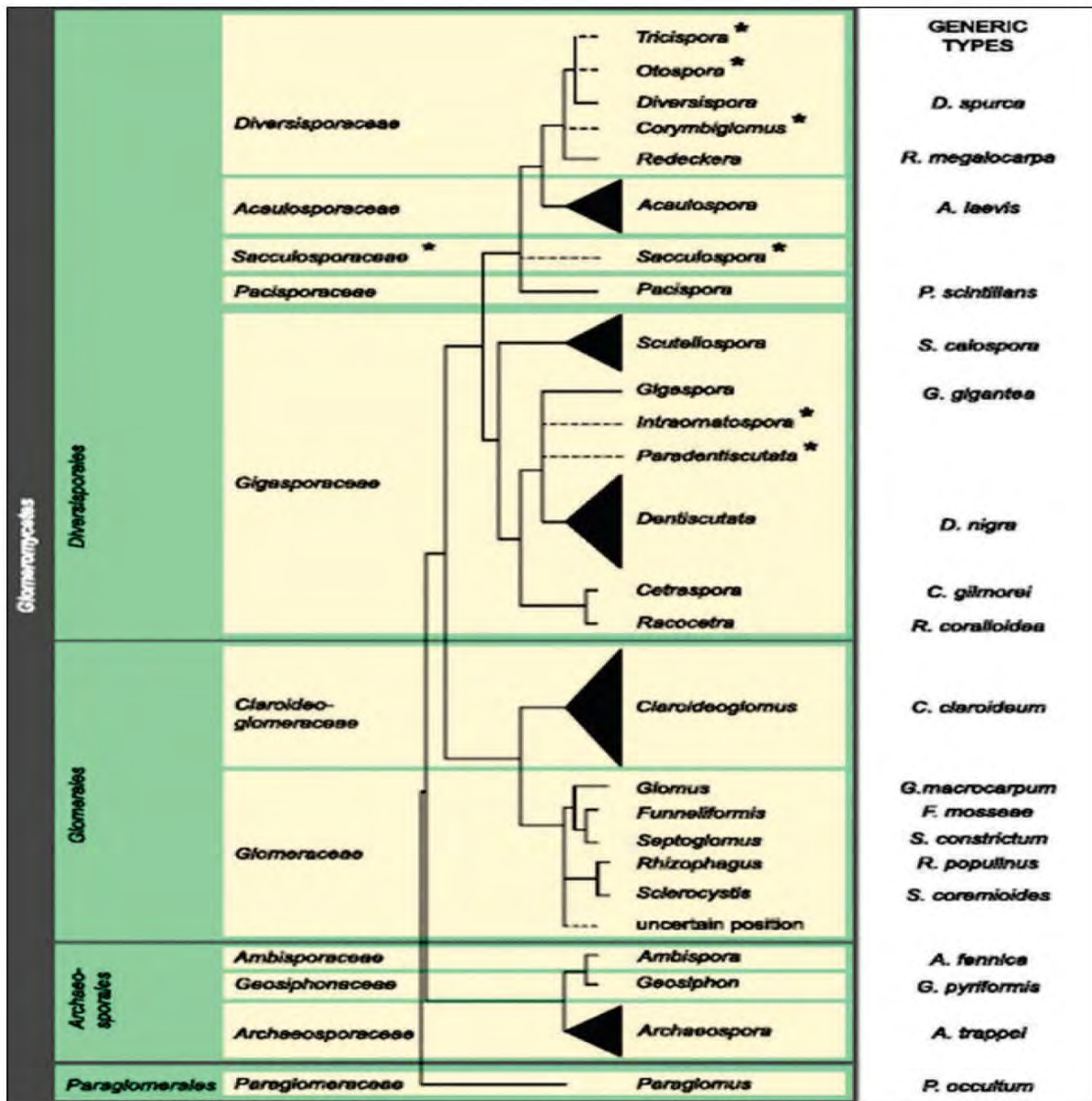


Figure 3 : Arbre phylogénétique des glomérormycètes (Redecker et al., 2013)

2.2.4. Les effets bénéfiques des mycorhizes

Les effets bénéfiques des champignons mycorrhiziens à arbuscules sur les plantes ne sont plus à démontrer. Dans la plupart des cas, le rôle majeur des CMA est l'amélioration de la nutrition hydrique et minérale de la plante : le phosphore (Helgason et Fitter, 2005 ; Feddermann *et al.*, 2010), l'azote (Tanaka et Yano, 2005 ; Leigh *et al.*, 2009) et d'autres cations essentiels tels que le zinc, le cuivre, le manganèse et le fer (Liu *et al.*, 2000). Ces microorganismes participent aussi à diverses tâches d'ordre écologiques et biologiques, pouvant avoir des répercussions positives sur les écosystèmes naturels.

2.2.4.1. L'amélioration de la nutrition minérale

- **La nutrition phosphatée**

Le phosphore se retrouve en grande partie immobilisé par le fer, l'aluminium ou le calcium sous des formes difficilement accessibles par les plantes (Hinsinger, 2001). L'amélioration de la nutrition phosphatée est considérée comme l'avantage principal apporté par la symbiose mycorhizienne à arbuscule (Smith *et al.*, 2003). L'efficacité du champignon à acquérir le phosphore tient à sa capacité d'exploration du sol et à ses aptitudes métaboliques. En effet, l'élongation des hyphes extra-racinaires augmente la surface d'échange entre les minéraux du sol et la racine. Il est estimé que la longueur des hyphes fongiques peut atteindre 81 à 111 m par cm³ de sol (Miller *et al.*, 1995). Ils peuvent ainsi explorer des zones non accessibles pour les plantes afin d'y prélever les éléments minéraux et les transférer à la plante hôte (Marulanda *et al.*, 2003 ; Khalvati *et al.*, 2005 ; Bolandnazar *et al.*, 2007). D'autre part, le CMA possède des phosphatases alcalines qui vont cliver des substrats présents dans le sol et rendre le phosphate accessible (Gianinazzi-Pearson et Gianinazzi, 1978 ; Gianinazzi *et al.*, 1979 ; Liu *et al.*, 2013). L'importation du phosphate du sol est effectuée par des transporteurs fortement exprimés dans les hyphes extra-racinaires (Harrison et Van Buuren, 1995 ; Maldonado-Mendoza *et al.*, 2001 ; Benedetto *et al.*, 2005). Le phosphate est ensuite converti en polyphosphate (entre 3 et des milliers de molécules de phosphate) qui est transporté vers les hyphes intra-racinaires. Le polyphosphate est alors hydrolysé, afin d'être transporté dans la plante par des transporteurs spécifiques (Pumplin *et al.*, 2012).

- **La nutrition azotée**

Comme le phosphore, l'azote fait partie des nutriments apportés de manière significative à la plante lors de la symbiose mycorhizienne (Govindarajulu *et al.*, 2005 ; Tanaka and Yano, 2005 ; Chalot *et al.*, 2006 ; Javelle *et al.*, 2008). Il entre dans la formation des phospholipides, des coenzymes et des acides aminés. L'azote est présent sous deux formes dans le sol : organique et minérale (nitrites, nitrates et ions ammonium). Le mycélium du CMA est capable de prélever l'azote sous forme d'ammonium (NH⁴⁺) (Johansen *et al.*, 1996), de nitrates (NO³⁻) (Bago *et al.*, 1996) et d'acides aminés (Hawkins *et al.*, 2000), avec une nette préférence pour les ions NH⁴⁺ (López-Pedrosa *et al.*, 2006). Les CMA possèdent un panel de transporteurs qui leur permettent de recruter différentes formes d'azote. C'est le cas par exemple chez *Rhizophagus irregularis* où deux transporteurs d'ammonium à haute affinité ont été

partiellement caractérisés. Après prélèvement, l'azote est transporté jusqu'aux hyphes intra-racinaires sous forme d'arginine, acide aminé prédominant dans les hyphes extra-racinaires (Jin *et al.*, 2005). Une fois dans les hyphes intra-racinaires, l'arginine serait hydrolysée par le cycle de l'urée afin de transférer l'azote à la plante (Govindarajulu *et al.*, 2005). Ce mécanisme nécessite l'intervention d'enzymes dont certaines ont été retrouvées chez *R. irregularis* et *Funneliformis mosseae* (Breuninger *et al.*, 2004 ; Govindarajulu *et al.*, 2005 ; Tian *et al.*, 2010 ; Tisserant *et al.*, 2012).

- **La nutrition en oligo-éléments**

Les oligo-éléments sont impliqués dans de nombreuses activités enzymatiques notamment dans la photosynthèse, la respiration oxydative, la protection contre les radicaux libres ou encore la biosynthèse des lipides (Fraústro Da Silva et Williams, 2001). Généralement, l'endomycorhization augmente l'absorption de certains de ces oligo-éléments tels que le Zn, S, Cu, etc (Harley et Smith, 1983 ; Graham et Syvertsen, 1989 ; Oihabi *et al.*, 1993 ; Duponnois et Bâ, 1999 ; Meddich *et al.*, 2000 ; He et Nara, 2007). Cet effet est lié à une meilleure exploitation du sol par le réseau extramatriciel.

2.2.4.2. La nutrition hydrique

Les CMA contribuent à la résistance des plantes à la sécheresse (Augé, 2001 ; Ruíz-Sánchez *et al.*, 2010). L'amélioration de la nutrition hydrique des plantes par l'intermédiaire des mycorhizes s'explique par un plus grand volume de sol exploré par les hyphes mycorhiziens (Garbaye, 2000 ; Auge, 2001). Chez les plantes mycorhizées, les hyphes du réseau extra racinaire, dépourvues de cloisons transversales et à cytoplasme peu abondant, facilitent le transport de l'eau vers les racines qui supportent mieux le dessèchement du sol et récupèrent plus rapidement leur turgescence après un apport d'eau (Gavériaux, 2012). Cependant, les mécanismes impliqués dans la protection des plantes mycorhizées face au stress hydrique seraient liés à une meilleure nutrition phosphatée qui améliore la photosynthèse et accroît la biomasse de la plante, mais aussi à un meilleur accès à l'eau du sol et au maintien de l'équilibre hydrique dans la plante (Augé, 2001).

2.2.4.3. La conservation de la structure du sol

Les CMA sont aussi des composantes essentielles pour le fonctionnement des écosystèmes naturels. Les denses réseaux mycéliens des CMA possèdent la propriété d'agir sur la macro-agrégation des constituants du sol et donc sur sa stabilité (Tisdall, 1991). Les

hyphes libèrent dans le sol une glycoprotéine, la glomaline (Tisdall, 1994 ; Wright et Upadhyaya, 1998) dont la concentration dans les sols dépend de la plante hôte et du champignon associé (Rillig et Steinberg, 2002). La glomaline agit comme une colle qui assemble les particules les plus fines du sol pour en faire des agrégats dont on connaît le rôle fondamental pour la fertilité des sols, en retenant l'eau et les éléments minéraux et en favorisant les échanges gazeux et l'aération (Fortin *et al.*, 2008). Cette stabilité du sol permet de lutter contre l'érosion, mais aussi la perte de nutriments et de la matière organique par lixiviation des sols, ce qui permet de maintenir une productivité intéressante des sols cultivés (Schreiner et Bethlenfalvay, 1995). Caravaca *et al.*, (2006) ont prouvé l'effet bénéfique de l'inoculation de certaines souches de CMA (*Glomus intraradices*, *Glomus deserticola* et *Glomus mossea*) sur la stabilisation des agrégats du sol rhizosphérique.

2.2.4.4. La protection phytosanitaire

Outre les effets nutritionnels, plusieurs travaux ont mis en évidence l'intérêt d'utiliser les CMA comme agent de biocontrôle contre les agents phytopathogènes (Sharma et Adholeya 2000 ; Harrier and Watson 2004 ; Whipps 2004 ; Mukerji et Ciancio, 2007). Le potentiel des mycorhizes arbusculaires comme agents de lutte biologique a été répertorié chez des dizaines d'espèces cultivées en association avec plusieurs glomérromycètes pour des infections d'origine principalement fongique et bactérienne. La majorité des études décrites dans la littérature concernent des infections racinaires impliquant des genres : *Rhizoctonia*, *Fusarium*, *Phytophthora* ou *Verticillium*. Néanmoins, il existe peu de travaux sur le rôle des mycorhizes arbusculaires dans la protection des plantes contre les maladies foliaires (Gernns *et al.*, 2001 ; Fritz *et al.*, 2006 ; Jung *et al.*, 2009 ; Moller *et al.*, 2009). Cette protection apportée par la colonisation mycorhizienne résulterait de cinq mécanismes d'action principaux :

- La stimulation de la croissance de la plante par une meilleure nutrition et la compensation par la symbiose des dommages causés par l'agent phytopathogène (Whipps, 2004 ; Dalpé, 2005 ; Pozo *et al.*, 2009 ; Wehner *et al.*, 2010) ;
- La compétition directe ou indirecte entre les CMA et les organismes phytopathogènes, liée à la disponibilité des nutriments, et des sites d'infection sur la racine (Whipps, 2004 ; Dalpé, 2005 ; Pozo *et al.*, 2009 ; Wehner *et al.*, 2010) ;
- La transformation morphologique et architecturale de la racine qui pourrait altérer la dynamique infectieuse du pathogène (Pozo *et al.*, 2009 ; Wehner *et al.*, 2010) ;

- La modification de la microflore et de l'augmentation du taux de matière organique dans les sols. Ces changements peuvent mener à la stimulation de la production de composés par la microflore avec une activité antagoniste vers certains pathogènes racinaires (Barea *et al.*, 2005 ; Dalpé, 2005 ; Pozo *et al.*, 2009 ; Wehner *et al.*, 2010) ;
- L'induction ou la suppression de certains mécanismes de défense des plantes, au niveau moléculaire et enzymatique (Ismail and Hijri, 2010 ; Gallou *et al.*, 2011 ; Jung *et al.*, 2012).

2.3. Les interactions entre champignons mycorhiziens arbusculaires et PGPR

Parmi les microorganismes de la rhizosphère, certains groupes interagissent avec les champignons mycorhiziens (Barea *et al.*, 2002). Les microorganismes bénéfiques de ces groupes, connus sous le nom de rhizobactéries promotrices de la croissance des plantes (PGPR) peuvent influencer la formation et la fonction des mycorhizes à arbuscules et vice versa (Saxena *et al.*, 2006). Elles peuvent produire des composés qui augmentent la perméabilité des cellules racinaires, le taux des exsudats racinaires et stimulent le mycélium du champignon mycorhizien ou facilitent l'entrée racinaire par le champignon (Barea, 2000). Des recherches menées sur la colonisation de *Glomus sp.* par une souche *Pseudomonas fluorescens*, ont montré que certaines souches de *Pseudomonas* sont capables de former des biofilms sur les racines (Lugtenberg *et al.*, 2001). L'analyse du biofilm formé a montré qu'il se compose de bactéries couvertes d'un matériel mucilagineux permettant l'hydratation des surfaces pour l'ensemble de l'agrégat bactérien. C'est ce matériel mucilagineux qui facilite la colonisation des racines et des hyphes (Bianciotto *et al.*, 1996 ; Bianciotto *et al.*, 2001 ; Matthyse and McMahan, 1998). Par ailleurs, les travaux de Siasou *et al.*, (2009) ont montré qu'une bactérie rhizosphérique telle que *Pseudomonas fluorescens* peut conférer une protection chez les plantes, notamment lorsqu'elles sont mycorhizées par *R. irregularis*, contre *Gaeumannomyces graminis*, l'agent causal du Piétin, en synthétisant un antibiotique, le 2,4-diacetylphloroglucinol. Il a été prouvé aussi que les exsudats du *Glomus sp.* contiennent des sucres de faibles masses moléculaires et des acides organiques, qui sont probablement métabolisés par les bactéries. D'autres composés de hautes masses moléculaires sont aussi présents, mais n'ont pas été identifiés, ces composés sont certainement responsables de la croissance des bactéries du sol (Toljander *et al.*, 2007).

II. La tomate

1. Généralités

La tomate (*Solanum lycopersicum* L.) est originaire de la région des Andes qui inclue la Colombie, l'Equateur, le Pérou, la Bolivie et le Chili (Rick, 1973 ; Taylor *et al.*, 1986 ; Warnock 1988). Elle fut domestiquée au Mexique, puis introduite en Europe en 1544 (Shankara *et al.*, 2005). De là, sa culture s'est propagée en Asie du Sud et de l'Est, en Afrique et en Moyen Orient. La tomate a longtemps été considérée comme toxique. D'abord utilisée en tant que plante ornementale (Kolev, 1976), elle commença à être largement commercialisée vers les années 1920-1930 (Menard, 2009). Aujourd'hui, C'est l'une des principales plantes alimentaires dont la culture est la plus répandue au monde (Shankara *et al.*, 2005). Selon la FAO, elle occupe la première place dans la production maraîchère après la pomme de terre.

2. La nomenclature et classification

Les botanistes ont modifié à plusieurs reprises les noms de genre et d'espèce attribués à la tomate. Linné (1753) avait classé la tomate dans le genre *Solanum*, en la nommant *Solanum lycopersicum* mais Philippe Miller (1754) la renomma *Lycopersicon esculentum* en créant le genre *Lycopersicon* qui regroupait les différentes espèces de tomate.

Le nom de genre « *Lycopersicum* » est gréco-latin, il signifie « pêche de loup » et la partie « *esculentum* » complétant le nom de l'espèce vient du latin et qui signifie « comestible ». Cette comestibilité ne concerne ni le feuillage, ni les jeunes fruits verts car ils contiennent des alcaloïdes toxiques (tomatine, solanine). Ces derniers disparaissent des fruits au cours du mûrissement (Blancard *et al.*, 2009).

Cronquist (1981), Gaussen *et al.*, (1982), ont proposé la classification suivante largement suivie (tableau 1).

Tableau 1 : Classification de la tomate

Règne	Plantae
Sous règne	Trachenobionta
Embranchement	Magnoliophyta
Classe	Magnoliopsida
Sous classe	Asteridae
Ordre	Soloniales
Famille	Solanaceae
Genre	<i>Solanum</i>
Espèce	<i>lycopersicum L.</i>

3. Description botanique de la plante

La tomate est une plante herbacée annuelle, poilue qui peut atteindre une hauteur de plus de deux mètres. Elle appartient au groupe des légumes-fruits (Baba Aissa, 1999).

La racine de la tomate pivotante pousse jusqu'à une profondeur de 50 cm ou plus. La racine principale produit une haute densité de racines latérales et adventices (Shankara *et al.*, 2005).

La tige présente un port de croissance qui varie entre érigé et prostré. Elle peut pousser jusqu'à une longueur de 2 à 4 m. La tige est pleine, fortement poilue et glandulaire.

Les feuilles, alternes et sans stipule mesurent 15 à 50 cm de long et 10 à 30 cm de large et le pétiole mesure entre 3 et 6 cm. Les folioles sont ovées à oblongues, couvertes de poils glandulaires (Shankara *et al.*, 2005). Les grandes folioles sont parfois pennatifides à la base.

L'inflorescence est une cyme formée de 6 à 12 fleurs. Les fleurs sont hermaphrodites et généralement de couleur jaunâtre (Anonyme, 1999). L'ensemble des sépales, pièces souvent verdâtres forment le calice. Les pétales sont en partie soudés pour former une corolle étoilée. Les étamines sont soudées pour former un tube dans lequel passe le pistil de la fleur.

Le fruit est une baie plus ou moins grosse (figure 4), de forme variable (sphérique, oblongue, allongée), et de couleurs variées (blanches, rose, rouge, jaune, orange, verte, noire) selon les variétés (Renaud, 2003).

Les graines, nombreuses en forme de rein ou de poire sont réparties dans des loges remplies de gel. Elles sont poilues, beiges, 3 à 5 mm de long et 2 à 4 mm de large. L'embryon est enroulé dans l'albumen. 1000 graines pèsent approximativement 2,5 à 3,5 g (Shankara *et al.*, 2005).

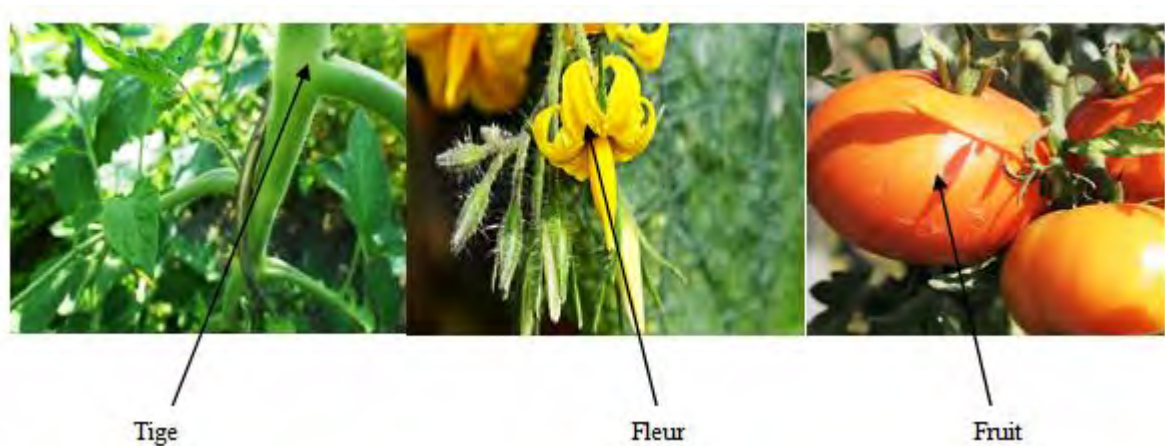


Figure 4 : Aspects de la tige, de la fleur et des fruits chez la tomate

4. Les variétés de tomate

La tomate présente plusieurs variétés en fonction des caractères morphologiques et botaniques. Ces variétés ont été identifiées selon le type de croissance qui peut être indéterminé ou déterminé (Polese, 2007).

4.1. Les variétés à port déterminé

Chez les variétés à croissance déterminée, la tige après avoir donné un faible nombre de bouquets, se termine elle-même par une inflorescence. Les pousses latérales se terminent également par une inflorescence. Les plantes ont un port buissonnant, leur croissance est souvent compacte et la floraison se produit sur une courte période (Mikanowski et Mikanowski, 1999). C'est dans ce type de tomate que l'on trouve, le plus souvent, les variétés industrielles de conserverie, cultivées en plein champ.

4.2. Les variétés à port indéterminé

Les variétés à croissance indéterminée sont les plus nombreuses et présentent un nombre indéfini d'inflorescences sur la tige principale comme sur les tiges latérales. Elles continuent de pousser et de produire des bouquets de fleurs tant que les conditions leur conviennent.

Chez ces plantes, leur tige doit être attachée à un tuteur sous peine de s'affaisser au sol. Elles ont une production plus étalée et sont plus productives en général que les tomates à port déterminé. On distingue :

- les variétés fixées : il existe plus de 500 variétés dont les caractéristiques génotypiques et phénotypiques se transmettent pour les générations descendantes. Elles sont sensibles aux maladies, mais donnent des fruits d'excellente qualité gustative (Polese, 2007).
- Les variétés hybrides : plus d'un millier, elles sont relativement récentes puisqu'elles n'existent que depuis les années 1960, qui, du fait de l'effet hétérosis, présentent la faculté de réunir plusieurs caractères d'intérêt (bonne précocité, bonne qualité de résistance aux maladies et aux attaques parasitaires et un bon rendement).

5. L'importance et la production de la tomate dans le monde

L'importance économique de la tomate devient réellement évidente au travers de l'évolution de sa production mondiale au cours du temps. La production mondiale de tomates a progressé régulièrement au cours du XXe siècle et s'est accrue considérablement durant les trois dernières décennies. Elle est passée de 74 millions de tonnes en 1978 à 89 millions en 1998 et atteint 124 millions en 2006. La tomate représente un enjeu économique, et est soumise à une concurrence importante. Cent cinquante millions de tonnes de tomates sont produites annuellement dans le monde (données FAO 2005) (Péron, 2006). Cette production se répartit sur tous les continents : 44 % en Asie, 22,5 % en Amérique, 21,5 % en Europe, 12 % en Afrique (Grasselly *et al.*, 2000). Les deux premiers pays producteurs mondiaux sont la Chine avec 25,34 % suivie des Etats Unis avec 8,84 %. La Turquie occupe le troisième rang mondial. De nombreux pays tels que l'Egypte, L'Inde, l'Iran, le Brésil, le Maroc et la Grèce produisent également chaque année plus d'un million de tonnes de tomates (Giove et Abis, 2007).

6. La culture de la tomate au Sénégal

La culture de la tomate est pratiquée au Sénégal sous irrigation, surtout pendant la saison froide c'est-à-dire la période qui va de septembre à fin mars. Les principales zones de culture sont la Vallée du fleuve Sénégal et la zone des Niayes. La tomate préfère des sols pas trop lourds, profonds et meubles, riches en éléments nutritifs et en matières organiques (ISRA, 1999). Au Sénégal, cette culture a connu une progression très variable au cours des dix dernières années. Les besoins nationaux en concentré de tomate sont estimés à près de 20 000 tonnes soit l'équivalent de 120 000 tonnes de tomates fraîches. Pour la campagne 2016 - 2017, la production de tomate industrielle a atteint 53000 tonnes contre 31827 tonnes pour la saison 2015-2016 soit une augmentation de plus de 20774 tonnes. Par ailleurs, le Sénégal dispose de plusieurs unités de production de concentré de tomates telles que SOCAS et AGROLINE (CGER, 2016).

7. Les exigences écologiques et climatiques de la plante de tomate

La culture de la tomate (*Solanum lycopersicum* L.) dépend de certains facteurs parmi lesquels on peut citer : le température, la lumière, l'eau, l'humidité et le pH.

7.1. La température

Les températures optimales pour la plupart des variétés se situent entre 21 et 24 °C. Les plantes peuvent surmonter un certain intervalle de températures, mais en dessous de 10 °C et au-dessus de 38 °C les tissus végétaux sont endommagés. L'équilibre et l'écart entre température diurne et nocturne, semblent nécessaire pour obtenir une bonne croissance et une bonne nouaison de la tomate (Shankara *et al.*, 2005).

7.2. La lumière

La tomate n'est pas sensible au photopériodisme, mais, exigeante en énergie lumineuse. La longueur de l'obscurité est essentielle pour le contrôle de la croissance et le développement de la plante. Un faible rayonnement lumineux réduit le nombre de fleurs par bouquet et affecte la fécondation (Cirad et Gret, 2002).

7.3. L'eau et l'humidité

La plante est très sensible à l'hygrométrie, elle ne tolère pas les sols engorgés ni l'humidité élevée (plus de 80 %). Par ailleurs, le développement des maladies cryptogamiques est fortement lié à de fortes humidités accompagnées de la chaleur (Laumonier, 1979). Il est essentiel de prévoir un apport d'eau suffisant pendant la fructification. Le stress causé par une carence en eau et les longues périodes arides font tomber les bourgeons et les fleurs et provoquent le fendillement des fruits (Munro et small, 1998).

7.4. Le pH

La tomate tolère modérément un large intervalle de valeurs du pH, mais, pousse mieux dans des sols avec des valeurs de pH comprises entre 5,5 et 6,8 (Shankara *et al.*, 2005).

8. Les pathologies et ravageurs de la tomate

Les maladies et les ravageurs font partie des principaux facteurs limitant la production de la tomate en plein champ (Nechadi *et al.*, 2002 ; Huat, 2006). On peut citer : les maladies parasitaires et d'origines abiotiques.

8.1. Les maladies parasitaires

8.1.1. Les pathologies bactériennes

8.1.1.1. Le flétrissement bactérien

Il est causé par une bactérie appelée *Ralstonia solanacearum*. Chez les plantes infectées, les premiers symptômes sont le flétrissement des feuilles terminales, suivi après 2 à 3 jours d'un flétrissement soudain et permanent sans jaunissement.

8.1.1.2. Le chancre bactérien

Il est causé par *Clavibacter michiganensis* (Benchaabane *et al.*, 2008). C'est une maladie qui peut entraîner des pertes économiques graves dans les cultures de tomates, qu'elles soient en serre ou en plein champ (Gleason *et al.*, 1993 ; Gartemann *et al.*, 2003).

8.1.2. Les pathologies virales

Beaucoup de virus ont été signalés dans la culture de la tomate parmi lesquels on peut citer :

- **TYLCV (*Tomato Yellow Leaf Curl Virus*)** ou maladie des feuilles causée par un virus qui est transmis par la mouche blanche *Bemisia tabaci*. La croissance des plantes atteintes est fortement perturbée. Les feuilles sont de tailles réduites et présentent un jaunissement ou un enroulement en forme de cuillères.
- **ToMV (*Tomato mosaic virus*)** cause de graves maladies dans la culture de la tomate. Les symptômes comprennent des feuilles tachetées vert-jaunes, des feuilles enroulées, une croissance chétive et des décolorations au niveau des fruits.

8.1.3. Les pathologies fongiques

Les pathologies fongiques sont causées par plusieurs types de champignons comme la fusariose et l'alternariose.

8.1.3.1. La fusariose

La fusariose est provoquée par *Fusarium oxysporum f.sp. lycopersici*. Les plantes infectées par ce mycète du sol présentent un jaunissement des feuilles et un flétrissement se propageant à partir de la base de la tige (Messiaen *et al.*, 1993).

8.1.3.2. L'alternariose

Le mycète responsable est *Alternaria tomatophila*. Il s'attaque à tous les organes aériens de la tomate et à tous les stades de croissances de la plante. Il occasionne surtout, des taches foliaires vert sombres, puis deviennent rapidement brunes à noires.

8.2. Les maladies non parasitaires

Elles sont essentiellement dues à des déséquilibres au niveau nutritionnel (eau ou éléments fertilisants) ou à des facteurs naturels défavorables (profondeur du sol ou drainage insuffisant). On peut citer entre autres la nécrose apicale, l'asphyxie racinaire, les fentes de croissance, la déformation nécrotique de la tige...

8.3. Les ravageurs

8.3.1. Les nématodes

Les nématodes sont des vers très petits qui vivent dans le sol en se nourrissant sur les racines de plantes. A titre d'exemple, on peut citer *Meloïdogyne icognita*, *Meloïdogyne*

arenaria et *Meloidogyne javanica*. Ils ont des organes perforateurs au niveau de la bouche qui leur permettent de sucer la sève des plantes. Ils provoquent des galles (des tumeurs cancéreuses) sur les racines des plantes. Les plantes atteintes sont de petites tailles et deviennent plus sensibles aux maladies fongiques et bactériennes transmises par le sol (Shankara *et al.*, 2005).

8.3.2. Les insectes

Tous les insectes qui piquent et qui sucent, tels que les thrips, les pucerons, et les mouches blanches, ne provoquent des dommages mécaniques que lorsqu'ils surviennent en grands nombres, mais les virus qu'ils peuvent transmettre, provoquent des dommages bien plus importants (Shankara *et al.*, 2005).

8.4. Les méthodes de lutte contre les ennemis des cultures

8.4.1. La lutte chimique

Il s'agit de l'utilisation quasiment systématique des pesticides de synthèse par les producteurs pour améliorer les rendements et répondre à la demande des marchés sans cesse croissante (Kanda *et al.*, 2013 ; Mondédji *et al.*, 2015). Bien qu'efficaces contre certains agents pathogènes, les pesticides utilisés ne sont pas accessibles à tous les producteurs à cause de leur coût élevé. Ils engendrent des problèmes environnementaux et des problèmes de santé humaine et animale. Par ailleurs, cette méthode de lutte entraîne souvent des phénomènes de résistance qui rendent les produits chimiques peu efficaces après quelques années d'utilisation (Houndété *et al.*, 2010 ; Mondédji *et al.*, 2015 ; Agboyi *et al.*, 2016). De ce fait, il est nécessaire de trouver des méthodes de lutte plus respectueuses de l'environnement, moins coûteuses, durables et facilement accessibles aux producteurs.

8.4.2. La lutte biologique

Cette méthode consiste à utiliser différents organismes vivants, appelés auxiliaires, ou de leurs produits, pour prévenir ou réduire les dégâts causés par les bio-agresseurs. Il s'agit d'utiliser la biodiversité et les ennemis naturels des espèces nuisibles (Fernandes, 2005). Par exemple plusieurs genres bactériens sont considérés comme agents de bio-contrôle antifongique (Esitken *et al.*, 2002 ; Badji *et al.*, 2005). Les bactéries les plus utilisées sont : *Pseudomonas* fluorescents non pathogènes tels que *Pseudomonas putida*, *P. fluorescens* ou bien certaines espèces appartenant au genre *Bacillus*. Plusieurs auteurs ont montré

l'importance de l'activité antibiotique des bactéries dans la limitation de la gravité des maladies d'origine tellurique (Altindag *et al.*, 2006). La lutte biologique est mieux contrôlée par un antagoniste bactérien, qui va interagir directement avec l'agent pathogène et/ou indirectement avec la plante hôte (Tomashow, 1996 ; Benhamou *et al.*, 2002). Par ailleurs, Certaines souches de champignons mycorhizens arbusculaires comme *Glomus versiforme* entraînent l'inhibition de *R. solanacearum* par une augmentation localisée et systémique de phénols dans les racines de tomate (Zhu et Yao, 2004). De même, la mycorhization du palmier dattier par *Glomus intraradices* permet une bonne croissance et une résistance du palmier aux attaques de *F. oxysporum* (Souana *et al.*, 2010).

8.4.3. La lutte intégrée

C'est la combinaison de plusieurs méthodes de lutte dans le but de limiter le développement des bioagresseurs des cultures afin qu'ils ne provoquent pas de dégâts économiques considérables, et d'une façon durable et respectueuse de l'environnement. Pour cela on combine :

- La lutte chimique raisonnée par le choix du moment d'application (seulement quand les populations d'un ravageur deviennent trop importantes) et par le choix de pesticides les plus inoffensifs possibles pour les auxiliaires. Il convient également de respecter les doses prescrites, le mouillage pour une surface donnée, les délais d'emploi des produits avant récolte et d'alterner les familles chimiques de pesticides pour éviter les phénomènes d'accoutumance ;
- La lutte biologique réalisée par les auxiliaires soit naturels soit introduits dans la culture ;
- Le respect de la prophylaxie au niveau de l'exploitation : choix des parcelles par rapport au vent, élimination des vieilles cultures, choix de variétés bien adaptées, bonne conduite des plantes (irrigation, fertilisation, désherbage...).

III. Les pesticides

1. Définition

L'étymologie du mot pesticide s'est construite à partir du mot anglais « pest » désignant tout organisme vivant (virus, bactéries, champignons, herbes, vers, mollusques, insectes, rongeurs, mammifères, oiseaux) susceptible d'être nuisible à l'homme et/ou à son

environnement et du suffixe «cide» qui signifie tuer. Les pesticides sont des composés chimiques dotés de propriétés toxicologiques, utilisés par les agriculteurs pour lutter contre les animaux ou les plantes jugés nuisibles aux plantations.

La FAO définit ainsi les pesticides : « toute substance ou association de substances qui est destinée à repousser, détruire ou combattre les ravageurs, y compris les vecteurs de maladies humaines ou animales, les espèces indésirables de plantes ou d'animaux causant des dommages ou se montrant autrement nuisibles durant la production, la transformation, le stockage, le transport ou la commercialisation des denrées alimentaires, des produits agricoles, du bois et des produits ligneux, des aliments pour animaux, ou qui peut être administrée aux animaux pour combattre les insectes, les arachnides et autres endo ou ectoparasites. » (FAO, 2002).

Le terme, encore appelé produit phytopharmaceutique comprend les substances destinées à être utilisées comme régulateurs de croissance des plantes, défoliants, agent de dessiccation, comme agent d'éclaircissage des fruits ou pour empêcher la chute prématurée des fruits, ainsi que les substances appliquées sur les cultures, soit avant, soit après la récolte, pour protéger les produits contre la détérioration durant l'entreposage et le transport ».

2. La classification des pesticides et leur mode d'action

Les pesticides peuvent être classés en fonction de leur cible principale. Les trois catégories principales sont : les herbicides, les fongicides, les insecticides (Regnault-Roger, 2005 ; INSERM, 2013)

2.1. Les herbicides

Les herbicides sont des substances chargées de ralentir la croissance ou de détruire les mauvaises herbes nommées adventices. Ces adventices sont considérés comme ennemis des cultures car elles entrent en compétition avec ces dernières pour la ressource organique et minérale du sol, l'eau, l'espace et la lumière.

Les herbicides possèdent différents sites d'actions sur les plantes. Les substances actives de ces composés affectent la croissance des plantes en agissant sur la synthèse des protéines et la division cellulaire (2,4-D, le dichloprope et le 2, 4,5-T par exemple), inhibent la synthèse d'acides aminés (le glyphosate par exemple), de pigments, de la cellulose (Batsch, 2011 ; INSERM, 2013).

2.2. Les fongicides

Les fongicides agricoles permettent de combattre les champignons phytopathogènes susceptibles de provoquer des dégâts sur les plantes cultivées et les récoltes. Les fongicides peuvent agir sur les processus respiratoires cellulaires, le métabolisme des glucides, la biosynthèse des protéines, la division cellulaire... (INSERM, 2013)

On distingue deux grands groupes de fongicides : les fongicides minéraux et les fongicides organiques qui sont majoritairement des produits de synthèse.

Parmi les fongicides minéraux on trouve : les fongicides à base de cuivre qui sont les plus nombreux et les plus fréquents, les fongicides à base de soufre ou de permanganate de potassium.

Les fongicides organiques représentent un groupe important de molécules dont la structure chimique est variée. On distingue : les carbamates, les dérivés du phénol, les dicarboximides, les amides et amines, les anilinopyrimidines, les méthoxyacrylates et fongicides apparentés.

2.3. Les insecticides

Les insecticides sont des substances actives ayant la propriété de tuer les insectes, leurs larves et/ou leurs œufs. Les insecticides peuvent agir sur le système nerveux (inhibition de l'acétylcholinestérase, ouverture du canal sodium,...), la respiration cellulaire (inhibition du transport des électrons dans la mitochondrie,...), la mise en place de la cuticule,... (INSERM, 2013).

Les insecticides organiques de synthèse sont des molécules carbonées, synthétisées, et se distinguent des insecticides inorganiques ou minéraux. Parmi les insecticides organiques, trois grandes familles se distinguent : les organochlorés contenant du carbone, de l'hydrogène et des atomes de chlore, les organophosphorés, les carbamates qui sont des dérivés de l'acide carbamique.

A ces trois principaux groupes se rajoutent d'autres qui peuvent agir par contact (sur les parasites cibles), ingestion, pression de vapeur, piège (confusion sexuelle par phéromone). Il s'agit : des acaricides (pour la lutte contre les acariens, et qui sont souvent intégrés aux insecticides), des rodenticides (contre les petits rongeurs), des nématicides (contre les vers),

des molluscicides (contre les escargots et les limaces)..., des médiateurs chimiques (phéromones),... (INSERM, 2013).

3. L'utilisation des pesticides en agriculture au Sénégal

L'agriculture sénégalaise utilise en moyenne annuellement 598 tonnes de pesticides solides et 1 336 560 litres de pesticides liquides pour une valeur de près de 11 milliards de francs CFA (PAN, 2006). Les quantités utilisées sont destinées aux traitements des cultures et des denrées stockées et peuvent s'accroître de façon exceptionnelle en cas de fléaux (invasions acridiennes). Par exemple dans le secteur maraîcher, les quantités utilisées sont de l'ordre de 225 000 à 250 000 litres et de 200 à 250 tonnes de poudres et granulés. Les familles chimiques représentées sont les organochlorés, les carbamates, les organophosphorés, les pyréthrinoïdes, les phytohormones de synthèse, les triazines, les amides, les dérivés de l'urée, les dithiocarbamates, les benzimidazolés, les triazoles, les diazoles, les anticoagulants, etc. La plupart des produits phytosanitaires vendus au Sénégal sont formulés sur place par la SPIA et la SENCHIM. Une partie non négligeable du commerce de ces produits chimiques relève du secteur informel.

3.1. Les modes d'utilisation des pesticides

Trois modes d'utilisation sont notés dans le système de production horticole en relation souvent avec la taille de l'exploitation (Cissé *et al.*, 2003).

L'utilisation par aspersion qui est pratiquée par les petits maraîchers cultivant sur de très petites surfaces de 0,1 à 0,2 hectare. Elle consiste à traiter les attaques parasitaires à l'aide d'un seau contenant la solution de pesticide et de branchages comme aspersion. Quand il s'agit de poudre, le saupoudrage à la main sans gants ni masque de protection est pratiqué par les agriculteurs. Cette façon de traiter a été observée dans la grande Niaye de Pikine (Cissé *et al.*, 2003).

Le traitement avec un pulvérisateur manuel ou motorisé est le plus répandu dans les Niayes. Il est appliqué aussi bien chez les petits et moyens exploitants.

Le traitement par ferti-irrigation utilisé en association avec l'irrigation au "goutte à goutte" ou aspersion. Les produits phytosanitaires et les engrais solubles sont directement injectés dans le système d'irrigation. Il est exclusivement utilisé par les grands et quelques moyens exploitants.

3.2. La fréquence d'utilisation des pesticides

La fréquence d'utilisation des produits phytosanitaires varie d'un producteur à un autre. Au niveau des grands producteurs, le traitement phytosanitaire est plus rationalisé, car, tenant compte des impératifs du marché extérieur et du respect scrupuleux des normes exigées par l'Union Européenne en matière de résidus de pesticide dans les produits agricoles exportés. En revanche, chez les petits producteurs, la fréquence d'utilisation des produits phytosanitaires est plus conditionnée par la disposition du produit que par la présence des attaques. C'est ainsi qu'il est fréquent d'observer chez eux des traitements souvent préventifs. En période de forte attaque parasitaire, les traitements peuvent se faire jusqu'à trois fois dans la semaine (Cissé *et al.*, 2003).

4. L'impact des pesticides

4.1. Sur la santé humaine et animale

L'utilisation des pesticides en milieu agricole présente des effets néfastes tant au niveau des utilisateurs qu'au niveau des consommateurs (Ramade, 1992 ; Toé *et al.*, 2000 ; 2002 ; Toé *et al.*, 2004). L'Afrique reste l'une des régions où les pesticides causent le plus de dégâts, totalisant la moitié des empoisonnements accidentels et plus de 75 % des cas mortels (Thiam et Sagna, 2009). De nombreux facteurs socio-économiques permettent d'expliquer cette situation tels que le taux d'analphabétisme élevé, le faible niveau économique, l'absence d'équipements de protection individuelle, de lieux de stockage adéquats, le non-respect des bonnes pratiques,...

Au Sénégal, des enquêtes menées dans la zone des Niayes de Dakar ont révélé qu'environ 25 % des exploitants maraîchers ont été très probablement victimes d'une intoxication par les pesticides. Dans cette même zone, il a été signalé que 26 % des victimes d'intoxication ne peuvent se souvenir du produit incriminé. L'une des intoxications les plus fréquentes est l'intoxication avec des signes neurologiques, dont 52 % de cas souffrant souvent de nausées, de vertiges, d'étourdissements. Avec l'utilisation des pesticides persistants tels que les pesticides organochlorés, les risques sanitaires sont amplifiés. En effet, ces pesticides cancérogènes, mutagènes et tératogènes pour la plupart d'entre eux, s'accumulent dans les milieux et se transmettent à travers la chaîne alimentaire. Si dans les pays développés des études épidémiologiques ont permis de déterminer les conséquences sanitaires liées à l'usage

des pesticides, le problème reste encore entier pour les pays en développement de l'Afrique (Cissé *et al.*, 2003).

4.2. Sur les microorganismes

Les activités agricoles peuvent engendrer une pollution du sol à cause de mauvaises pratiques ou de manipulations accidentelles des produits phytosanitaires. Les microorganismes sont les premiers à subir les impacts directs et indirects des polluants du sol.

Les polluants organiques et inorganiques pourraient avoir des effets délétères sur la structure, la formation et la fonction des champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA) telles que la germination des spores, la croissance hyphale et le taux de colonisation. Il a été démontré que la germination des spores de CMA et l'élongation des hyphes germinatives sont inhibées en présence de fongicides (Calonne *et al.*, 2010 ; Twanabasu *et al.*, 2013 ; Zocco *et al.*, 2008). Ce qui entraîne une réduction du taux de mycorhization chez les plantes cultivées. Les effets négatifs de ces polluants sur les CMA interviennent aux stades pré-symbiotiques ou symbiotiques (Debiane *et al.*, 2009). Cela se répercute par la suite sur la colonisation racinaire (Campagnac *et al.*, 2010). Les polluants organiques peuvent aussi avoir des effets sur l'activité des CMA en affectant le transfert du carbone de la plante vers le champignon (Wang *et al.*, 2006).

Les herbicides utilisés par les agronomes dans les pratiques agricoles modernes pour compenser la productivité des cultures sont nuisibles pour les communautés microbiennes bénéfiques telles que les rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR), ce qui pourrait affecter indirectement la fertilité du sol (Ahemad *et al.*, 2009). Ces microorganismes naturellement abondants sont métaboliquement inactivés par les herbicides appliqués de manière excessive aux sols (Singh et Wright, 2002 ; Bellinaso *et al.*, 2003 ; Barriuso *et al.*, 2010).

4.3. Sur l'environnement

L'utilisation des pesticides peut également avoir des effets néfastes sur les ressources naturelles et les écosystèmes. En effet, la pollution des eaux, des sols et de l'atmosphère, ont été mise en exergue par de nombreuses études (Cissé *et al.*, 2003 ; Toé *et al.*, 2004 ; Illa, 2004 ; Topan, 2005). Lors des traitements phytosanitaires, une bonne partie des pesticides se dépose sur le sol et atteint la nappe phréatique, surtout dans les endroits où elle est affleurante.

Les analyses faites sur 20 puits au niveau de la nappe phréatique dans la zone des Niayes de Dakar montrent des niveaux de pollution élevés dépassant les normes de potabilité. (Cissé *et al.*, 2003).

MATERIEL ET METHODES

I. Isolement, identification des *Pseudomonas* et production d'inoculum

1. Matériel bactérien

1.1. Prélèvement des échantillons

Pour l'obtention des souches de *Pseudomonas*, des échantillons de 100 g de sol ont été prélevés au niveau du Centre pour le Développement de l'Horticulture (CDH) (situé à la station de Cambérène, zone éco-géographique des Niayes, Région de Dakar, Sénégal). Cette zone a été choisie pour sa vocation maraîchère. L'échantillonnage a été effectué sur une parcelle de tomate en période de contre saison (février). Il s'agit de sols provenant de la rhizosphère de plantes de tomate au stade de fructification, et d'un sol nu (sol non cultivé). Les échantillons ont été prélevés sur une profondeur de 0 à 25 cm.

1.2. Isolement des souches

L'isolement des *Pseudomonas* a été effectué par la méthode des suspensions-dilutions décrite par Vidhyasekaran *et al.*, (1987). Les racines ont été d'abord débarrassées de la terre facilement détachable. A partir de chaque échantillon, 1 g de sol a été mis en suspension dans 10 ml de MgSO₄, 7 H₂O stérile 0,1 M. Après agitation pendant 10 minutes à l'aide d'un vortex, des dilutions décimales (10⁻¹ à 10⁻⁸) ont été réalisées à partir de cette suspension. Un volume de 0,1 ml de chaque suspension a été étalé dans des boîtes de Petri contenant chacune 10 ml de milieu gélosé de King B (King *et al.*, 1954) (Annexe 1). Les boîtes de Petri ont été incubées à 28 °C à l'obscurité.

Au bout de 48 heures d'incubation, les colonies bactériennes ont été observées sous une lampe U.V. à une longueur d'onde de 365 nm. Au total, 18 isolats produisant un pigment fluorescent ont été sélectionnés et purifiés par étalement en stries sur le milieu solide KB puis désignés par un code (PS_{1a}, PS_{1b}, PS_{2a}, ... PS_{10b}).

1.3. Identification des isolats

L'identification des isolats bactériens a été réalisée suivant deux techniques : une approche phénotypique et une analyse du contenu protéique des isolats à partir de la spectrométrie de masse MALDI-TOF (Matrix-Assisted Laser Desorption/Ionization Time-Of-Flight).

1.3.1. Approche phénotypique

L'identification phénotypique des isolats a été réalisée en utilisant une gamme de critères morphologiques tels que l'aspect macroscopique des colonies (taille, couleur, forme, fluorescence...)

1.3.2. Identification protéomique par MALDI-TOF

Cette technique a été réalisée selon le protocole de Seng *et al.*, 2009 et Bizzini et Greub, 2010. Les étapes de l'identification bactérienne par le MALDI-TOF MS sont les suivantes : une matrice est préalablement préparée en diluant une solution saturée d' α -cyano-4-hydroxycinnamic acid (HCCA) (SigmaH, Lyon, France) dans 500 μ l d'acétonitrile 50 % (v/v), 250 μ l d'acide trifluoroacétique (TFA) 10 % (v/v) et 250 μ l d'eau HPLC. L'ensemble est secoué vigoureusement, soniqué pendant 10 min, centrifugé (13000 g, 5min) puis transféré dans un tube polypropylène propre. Chaque colonie bactérienne obtenue à partir d'une culture jeune (24h) est déposée en double sur la plaque cible MALDI-TOF à l'aide d'un objet stérile sous la forme d'un fin frottis ; puis recouverte par 1,5 μ l de la solution de la matrice. L'ensemble (plaque cible et matrice) est séché pendant 5 min sous la hotte, avant d'être soumis dans l'appareil MALDI-TOF MS pour l'identification bactérienne. Chaque dépôt est soumis à l'action du rayon laser UV (337nm, 20Hz), entraînant l'ionisation et la désorption des molécules (MALDI). Les molécules ionisées vont alors passer dans un tube de vol. Elles sont séparées selon leur rapport masse/charge (m/z) en fonction de leur temps de vol (TOF) (Annexe 2). Les ions atteignent un détecteur qui va amplifier le signal traduit sous la forme d'un spectre caractéristique de chaque espèce. L'acquisition des spectres est réalisée grâce au logiciel Maldi BioTyper. Cette méthode discrimine les bactéries sur la base du criblage de pics caractéristiques observés en tant que biomarqueurs pour l'identification des bactéries (Hollande *et al.*, 1996). Cette stratégie est améliorée par l'utilisation de plusieurs souches de référence pour chacune des espèces, qui doivent être incluses dans la base de données (Williams *et al.*, 2003 ; Chen, 2008). L'identification est considérée comme acceptable si l'indice de confiance varie entre 60 et 99 %. Si l'indice de confiance est inférieur à 60 %, cela signifie qu'il s'agit d'une faible probabilité d'identification.

1.4. Conservation

Les souches de *Pseudomonas* fluorescents ont été conservées à - 20 °C dans des tubes Eppendorf de 2 ml, contenant une solution de glycérol et 1 ml de culture pure de *Pseudomonas* fluorescents.

1.5. Préparation de l'inoculum bactérien

Les souches de *Pseudomonas* fluorescents ont été cultivées dans des boîtes de Petri sur milieu gélosé KB puis incubées à 28 °C pendant 24h. Une colonie de chaque souche a été ensemencée dans des erlenmeyers de 100 ml contenant le milieu KB liquide. L'incubation a été faite sur une table en agitation permanente pendant 48 h à l'obscurité et à 28 °C.

2. Matériel fongique

Deux souches de champignons mycorhiziens arbusculaires ont été utilisées pour les différentes expérimentations. Il s'agit des souches de *Glomus aggregatum* et *Funneliformis mosseae*.

2.1. Production d'inoculum mycorhizien

Les souches de champignons mycorhiziens arbusculaires qui ont servi à inoculer les plantes sont les souches de *Glomus aggregatum* (Scenck & Smith emend. Koske) (DAOM 227 128) et *Funneliformis mosseae* (T. H. Nicolson & Gerd.) (DAOM 227 131), appartenant à la collection du Laboratoire de Biotechnologies des Champignons (LBC) de l'Université Cheikh Anta DIOP de Dakar.

La production d'inoculum mycorhizien est réalisée en serre. Chaque souche de CMA utilisée (*Glomus aggregatum* et *Funneliformis mosseae*) a été produite et entretenue par des cultures régulières en association avec une plante mycotrophe (le maïs) dans des pots de capacité 1,5 kg. Les pots contiennent comme substrat de culture, du sable grossier de plage stérilisé à 120 °C pendant deux heures. Les caractéristiques physico-chimiques de ce sol sont décrites dans le tableau 2. L'inoculation a été faite après levée des plantes de maïs en apportant 20 g de chaque souche de champignon dans le substrat de culture à 2 ou 3 cm de profondeur, le plus près des racines de la plante piège. Les plantes régulièrement arrosées à la capacité au champ, ont reçu un apport de 100 ml d'une solution nutritive de Long Ashton tous les 15 jours (Annexe 3). L'inoculum est récolté au bout de 3 mois de culture. Il est

essentiellement constitué par le substrat de culture contenant des spores et des fragments de racines mycorhizées. Ce substrat est récolté, séché, et mis dans des sachets en plastique puis conservé dans une chambre froide à 4 °C.

Tableau 2 : Caractéristiques physico-chimiques du sable de plage (Diop et al., 2003)

Constituants	Teneurs
Argile	0.0
Limon fin	0.00
Limon grossier	0.00
Sable fin	0.16 %
Sable grossier	98.2 %
Matière organique	0.00
C	< 0.08 %
P (ppm)	16.00 %
N	0.073 %
C/N	1.00 %
pH	8.5

2.2. Caractérisation de l'inoculum mycorhizien

Après 3 mois de culture, les racines des plantes ont été prélevées et colorées selon la méthode de Philips et Hayman, (1970). Les racines séparées des parties aériennes ont été soigneusement rincées à l'eau de robinet afin d'éliminer les particules de sable. Elles ont été ensuite placées dans des tubes à essai puis du KOH (10 %) est ajouté dans chaque tube de sorte que les racines baignent dans la solution. Elles ont été décolorées et vidées de leurs contenus cytoplasmiques. Les tubes contenant les racines ont été portés à ébullition dans un bain marie à 90 °C pendant une heure. Les racines ont été par la suite abondamment rincées et colorées au bleu Trypan à 0,05 % pendant 30 minutes. L'examen histologique a été effectué en déposant les fragments de racines d'environ 1 cm sur des lames avec quelques gouttes de glycérol.

2.3. Observations

Chaque fragment racinaire est observé à la loupe ($\times 40$) et le comptage est effectué en tout ou rien ; c'est-à-dire la racine est considérée comme mycorhizée à partir du moment où l'on observe au niveau d'un fragment racinaire un point d'infection ou une figure de colonisation (hyphes ou vésicules). La technique décrite par Trouvelot et al., (1986) a été utilisée et permet de juger l'état de la mycorhization (Annexe 4).

II. Interactions entre les champignons mycorhiziens et les bactéries en serre

1. Préparation des terreaux

L'essai a été réalisé au niveau de la serre du jardin botanique de la Faculté des Sciences et Techniques de l'UCAD. Le sol utilisé comme substrat de culture a été prélevé au niveau de la localité de Sangalkam (située dans la région de Dakar au Sénégal), appartenant à la zone agro-écologique des Niayes. Les caractéristiques physico-chimiques de ces sols sont décrites dans le tableau 3. Il a été tamisé pour le débarrasser des particules et débris végétaux. Une partie de ce sol a été stérilisé à l'autoclave à 120 °C pendant deux heures (Sol stérile SS) alors que l'autre correspond au sol non stérile (SNS). Ces deux sols ont été répartis dans des gaines de capacité 1,5 kg pour les différents semis.

Tableau 3 : Caractéristiques physico-chimiques du sol de Sangalkam (Bâ *et al.*, 1999)

Composants	Teneur (pour 100 g de sol)
Sable	88,8 %
Limon	5,8 %
Argile	5,4 %
Matière organique	0,6 %
Carbone total	0,3 %
Azote total	0,02 %
C/N	15 %
Potassium total	333,5 ppm
Phosphore total	41,4 ppm
Phosphore assimilable	2,1 ppm
Calcium total	1,03 ppm
Magnésium total	0,30 ppm
pH (sol/eau ratio 1:2)	6,0
pH (sol/ KCl ratio 1:2)	4,6

2. Matériel végétal

La variété Heinz (tomate de table) a été testée. Elle provient des établissements « Niayes Sarraut ». Cette variété a été utilisée pour l'étude des interactions entre les pesticides et les microorganismes.

3. Semis

Les graines de tomate (variété Heinz) ont été semées dans les gaines contenant le sol stérile et non stérile. Le dispositif expérimental est en blocs aléatoires complètement randomisés avec 2 facteurs : le champignon endomycorhizien (*Glomus aggregatum*, *Funneliformis mosseae*), combiné avec les souches de *Pseudomonas putida* (PS1, PS6, PS3, PS4 et PS7). Ce qui correspond à un nombre total de 18 traitements avec 5 répétitions par

traitement. Les gaines ont été placées sous serre à la température ambiante. Un arrosage quotidien à la capacité au champ a été effectué pendant 12 semaines. L'inoculation a été apportée au moment des semis à raison de 20 g par gaine pour chaque souche de champignon mycorhizien arbusculaire (*Glomus aggregatum* ou *Funneliformis mosseae*) et 2 ml de suspension bactérienne de densité 10^8 ufc/ml pour les différentes souches de *Pseudomonas putida*. Les différents isolats de *Pseudomonas* ont été choisis selon leur degré de similarité.

4. Paramètres mesurés

Au bout de trois mois de culture en serre, les paramètres suivants ont été mesurés :

- Les poids secs aériens et racinaires : les parties aériennes et racinaires des plantes ont été récoltées puis séchées pendant 72 h à l'étuve à 60 °C afin d'évaluer les biomasses aériennes et racinaires.

- Le taux de mycorhization : les plantes ont été récoltées et les parties racinaires ont été séparées des parties aériennes. Les racines, délicatement débarrassées de la terre ont été colorées selon la méthode de Philips et Hayman, (1970) afin d'évaluer le taux de mycorhization. Elles sont soigneusement rincées à l'eau de robinet afin d'éliminer les particules de sable. Elles sont ensuite placées dans des tubes à essai puis du KOH (10 %) est ajouté dans chaque tube de sorte que les racines baignent dans la solution. Les racines sont décolorées et vidées de leurs contenus cytoplasmiques. Les tubes contenant les racines sont portés à ébullition dans un bain marie à 90 °C pendant 1 heure. Les racines sont par la suite abondamment rincées et colorées au bleu Trypan (0,05 %) pendant 30 minutes. L'examen histologique est effectué en déposant les fragments de racines (1 cm de longueur) entre lames et lamelles avec quelques gouttes de glycérol. Pour chaque traitement, les racines des 5 plantes de tomate ont été récoltées et 100 fragments ont été montés à raison de 10 fragments par lame.

La mycorhization a été estimée selon la méthode décrite par Trouvelot *et al.*, (1986) (Annexe 3) permettant le calcul des deux paramètres ci-dessous :

La fréquence de mycorhization (F) : importance de l'infection du système racinaire

$$F (\%) = (N - n_0) / N \times 100$$

Avec N = nombre de fragments observés et n_0 = nombre de fragments sans trace de mycorhization.

L'intensité de colonisation (M) : exprime la portion du cortex colonisé par rapport à l'ensemble du système racinaire.

$$M\% = [(95 \times n_5) + (70 \times n_4) + (30 \times n_3) + (5 \times n_2 + n_1)] / N$$

- La croissance en hauteur : les mesures ont été réalisées tous les 15 jours pendant 3 mois.

III. Effets de différentes doses de pesticides associées à des microorganismes (*Pseudomonas putida* et *Funneliformis mosseae*) sur la croissance de la tomate en conditions contrôlées

1. Préparation du sol

Cette expérience a été réalisée au niveau de la serre du jardin botanique de la Faculté des Sciences et Techniques de l'UCAD. Le sol utilisé comme substrat de culture a été prélevé au niveau de la localité de Sangalkam. Il s'agit d'un sol non stérile qui a été tamisé pour le débarrasser des particules et débris végétaux. Ce sol a été réparti dans des pots de capacité 2 kg.

2. Application des produits phytosanitaires

Deux produits phytosanitaires ont été utilisés dans cette expérience : il s'agit d'un fongicide (Thiofanate méthyl) à action systémique ou par contact et d'un nématicide (Ethoprophos) non systémique (tableau 4).

3. Dispositif expérimental

Les graines de tomate (variété Heinz) ont été semées dans les pots contenant le sol non stérile. Le dispositif expérimental est en blocs aléatoires complètement randomisé avec 3 facteurs : le champignon endomycorhizien (*Funneliformis mosseae*), la souche bactérienne (*Pseudomonas putida*) combinés avec les produits phytosanitaires (Ethoprophos (E), Thiofanate méthyle (Th)). L'expérience comporte 12 traitements avec 5 répétitions, soit un nombre total de 60 pots. L'inoculation a été effectuée au moment du semis et chaque pot a reçu 2 ml de suspension bactérienne de densité 10^8 ufc/ml et 20 g d'inoculum mycorhizien constitué du substrat de culture associé aux racines de maïs. Les pots sont placés dans la serre

à la température ambiante et arrosées régulièrement à la capacité au champ pendant 3 mois. Le traitement phytosanitaire a été effectuée à l'aide d'un pulvérisateur et consiste en une application combinée ou non de fongicide et de nématocide. Les doses, dates, modes d'application... sont représentées dans le tableau 4.

Tableau 4 : calendrier, doses et mode d'application des produits phytosanitaires

Nom commercial des Produits phytosanitaires	Matière active	Concentrations (en g.l ⁻¹)	Famille	Mode d'action	Application	Doses recommandées	Doses réduites	Nombre de traitements	Intervalle entre traitements	Dates D'application	Délai Avant Récolte (DAR)
Fongicide (TOPSIN 450 SC)	Thiofanate méthyl	450	Benzimidazole	Systémique ou par contact	Pulvérisation parties aériennes et sol	60 ml / 10 l	30 ml / 10 l	2	14	J = Jour semis Et J + 14	3j
Nématicide (MOCAP)	Ethoprofos	200	Organophosphoré	Non systémique	Pulvérisation parties aériennes et sol	50 ml / 10 l	25 ml / 10 l	2	14	J = Jour semis Et J + 14	2mois

4. Paramètres mesurés

Les paramètres évalués sont les suivants :

- La croissance en hauteur : des mesures ont été réalisées tous les 15 jours pendant 3 mois.
- Les poids secs aériens et racinaires : à la fin de l'expérimentation, les parties aériennes et racinaires des plantes ont été arrachées pour une évaluation des biomasses après séchage à l'étuve.

5. Analyses statistiques

L'analyse statistique des résultats a été réalisée grâce au logiciel XLSTAT. Les données ont été soumises à une analyse de variance (ANOVA) et le test de Fisher a permis de comparer les moyennes des variables mesurées au seuil de probabilité de 5%.

IV. Impact de l'inoculation de plants de tomate par des CMA et des *Pseudomonas putida* en agriculture intensive

Cette expérimentation a été effectuée au niveau de la parcelle expérimentale du champ école de la licence professionnelle agro ressource et entrepreneuriat (LPAG). Ce champ se trouve au niveau du jardin botanique du Département de Biologie Végétale de la Faculté des Sciences et Techniques de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar. Le sol est caractérisé par un pH basique de 8,4 avec une teneur en phosphore assimilable d'environ 7,14 mg/kg de sol (Ndiaye, 2007).

1. La pépinière

Après désherbage et labour du terrain, 3 planches de deux mètres de long et d'un mètre de large ont été confectionnées. Les planches, distantes de 40 cm ont été bien nivelées et arrosées. Le semis a été effectué en ligne. Pour cela, des sillons ouverts et espacés de 20 cm ont été tracés à l'aide d'un morceau de bois pour permettre une bonne aération et un bon développement des plants. Les graines de tomate (variété Heinz), disposées dans les sillons à une profondeur de 1 cm, ont été ensuite recouvertes avec une fine couche de sable (figure 5). Pour bien entretenir la pépinière, des arrosages à la capacité au champ ont été effectués deux fois par jour matin et soir pendant 4 semaines. Ensuite le repiquage a été effectué.

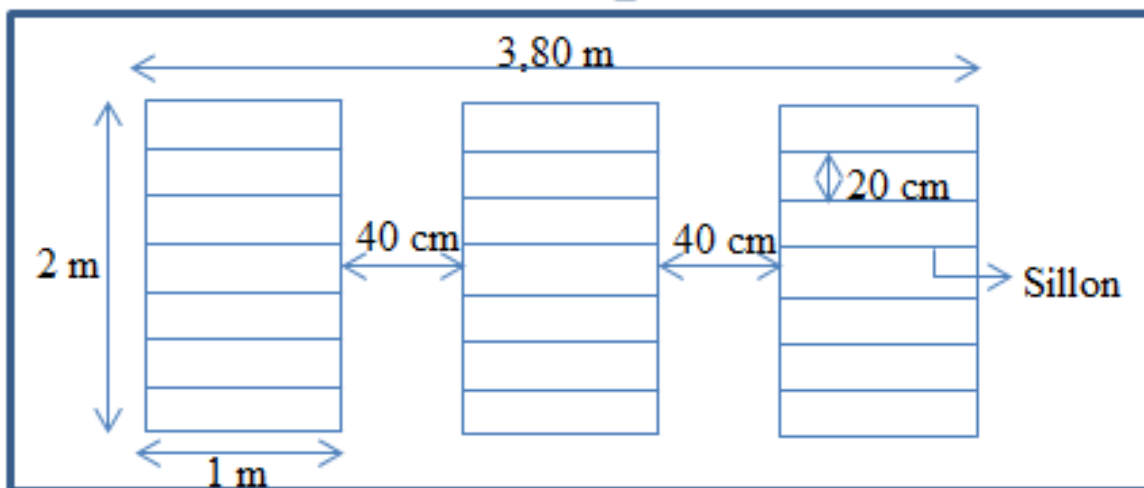


Figure 5 : Disposition des planches pour la pépinière

2. Le repiquage

2.1. Dispositif expérimental

Pour le repiquage des plants de tomate, un dispositif expérimental en blocs aléatoires complets (blocs randomisés) a été adopté avec 2 facteurs : traitements champignons endomycorhiziens à 2 niveaux (*Funneliformis mosseae*), combiné chacun aux traitements *Pseudomonas* à 2 niveaux (*Pseudomonas putida*) et aux traitements phytosanitaires à 3 niveaux (Ethoprophos (Et), Thiofanate méthyl (Th).). Ce qui correspond à un nombre total de 12 traitements par bloc et chaque combinaison de traitement apparaîtra une fois dans chaque bloc (figure 6).

Le dispositif expérimental a été constitué de blocs aléatoires complètement randomisés, répétés trois fois. Chaque bloc mesurant 4,5 m × 12,5 m, soit 56,25 m² a été subdivisé en six parcelles élémentaires de 1,5 m × 1,5 m chacune, correspondant à 2,25 m². La distance séparant deux parcelles élémentaires était de 0,5 m et chaque parcelle élémentaire comportait 4 lignes de repiquage espacées de 0,5 m. Le nombre de plants par bloc était de 192 alors que celui des parcelles élémentaires était de 16 avec un écartement de 0,5 m par plante. La surface totale couverte pour l'essai était de 168,75 m², avec un nombre total de 576 plants (figure 6).

Les 12 traitements suivants ont été appliqués :

- Témoins : Témoin absolu (T) - Et - Th - PS1 - Fm
- Association *Funneliformis mosseae* (Fm) et *Pseudomonas* (PS1) : Fm PS1
- Association *Funneliformis mosseae* (Fm) et traitements phytosanitaires : Fm Et – Fm Th
- Association *Pseudomonas* (PS1) et traitement phytosanitaire PS1 Et - PS1 Th.
- Association *Funneliformis mosseae* (Fm), *Pseudomonas* (PS1) et traitements phytosanitaires : Fm PS1 Et - Fm PS1 Th

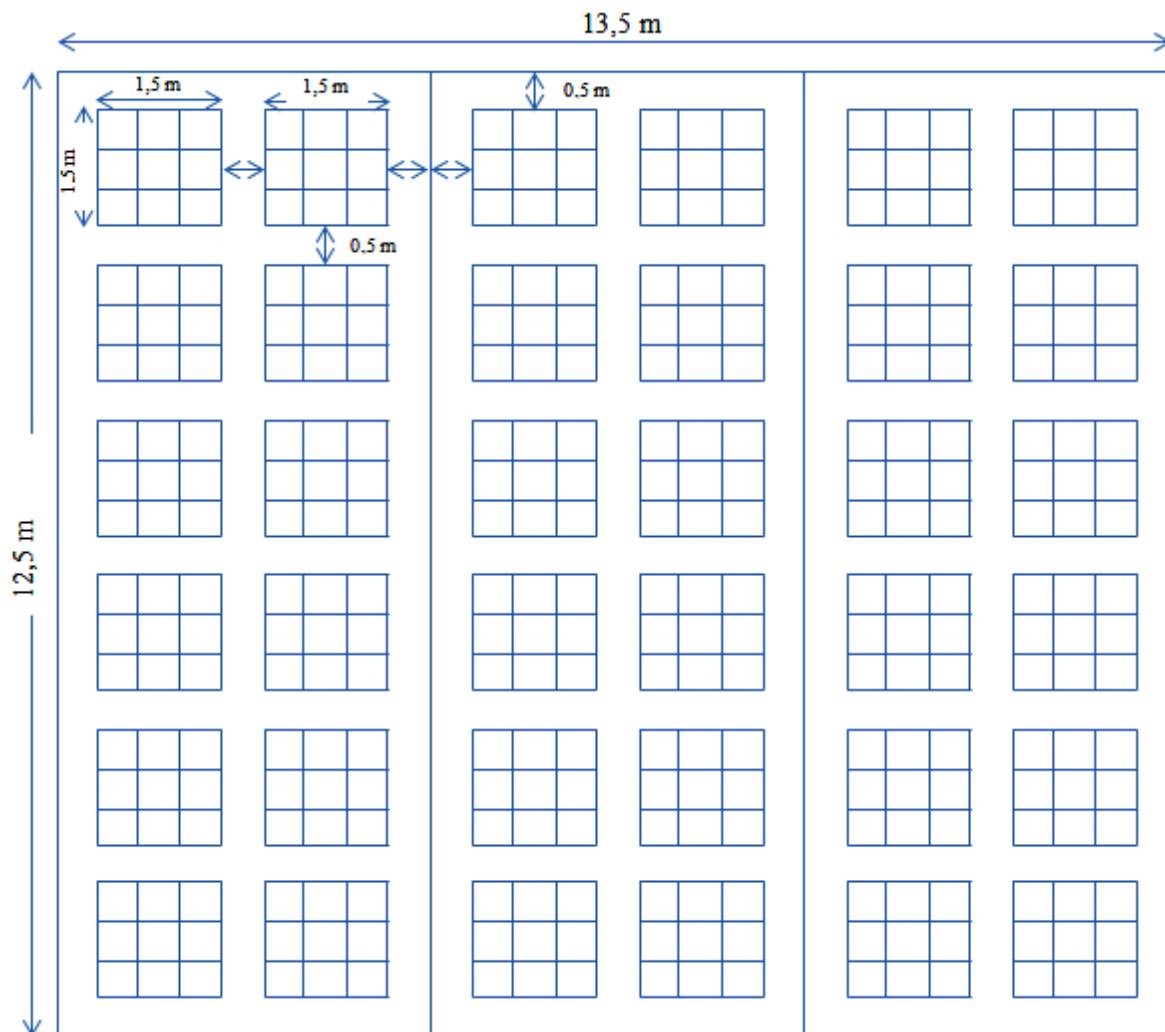


Figure 6 : Dispositif pour le repiquage des plantes de tomate

2.2. Le traitement phytosanitaire

Le traitement phytosanitaire consiste en une application d'un nématicide (Ethoprophos) et d'un fongicide (Thiofanate méthyl) dont les dates, doses et mode d'application sont représentés dans le tableau 5.

Tableau 5 : Calendrier, doses et mode d'application des produits phytosanitaires en station expérimentale

Nom commercial des produits phytosanitaires	Matière active	Application	Doses utilisées	Nombre de traitements	Intervalle entre traitements	Dates d'application
Fongicide (TOPSIN 450 SC)	Thiofanate méthyl	Pulvérisation parties aériennes et sol	30 ml / 10 l	2	14	J = Jour repiquage et J + 14
Nématicide (MOCAP)	Ethoprophos	Pulvérisation parties aériennes	25 ml / 10 l	2	14	J = Jour repiquage et J + 14

2.3. La fertilisation

Un traitement fertilisant a été effectué à raison de 50 g/m² au moment du repiquage et à la floraison. Cette fertilisation consiste à un apport d'engrais composé, contenant trois éléments fertilisants (azote, phosphore, potassium) majeurs désignés par la formule NPK. La formule utilisée pour la tomate est le 10.10.20.

3. Paramètres mesurés

Les paramètres étudiés sont les suivants :

- Le rendement : il correspond à la quantité de fruits qui a été récoltée durant toute l'expérimentation et est exprimé en tonnes par hectare (t/ha),
- La mycorhization : la fréquence et l'intensité de mycorhization ont été déterminées,
- L'indice de galle : après la dernière récolte, les racines des plantes de tomates ont été arrachées puis observées pour identifier la présence de galles (renflements de la racine sans discontinuité des tissus). L'indice de Galle a été déterminé selon l'échelle de

Zeck, (1971) (annexe 5) qui permet d'évaluer la gravité des dégâts causés par les nématodes.

Echelle de Zeck, 1971 : Notation

0 = système racinaire entièrement indemne de galles

1 = quelques rares et petites galles détectées au cours d'une observation approfondie

2 = quelques rares et petites galles facilement détectées

3 = nombreuses petites galles

4 = nombreuses petites galles, quelques grosses galles, système racinaire totalement fonctionnel

5 = 25 % du système racinaire atteint de galles et non fonctionnel (absence de radicelles)

6 = 50 % du système racinaire atteint de galles

7 = 75 % du système racinaire atteint de galles

8 = aucune racine indemne, plante encore verte

9 = système racinaire en voie de décomposition

10 plante morte

V. Analyses statistiques

Les données obtenues ont été soumises à une analyse de variance (ANOVA) avec le logiciel Xlstat. Le test de Fischer LSD au seuil de 5 % a été réalisé afin d'identifier le niveau de probabilité de la différence observée entre les différents paramètres.

RESULTATS

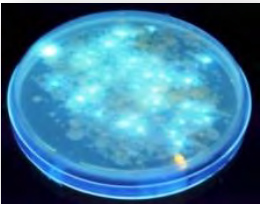

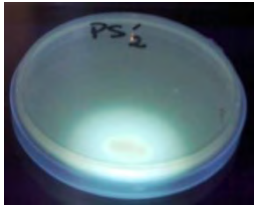

I. Isolement, identification des microorganismes et production d'inoculum




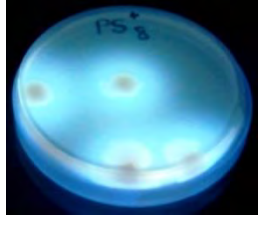
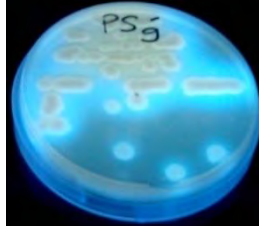
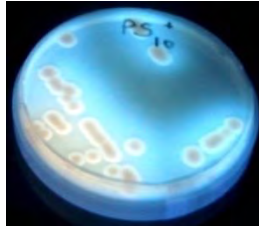
1. Identification des isolats bactériens

1.1. Approche phénotypique

Les tests d'orientation simples comme l'aspect des colonies (fluorescence, forme, taille,...) ont permis dans un premier temps une identification présomptive de tous les isolats bactériens de la rhizosphère de plantes de tomate au rang taxonomique du genre ; comparativement au sol nu où aucune souche fluorescente n'a été observée (tableau 6). Toutefois, cette identification des isolats bactériens est complétée par des méthodes protéomiques.

Tableau 6 : Aspects macroscopiques de quelques isolats bactériens cultivés sur milieu King B

Isolats	Aspects macroscopiques des isolats	Description
Isolats avant purification		Quelques colonies fluorescentes, petites tailles, rondes avec des diamètres de 1 mm.
PS1		colonies fluorescentes, rondes avec des diamètres de 2 à 3 mm
PS2		Colonie de grande taille, ronde et fluorescente avec un diamètre de 4 mm, bordure irrégulière
PS3		colonies rondes et fluorescentes avec des diamètres de 3 mm, surfaces lisses

PS4		colonies fluorescentes, rondes avec des diamètres de 2 à 3 mm, lisses et de couleur blanc crémeux à beige
PS6		colonies fluorescentes, rondes avec des diamètres de 1 à 2 mm, lisses et de couleur blanc crémeux à beige
PS7		colonies fluorescentes, rondes avec bordure régulière, structure homogène
PS8		Colonies grandes tailles, fluorescentes, rondes avec bordure irrégulière, structure homogène
PS9		colonies fluorescentes, rondes avec bordure régulière, structure homogène, couleur beige
PS10		colonies fluorescentes, rondes avec bordure régulière, structure homogène, couleur beige

1.2. Identification protéomique (MALDI-TOF MS)

Parmi les 18 isolats bactériens, seuls 16 ont été identifiés comme étant des *Pseudomonas* fluorescents. L'identification des isolats (PS1, PS2, PS3, ... PS10) par spectrométrie de masse MALDI-TOF a révélé que tous les isolats appartiennent au même genre et à la même espèce selon les spectres de masse obtenus avec le logiciel MALDI Biotyper (figure 7 à 17). L'analyse de ces spectres montre une parfaite ressemblance entre les souches. Les pics produits (m/z 4500, m/z 5100, m/z 6000, m/z 7200) sont caractéristiques des souches de *Pseudomonas putida* avec des pourcentages de similarité allant de 76 % à 92 % entre individus (tableau 7).

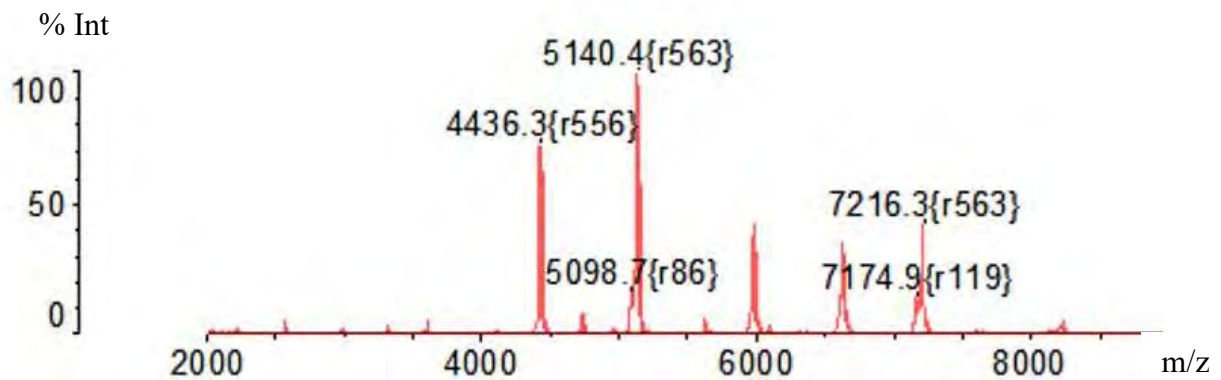


Figure 7 : Spectre de masse de l'isolat PS1a

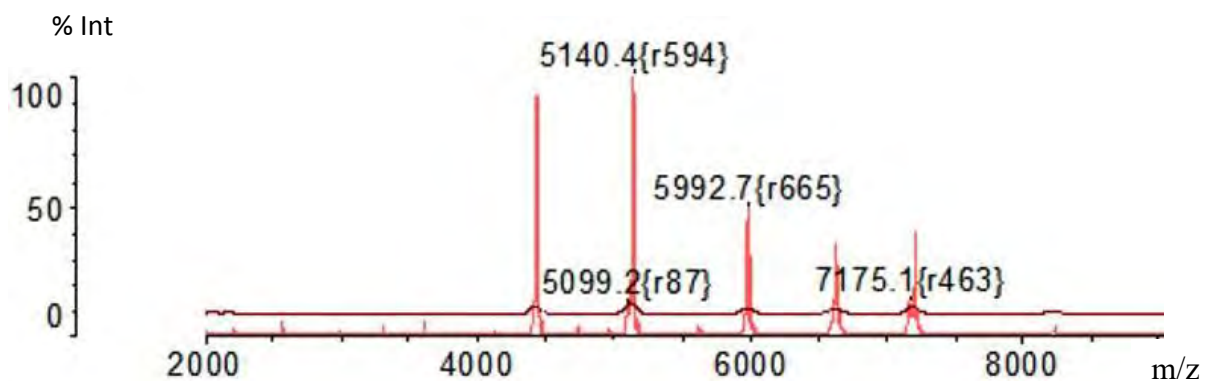


Figure 8 : Spectre de masse de l'isolat PS1b

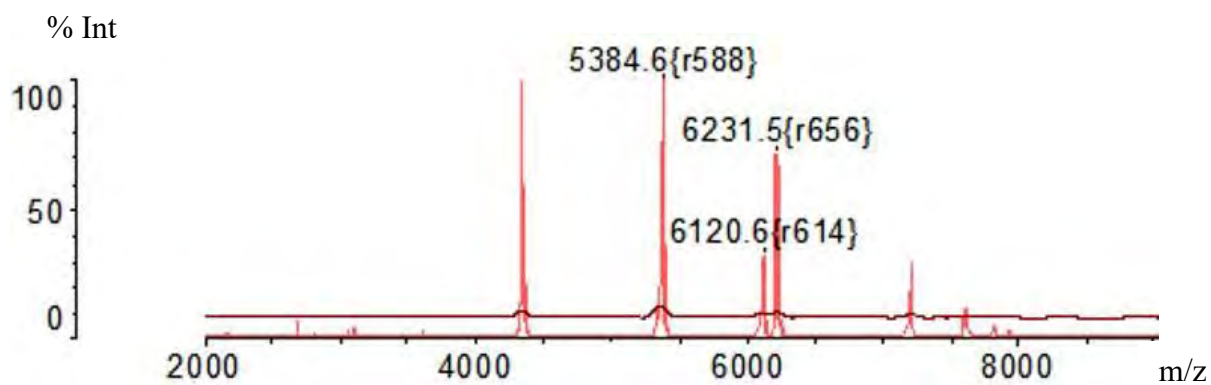


Figure 9 : Spectre de masse de l'isolat PS2

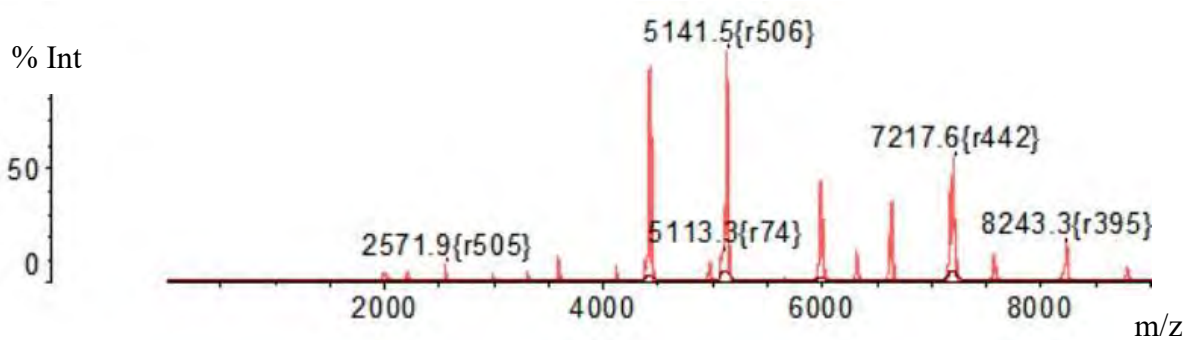


Figure 10 : Spectre de masse de l'isolat PS3a

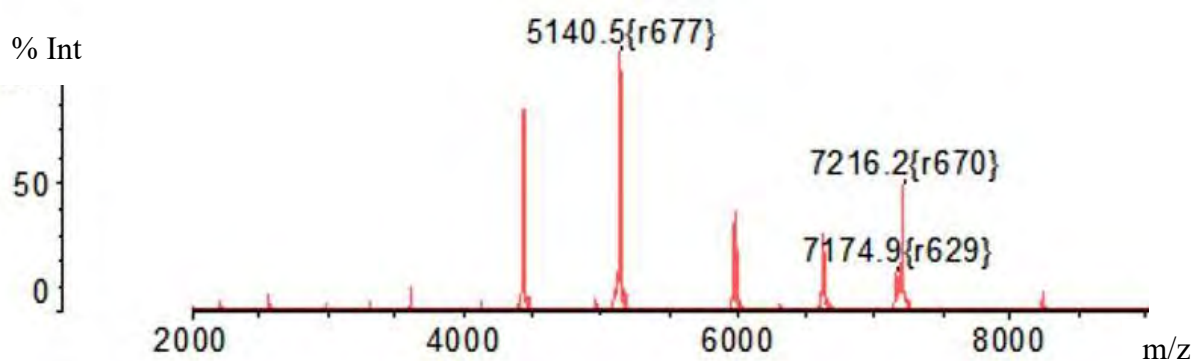


Figure 11 : Spectre de masse de l'isolat PS3b

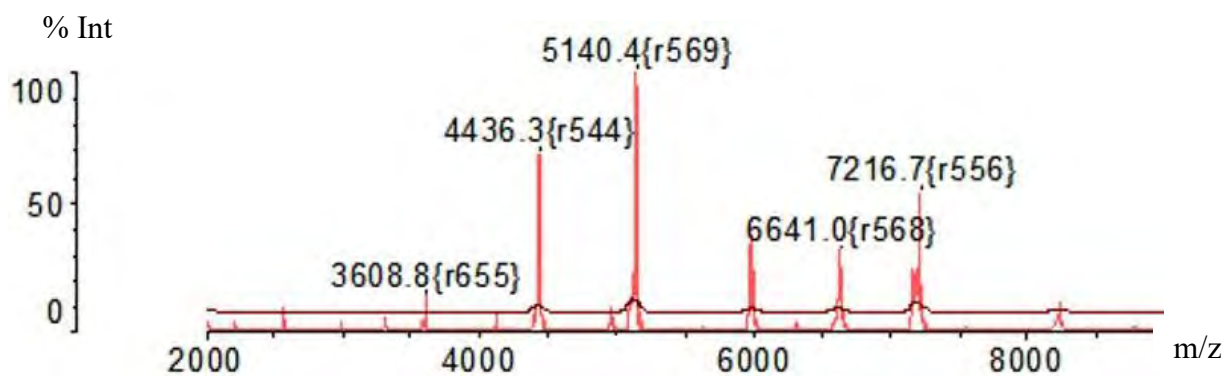


Figure 12 : Spectre de masse de l'isolat PS4

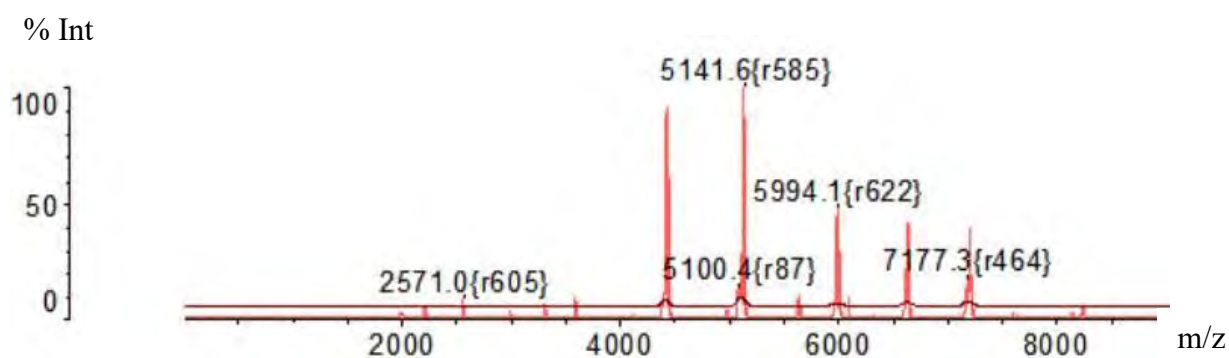


Figure 13 : Spectre de masse de l'isolat PS6

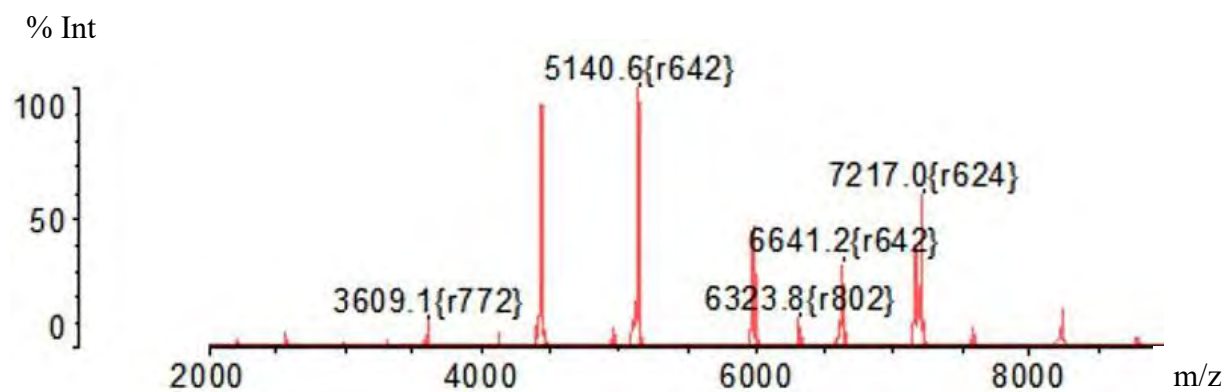


Figure 14 : Spectre de masse de l'isolat PS7

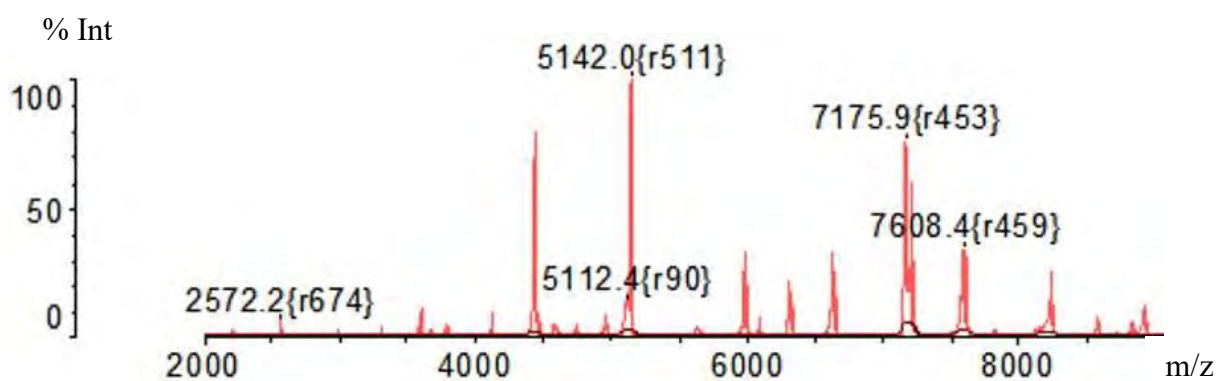


Figure 15 : Spectre de masse de l'isolat PS8

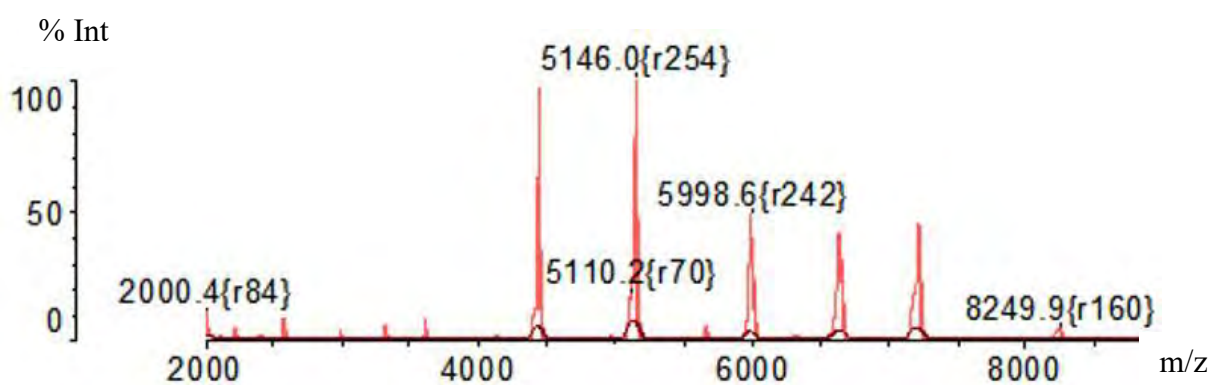


Figure 16 : Spectre de masse de l'isolat PS9

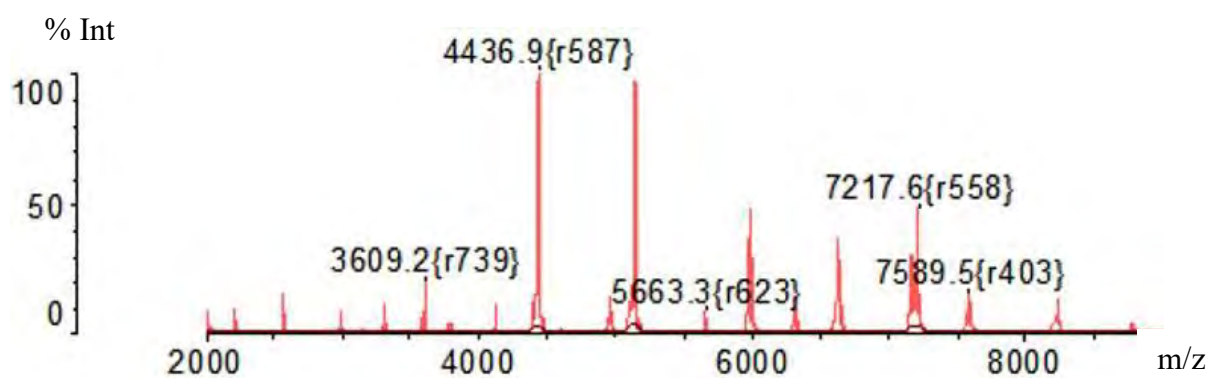


Figure 17 : Spectre de masse de l'isolat PS10

Tableau 7 : Pourcentages de similarité des isolats bactériens

Isolats	Identification selon MALDI Biotyper	Pourcentage de similarité
PS1a	<i>Pseudomonas putida</i>	81,6
PS1b	<i>Pseudomonas putida</i>	77,1
PS2a	<i>Pseudomonas putida</i>	81,3
PS2b	<i>Pseudomonas putida</i>	87
PS3a	<i>Pseudomonas putida</i>	91,5
PS3b	<i>Pseudomonas putida</i>	90,1
PS4a	<i>Pseudomonas putida</i>	90,3
PS4b	<i>Pseudomonas putida</i>	82,6
PS6a	<i>Pseudomonas putida</i>	86
PS6b	<i>Pseudomonas putida</i>	88,7
PS7a	<i>Pseudomonas putida</i>	86
PS7b	<i>Pseudomonas putida</i>	90,2
PS9a	<i>Pseudomonas putida</i>	83,9
PS9b	<i>Pseudomonas putida</i>	91,5
PS10a	<i>Pseudomonas putida</i>	76,6
PS10b	<i>Pseudomonas putida</i>	86

Les spectres de masse des 16 isolats bactériens et les pourcentages de similarité ont permis de construire le dendrogramme représenté par la figure 18.

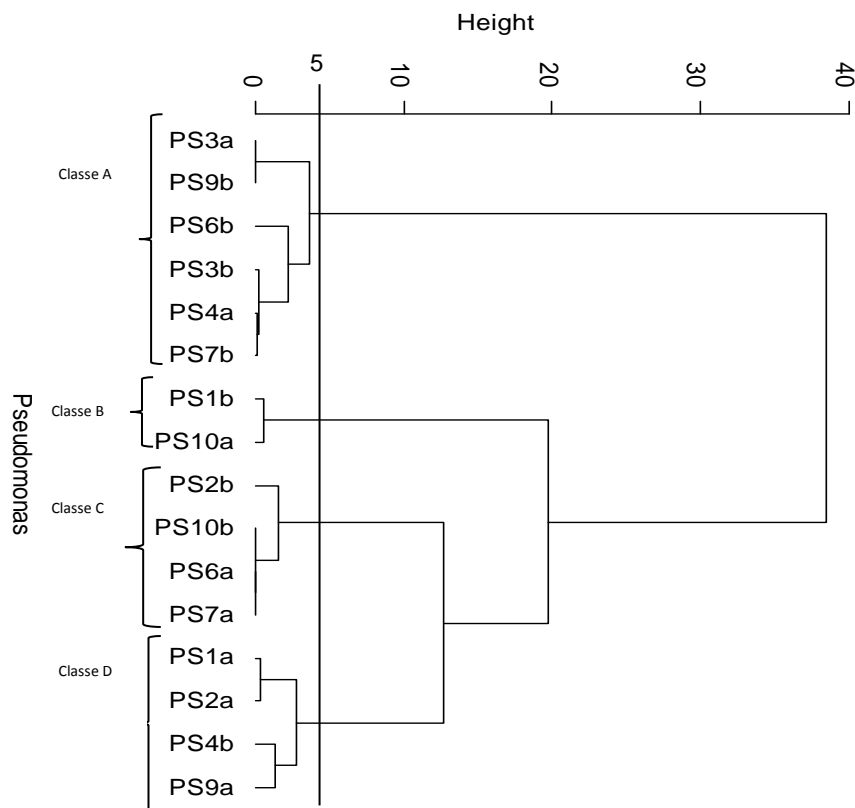


Figure 18 : Dendrogramme des 16 isolats bactériens

Les données obtenues concernant les spectres de masse et les pourcentages de similarité ont montré que :

- les 16 isolats bactériens ont été correctement identifiés au rang de genre et d'espèce avec des pourcentages de similarité compris entre 76,6 et 91,5 %.
- un seul Phylum ressort de cette identification : il s'agit du Phylum des *Proteobacteria*.

En tenant compte du niveau de similarité avec un seuil de coupure de 5, les 16 isolats peuvent être répartis en 4 classes.

Classe A représentée par les isolats PS3a, PS9b, PS6b, PS3b, PS4a, PS7b avec des pourcentages de similarité compris entre 88,7 % et 91,5 %.

Classe B représentée par les isolats PS1b et PS10a avec des pourcentages de similarité compris entre 77,1 % et 76,6 %.

Classe C représentée par les isolats PS2b, PS10b, PS6a et PS7a avec des pourcentages de similarité compris entre 86 % et 87 %.

Classe D représentée par les isolats PS1a, PS2a, PS4b et PS9a avec des pourcentages de similarité compris entre 81,3 % et 83,9 %.

Par ailleurs, il existe une parfaite concordance pour l'identification des isolats par les méthodes phénotypiques et les méthodes protéomiques.

2. Caractérisation de l'inoculum mycorhizien

Après 3 mois de culture, de l'inoculum a été obtenu avec le maïs comme plante piège (Figure 19). L'observation au microscope a montré la présence d'hyphes et de vésicules sur des fragments de racines de maïs infectées par *Glomus aggregatum* et *Funneliformis mosseae* (figure 20).



Figure 19 : Production d'inoculum mycorhizien

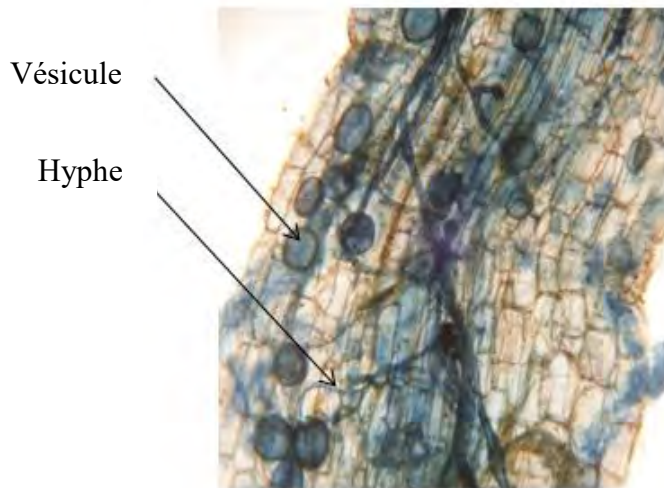


Figure 20 : Aspects des racines de maïs mycorhizées avec *Glomus aggregatum*

Conclusion

La rhizosphère de plantes de tomate renferme une forte présence de PGPR appartenant au groupe des *Pseudomonas* fluorescents, contrairement au sol non rhizosphérique. L'identification de ces microorganismes a révélé une appartenance de 16 isolats au même genre et à la même espèce : *Pseudomonas putida*, avec des pourcentages de similarité qui varient entre 76 % et 92 %. Ces microorganismes pourraient jouer une importance capitale pour les plantes et constituer une source d'inoculum dans la production maraîchère au niveau de la zone des Niayes.

II. Interactions entre les champignons mycorhiziens et les bactéries en serre

1. Sol stérile

Lorsque les plantes de tomates sont inoculées avec les souches de champignons mycorhiziens seuls (*Funneliformis mosseae* (Fm) ou *Glomus aggregatum* (Ga)), les fréquences de mycorhization sont respectivement de l'ordre de 59 % et 35 % avec des intensités de 11,89 % et 6,67 % (tableau 8). Ces valeurs sont nettement supérieures et significativement différentes à celles obtenues pour les témoins. Par contre chez les plantes inoculées avec les différentes souches de *Pseudomonas* seules, les fréquences et intensités de mycorhization sont nulles (tableau 8). Cependant, les taux de mycorhization augmentent chez les plantes de tomates co-inoculées avec les champignons et les rhizobactéries et les valeurs obtenues sont significativement supérieures par rapport à l'inoculation avec Fm seul ou Ga

seul. C'est le cas par exemple de l'association entre Fm et PS1 avec des fréquences de 96 % et des intensités de 41,27 % ; ou bien entre Ga et PS1 avec des fréquences de 86 % et des intensités de 20,28 % (tableau 8).

Les poids secs aériens obtenus chez les plantes de tomates traitées avec les différentes souches de *Pseudomonas* (PS1, PS3, PS4, PS6, PS7) sont supérieurs à ceux obtenus pour les traitements Fm seul ou Ga seul. Lorsque les plantes sont inoculées avec la souche PS1, la valeur du poids sec aérien est de 2,2 g et est supérieure avec une différence significative comparée aux traitements Fm et Ga avec respectivement 1,98 g et 1,81 g. S'agissant du traitement PS4 seul, le poids sec racinaire est de 1,31 g. Cette valeur est supérieure avec une différence significative par rapport aux traitements Fm seul ou Ga seul où les poids secs racinaires sont respectivement de l'ordre de 0,77 g et 0,72 g (tableau 8). Cependant, une augmentation des poids secs aériens et racinaires est constatée quand il s'agit de la co-inoculation. C'est le cas de l'association entre Ga et PS3 avec un poids sec aérien de 3,19 g ou entre Fm et PS7 avec un poids sec racinaire est de 1,38 g.

Concernant la croissance en hauteur, les valeurs obtenues sont supérieures pour tous les traitements comparés aux témoins non inoculés. Cependant, elles ne présentent pas de différences significatives. La hauteur la plus importante a été obtenue chez les plantes de tomate co-inoculées avec Ga/PS3 avec 58,4 cm.

Tableau 8 : Effet de l'inoculation sur les poids secs aériens, racinaires et la croissance en hauteur de la tomate sur sol stérile

Traitements	Taux de mycorhization (%)		Poids secs (g)		Hauteur (cm)	
	Fréquence	Intensité	aérien	racinaire		
Témoin	00 k	00 g	1,18 c	0,49 c	43,4 a	
Fm	59 g	11,89 e	1,98 abc	0,77 abc	45,8 a	
Ga	35 j	6,67 f	1,81 bc	0,72 abc	45,4 a	
PS1	00 k	00 g	2,2 ab	1,04 abc	50,6 a	
PS6	00 k	00 g	2,35 ab	0,87 abc	47,8 a	
PS3	00 k	00 g	2,63 ab	1,00 abc	48,6 a	
PS4	00 k	00 g	2,94 ab	1,31 ab	50,8 a	
PS7	00 k	00 g	2,67 ab	1,19 abc	49,4 a	
Fm	PS1	96 a	41,27 a	2,67 ab	1,11 abc	52,6 a
	PS6	64 f	16,21 d	2,87 ab	1,14 abc	50,6 a
	PS3	74 c	33,78 b	2,69 ab	1,19 abc	50,8 a
	PS4	53 h	09,16 f	2,93 ab	1,17 abc	53,8 a
	PS7	67 e	13,47 e	2,48 ab	1,38 a	48 a
Ga	PS1	86 b	20,28 c	2,67 ab	0,99 abc	53,6 a
	PS6	71 d	17,80 d	2,67 ab	0,98 abc	51,2 a
	PS3	70 d	06,79 f	3,19 a	1,22 ab	58,4 a
	PS4	40 i	08,31 f	2,62 ab	0,83 abc	52,8 a
	PS7	51 h	06,61 f	2,24 ab	0,63 bc	45 a

2. Sol non stérile

Chez les plantes de tomates inoculées avec Fm et Ga, les fréquences de mycorhization sont respectivement de 92 % et 94 % et les intensités de 27,84 % et 25,60 % (tableau 9). Ces valeurs sont supérieures et significativement différentes à celles obtenues chez les témoins et chez les plantes inoculées avec les différentes souches de *Pseudomonas* seuls. Cependant les taux de mycorhization sont beaucoup plus importants lorsqu'il s'agit de la co-inoculation entre champignons mycorhiziens et rhizobactéries. Par exemple pour les associations entre Fm/PS1, Fm/PS7, Ga/PS1, Ga/PS3, Ga/PS7, les taux de mycorhization sont de 100 % avec des intensités qui varient entre 28,18 % et 68,14 % (tableau 9). Ces valeurs sont supérieures comparées aux traitements champignons seuls ou *Pseudomonas* seuls avec des différences significatives.

Les poids secs aériens et racinaires obtenus lorsque les plantes sont inoculées avec Fm, Ga, ou avec les différentes souches de *Pseudomonas*, sont supérieurs comparés aux plantes témoins non inoculées et présentent des différences significatives. C'est le cas pour le traitement Ga avec un poids sec aérien de 1,55 g, du traitement PS3 avec un poids sec racinaire de 0,92 g (tableau 9). Quand les plantes sont co-inoculées, les poids secs aériens et racinaires sont supérieurs aux plantes témoins mais ils peuvent augmenter ou diminuer par rapport aux traitements champignons seuls ou *Pseudomonas* seuls avec ou non des différences significatives. Par exemple, le poids sec aérien est de 2,52 g quand il s'agit de l'association entre Ga/PS1 et cette valeur est supérieure et significativement différente par rapport aux traitements Ga seul (1,76 g) ou au traitement PS4 seul (1,58 g). Par ailleurs, le poids sec racinaire pour le traitement Ga/PS3 est de 0,48 g et est inférieur comparé aux traitements Fm et Ga avec des valeurs respectives de 0,67 g et 0,60 g. Mais ces valeurs ne présentent pas de différence significative.

L'inoculation des plantes de tomates avec les champignons Fm et Ga ou les *Pseudomonas* seuls a entraîné une augmentation significative de la hauteur des plantes de tomate pour tous les traitements par rapport aux témoins. Cette croissance en hauteur est plus importante lorsqu'il s'agit de l'association entre Fm/PS1 (50,6 cm) et Ga/PS1 (57,8 cm). Ces valeurs sont significativement supérieures comparées aux traitements Fm, Ga ou PS1.

Tableau 9 : Effet de l'inoculation sur les poids secs aériens, racinaires et la croissance en hauteur de la tomate sur sol non stérile.

Traitements	Taux de mycorhization (%)		Poids secs (g)		Hauteur (cm)	
	Fréquence	Intensité	aérien	racinaire		
Témoin	40 h	0,80 i	1,17 c	0,42 b	36,4 b	
Fm	92 c	27,84 e	1,76 abc	0,67 ab	45,6 ab	
Ga	94 c	25,60 f	1,55 bc	0,60 ab	42 ab	
PS1	70 e	2,70 i	2,44 ab	0,64 ab	48,4 ab	
PS6	60 f	5,50 h	2,22 ab	0,77 ab	44,5 ab	
PS3	50 g	6,60 h	2,19 ab	0,92 a	49,6 ab	
PS4	36 i	1,90 i	1,58 bc	0,77 ab	38,2 b	
PS7	52 g	4,70 h	2,27 ab	0,78 ab	48 ab	
Fm	PS1	100 a	68,14 a	1,79 abc	0,53 b	50,6 b
	PS6	96 ab	44,62 c	2,17 ab	0,78 ab	47,6 ab
	PS3	94 bc	44,02 c	2,22 ab	0,58 b	50,2 ab
	PS4	84 d	10,08 g	2,36 ab	0,77 ab	51,6 ab
	PS7	100 a	39,80 d	1,98 abc	0,76 ab	48,8 ab
Ga	PS1	100 a	29,76 e	2,52 a	0,75 ab	57,8 a
	PS6	98 a	39,40 d	1,78 abc	0,56 ab	46,6 ab
	PS3	100 a	28,18 e	1,65 abc	0,48 ab	44,2 ab
	PS4	84 d	29,14 e	1,79 abc	0,76 ab	46,2 ab
	PS7	100 a	54,14 b	1,85 abc	0,79 ab	44,6 ab

Conclusion

Nos résultats ont montré que l'inoculation des plantes de tomate à l'aide des microorganismes a un effet positif car les taux de mycorhization, les biomasses aériennes, racinaires, de même que la hauteur des plantes ont augmenté sur sol stérile et non stérile.

Cependant, cette étude conduite en milieu contrôlé a permis de montrer également que la stimulation de la croissance était généralement plus marquée dans le cas de la co-inoculation entre les CMA et les *Pseudomonas*. Toutefois, parmi les couples symbiotiques les plus performants, nous avons le cas de l'association Fm/PS1, où les paramètres de mycorhization et de croissance sont importants aussi bien sur sol stérile et non stérile.

III. Effets de différentes doses de pesticides associées à des microorganismes (*Pseudomonas putida* et *Funneliformis mosseae*) sur la croissance de la tomate en conditions contrôlées

1. Effet des fongicide et nématicide aux doses recommandées

1.1. La croissance en hauteur

Les hauteurs des plantes traitées avec le champignon Fm seul ou la rhizobactérie PS1 seule sont respectivement de l'ordre de 42,66 cm et 43,66 cm (Tableau 10). Ces valeurs sont supérieures et significativement différentes de celles obtenues chez les témoins avec 33 cm. S'agissant de la co-inoculation entre Fm et PS1, cette croissance en hauteur devient plus importante pour atteindre 46 cm et présente une différence significative par rapport aux traitements Fm seul ou PS1 seul.

L'application du fongicide (Thiofanate-méthyl (Th)) et du nématicide (Ethoprophos (E)) aux doses recommandées, chez les plantes inoculées avec *Funneliformis mosseae* a entraîné une baisse de la hauteur des plantes comparativement aux plantes inoculées avec Fm seulement et présente une différence significative. C'est le cas par exemple du traitement Fm/Th avec une hauteur de 38 cm. Les mêmes effets ont été observés chez les plantes co-inoculées avec Fm/PS1 ou traitées avec PS1 seulement comparativement aux traitements Fm/PS1 ou PS1 seuls. Avec le traitement Fm/PS1/E, cette hauteur est de 26,66 cm alors que pour la co-inoculation, elle est de 46 cm.

1.2. Effet sur le poids sec aérien

Le poids sec aérien obtenu lorsque les plantes de tomate sont inoculées avec Fm ou PS1 est sensiblement le même avec 10,69 g. Cette valeur est supérieure à celle obtenue pour le témoin (8,03 g) avec une différence significative. Cependant avec la co-inoculation, le poids sec aérien devient plus important avec 14,29 g ; soit une augmentation de 25 % comparativement aux traitements Fm et PS1 seuls (tableau 10). Les effets de l'application des

produits phytosanitaires sont variables. Ils peuvent se traduire par une augmentation ou une baisse du poids sec aérien des plantes de tomate. Chez les plantes inoculées avec PS1 et traitées soit avec le fongicide (Th) ou le nématicide (E), une légère augmentation du poids sec aérien a été notée avec des valeurs respectives de 12,01 g et 11,76 g par rapport au traitement PS1 seul (10,68 g) avec aucune différence significative. Par contre, lorsque le traitement phytosanitaire est appliqué chez les plantes inoculées avec Fm, une légère baisse du poids sec aérien est notée comparativement au traitement Fm seul. C'est le cas du traitement Fm/E avec 9,40 g comparativement au traitement Fm seul avec 10,69 g. Par ailleurs, lorsque les plantes sont co-inoculées et traitées respectivement avec Th ou E, les poids secs sont de 8,66 g et 7,43 g, ce qui représente une baisse importante par rapport à la co-inoculation entre Fm/PS1 où le poids sec est de 14,29 g (tableau 10).

1.3. Effet sur le poids sec racinaire

Pour tous les traitements, les poids secs racinaires obtenus sont supérieurs comparés à ceux des plantes témoins non inoculées à l'exception des traitements Fm/PS1/Th et Fm/PS1/E. Avec les traitements Fm et PS1, les poids secs racinaires obtenus sont respectivement de 1,99 g et 2,01 g (tableau 10). Ces valeurs sont 2 fois plus importantes à celles des témoins non inoculés avec une différence significative. Cependant, le poids sec le plus important est obtenu dans le cas de l'association entre Fm et PS1 avec 2,88 g. L'application de ces produits chez les plantes inoculées avec Fm entraîne une baisse du poids sec racinaire par rapport au traitement Fm. Pour les traitements Fm/Th et Fm/E, les poids secs racinaires sont respectivement de 0,99 g et 1,07 g alors que pour le traitement Fm, il est de 1,99 g. Par contre chez les plantes inoculées avec les souches PS1, cette application des produits phytosanitaires n'a pas d'impact car les poids secs racinaires sont sensiblement égaux à celui du traitement PS1 seul. Par exemple avec le traitement PS1/Th, le poids sec est de 2,11 g alors qu'il est de 2,01 g pour le traitement PS1. Par ailleurs, les produits phytosanitaires utilisés dans le cas de la co-inoculation ont un impact négatif car les poids secs ont été réduits fortement comparativement à la co-inoculation entre Fm/PS1. C'est le cas des traitements Fm/PS1/Th avec 0,80 g et Fm/PS1/E avec 0,51 g comparativement au traitement Fm/PS1 avec 2,88 g (tableau 10). Ces résultats montrent que les CMA sont plus sensibles à l'effet des pesticides comparativement aux rhizobactéries.

Tableau 10 : Effet des fongicide et nématicide aux doses recommandées sur la hauteur, les poids secs aériens et racinaires des plants de tomates après 3 mois de culture

Traitements	Hauteur des plantes (cm)	Poids secs aériens (g)	Poids secs racinaires (g)
T	33,00 cd	8,03 bc	0,94 b
Fm	42,66 ab	10,69 ab	1,99 a
PS1	43,66 ab	10,68 ab	2,01 a
E	38,66 abc	5,16 c	0,94 b
Th	40,33 abc	9,95 ab	0,99 b
Fm / PS1	46,00 a	14,29 a	2,88 a
Fm / Th	38,00 bc	10,06 ab	0,99 b
Fm / E	40,00 abc	9,40 bc	1,07 b
PS1 / Th	41,00 ab	12,01 ab	2,11 a
PS1 / E	41,66 ab	11,76 ab	2,16 a
PS1 / Fm / Th	36,66 bc	8,66 bc	0,80 b
PS1 / Fm / E	26,66 d	7,43 bc	0,51 b

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

Fm = *Funnelformis mosseae* PS1 = *Pseudomonas putida* E = Ethoprophos Thiofanate méthyl

2. Effet des fongicide et nématicide aux doses réduites sur la croissance

2.1. Effet sur la croissance en hauteur

Pour tous les traitements, les hauteurs des plantes sont supérieures par rapport aux témoins avec des différences significatives (Tableau 11). La croissance en hauteur la plus importante a été notée chez les plantes traitées avec PS1/Fm/E qui présentent une hauteur de 46,33 cm. Les plantes inoculées avec Fm/PS1 ne présentent pas de différence significative

comparée aux traitements Fm ou PS1. L'application des produits phytosanitaires tels que le Thiofanate méthyl ou l'Ethoprophos chez les plantes inoculées avec PS1 seul ou Fm, ou bien Fm/PS1 n'a pas d'impact significatif sur la croissance en hauteur (tableau 11). C'est le cas par exemple des traitements PS1/Th et Fm/E ayant des valeurs respectives de 42 cm et 42,33 cm comparativement aux traitements Fm et PS1 dont les valeurs sont de 42,66 cm et 43,66 cm (tableau 11).

2.2. Effet sur les poids secs aériens et racinaires

Chez les plantes inoculées avec Fm ou PS1 seuls, les poids secs aériens et racinaires sont supérieurs à ceux des plantes témoins avec des différences significatives. Avec le traitement PS1, le poids sec aérien est de 10,68 g alors que chez le témoin, il est de 8,03 g. Le même résultat est obtenu avec le traitement PS1 où le poids sec racinaire est de 2,01 g comparée au témoin avec 0,94 g (tableau 11). Cependant les poids secs aériens et racinaires les plus importants ont été obtenus avec la co-inoculation entre Fm/PS1 avec des valeurs de 13,11 g et 2,88 g. Les effets de l'application des produits phytosanitaires après inoculation des plantes sont variables. Les fongicides et nématicides utilisés peuvent entraîner une baisse des poids secs, comme c'est le cas du traitement PS1/E où les poids secs aériens et racinaires sont respectivement de 9,86 g et 1,31 g par rapport au traitement PS1 seul avec 10,68 g et 2,01 g (tableau 11). Par contre l'application de ces produits après inoculation peut ne pas avoir d'impact sur les poids secs comparativement aux plantes inoculées. C'est le cas du traitement Fm/E avec un poids sec aérien de 10,66 g comparativement au traitement Fm avec 10,69 g.

Tableau 11 : Effet des fongicide et nématicide aux doses réduites sur la hauteur, les poids secs aériens et racinaires des plants de tomates après 3 mois de culture

Traitements	Hauteur des plantes (cm)	Poids secs aériens (g)	Poids secs racinaires (g)
T	33,00 b	8,03 d	0,94 d
Fm	42,66 a	10,69 bcd	1,99 abc
PS1	43,66 a	10,68 bcd	2,01 abc
E	41,66 a	10,33 bcd	1,53 cd
Th	43,00 a	10,53 bcd	1,52 cd
Fm / PS1	44,00 a	13,11 a	2,88 a
Fm / Th	43,66 a	12,60 ab	2,73 ab
Fm / E	42,33 a	10,66 bcd	1,50 cd
PS1 / Th	42,00 a	11,17 bc	1,46 cd
PS1 / E	42,66 a	9,86 cd	1,31 cd
PS1 / Fm / Th	42,00 a	10,60 bcd	1,77 bcd
PS1 / Fm / E	46,33 a	12,53 abc	1,88 bcd

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

La comparaison de ces résultats montre que la croissance en hauteur des plantes est plus importante si les produits phytosanitaires sont appliqués à de faibles doses comparativement aux doses recommandées. Par exemple, avec l'application du Thiofanate méthyl à la dose de 30 ml/10 l, la hauteur des plantes pour le traitement Fm/Th est de 43,66 cm, comparée à la dose de 60 ml/10 l où elle est de 38 cm. Par ailleurs, chez les plantes inoculées avec Fm ou PS1 seul, et traitées avec les pesticides à faibles doses, les poids secs aériens et racinaires obtenus sont plus importants à l'exception des traitements PS1/E et PS1/Th avec des valeurs respectives de 9,86 g et 11,17 g, comparativement aux doses élevées où on a 11,76 g et 12,01 g pour les mêmes traitements. L'application des produits phytosanitaires chez les plantes co-inoculées avec Fm/PS1 s'est révélée plus bénéfique pour la stimulation de la croissance des plantes car tous les paramètres de croissance ont été augmentés significativement, comparativement aux doses recommandées.

Conclusion

Les résultats obtenus ont montré que l'application de fongicide (Ethoprophos) et de nématicide (Thiofanate méthyl) à de fortes doses peut avoir un impact négatif sur les CMA et les *Pseudomonas* fluorescents. Les faibles doses de pesticides testées n'ont pas d'impact majeur sur les paramètres de croissance, qui ont connu une hausse par rapport à l'application de ces produits aux doses recommandées, à l'exception de quelques traitements.

IV. Impact de l'inoculation de plants de tomate par des CMA et des *Pseudomonas putida* en agriculture intensive

1. Le taux de mycorhization

Chez les plantes inoculées avec *Funneliformis mosseae*, les fréquences et intensité de mycorhization sont de 70 % et 14,40 % (tableau 12). Lorsqu'il s'agit de l'association entre le champignon *Funneliformis mosseae* et *Pseudomonas putida*, une baisse significative de la fréquence et de l'intensité de mycorhization a été notée avec des valeurs de 30 % et 3,96 % comparées aux plantes traitées avec Fm seul. Cependant, l'utilisation du nématicide, le thiofanate méthyl n'a pas eu d'impact sur le CMA car la fréquence obtenue est de 73,33 %, soit une hausse de 3,33 % par rapport au traitement Fm et ces valeurs ne présentent pas de différences significatives. Chez ces mêmes plantes, les intensités de mycorhization sont de 14,40 pour le traitement Fm et 11,76 % pour Fm/Th. Par contre l'application du fongicide chez les plantes inoculées avec Fm se traduit par des effets néfastes sur la mycorhization. Par exemple avec le traitement Fm/E la fréquence de mycorhization est de 16,66 %, ce qui représente une baisse de 53,44 % comparée au traitement Fm et les intensités de mycorhization sont de 0,3 %, soit une baisse de 14,1 %. Par ailleurs, lorsque les produits phytosanitaires sont appliqués chez les plantes co-inoculées avec Fm et PS1, une augmentation significative du taux de mycorhization est notée comparativement à la co-inoculation entre Fm/PS1 où les valeurs sont moins importantes, sauf pour le traitement PS1/Fm/E (tableau 12).

Tableau 12 : Effet des microorganismes et produits phytosanitaires sur l'établissement de la mycorhization

Traitements	Fréquence de mycorhization	Intensité de mycorhization
T	00 d	00 c
Fm	70,00 a	14,40 a
PS1	00 d	00 c
Fm x PS1	30,00 c	3,96 bc
Th	00 d	00 c
E	00 d	00 c
Fm x Th	73,33 a	11,76 ab
Fm x E	16,66 cd	0,30 c
PS1 x Th	00 d	00 c
PS1 x E	00 d	00 c
Fm x PS1 x Th	60,00 ab	8,26 abc
Fm x PS1 x E	36,66 bc	2,43 bc

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

2. Le rendement

Les figures 21 et 22 montrent les fruits de tomate récoltés au niveau des parcelles.



Figure 21 : Disposition des plantes de tomate au niveau des parcelles



Figure 22 : Fruits de tomates récoltés au niveau des parcelles

Pour tous les traitements, les rendements obtenus sont supérieurs à celui du témoin (4,28 t/ha), toutefois, les valeurs ne présentent pas de différences significatives à l'exception des traitements PS1 et du Témoin. L'inoculation des plantes avec les microorganismes a des impacts bénéfiques qui se traduisent par une augmentation des rendements comme c'est le cas pour le traitement PS1 avec 12,59 t/ha. Cette valeur est presque deux fois plus importante comparée aux traitements Fm et PS1/Fm avec des rendements respectifs de 6,56 t/ha et 6,03 t/ha. Les effets de l'application des produits phytosanitaires sont variables. Les traitements nématicides et fongicides chez les plantes inoculées avec Fm se traduisent par une baisse de rendement par rapport au traitement Fm seul. Le constat est le même chez les plantes inoculées avec PS1. Cependant, pour ce qui est de la co-inoculation entre PS1/Fm, le rendement obtenu est de 6,03 t/ha et est inférieur comparé au traitement Fm seul ou PS1 seul. Avec l'application des pesticides chez ces plantes co-inoculées, l'utilisation de l'Ethoprophos a entraîné une augmentation du rendement avec 9,48 t/ha, ce qui n'est pas le cas avec l'application du Thiofanate méthyl où le rendement est de 4,63 t/ha (figure 23).

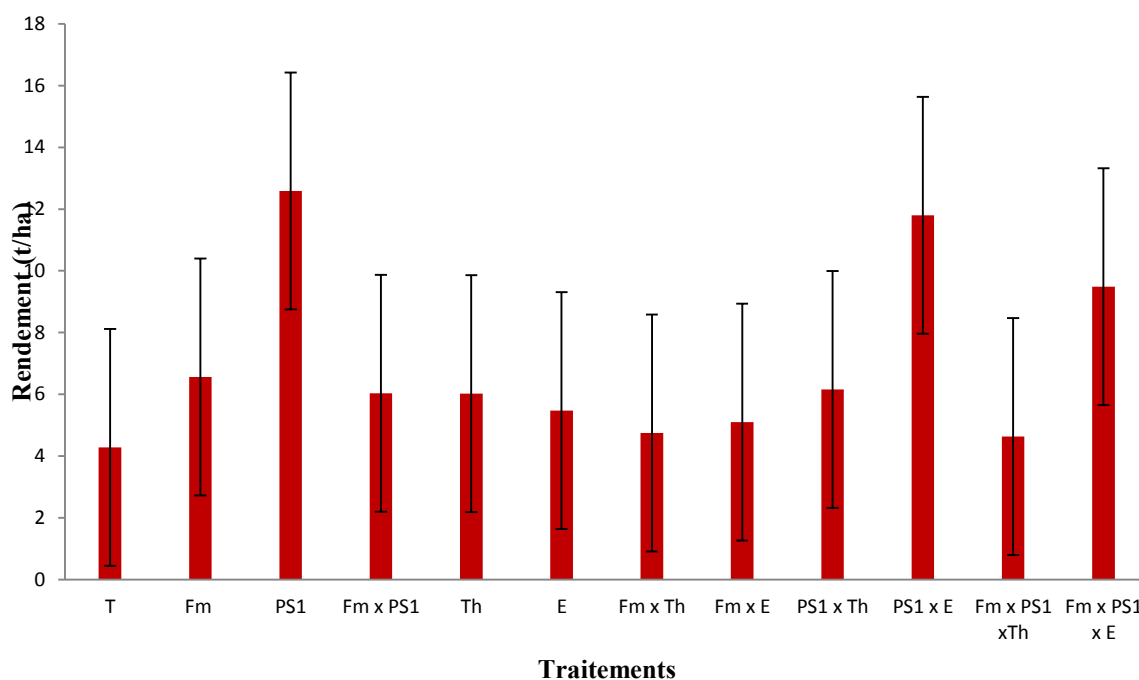


Figure 23 : Effet des microorganismes et produits phytosanitaires sur le rendement

T = Témoin Fm = *Funneliformis mosseae* PS1 = *Pseudomonas putida* Th = Thiofanate méthyl

E = Ethoprophos

3. L'indice de Galle

Concernant l'indice de galle, les résultats obtenus n'ont montré aucune différence significative pour tous les traitements (Figure 24). Il faut noter que l'inoculation avec les souches de *Pseudomonas putida* a entraîné une baisse de l'indice avec 2,45 comparée au témoin avec 3,25 ; alors que pour le traitement Fm, cet indice augmente légèrement pour atteindre 3,83. Ce qui se traduit par la présence de nombreuses petites galles sur les racines des plantes de tomate inoculées avec Fm ou PS1. Par contre, dans le cas de la co-inoculation entre Fm/PS1, cet indice devient très élevé avec une valeur de 5, ce qui traduit la sévérité des attaques avec 25 % des racines infestées. Chez les plantes inoculées ou non, les traitements phytosanitaires n'ont pas eu d'impact significatif sur l'indice de galle car les valeurs obtenues se situent entre 2,5 et 3,9. Ces valeurs ne présentent pas de différences significatives comparées aux traitements PS1 seul et Fm seul où les indices sont respectivement de 2,45 et 3,83.

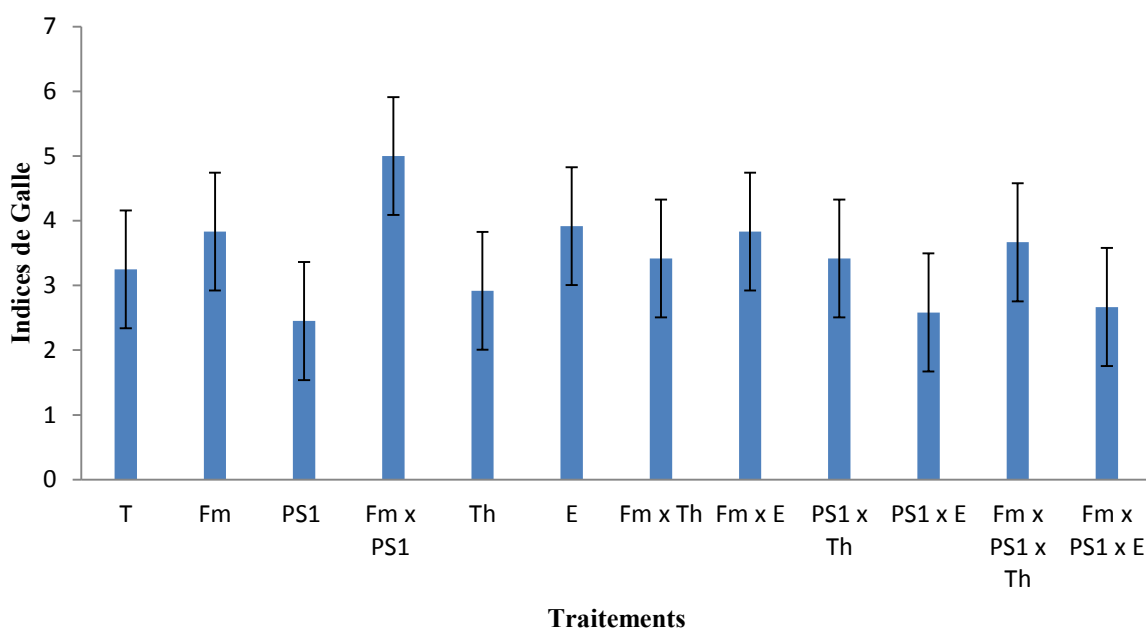


Figure 24 : Indice de galle

T = Témoin Fm = *Funneliformis mosseae* PS1 = *Pseudomonas putida* Th = Thiofanate méthyl

E = Ethoprophos

Conclusion

L'inoculation des plantes de tomate avec *Pseudomonas putida* a permis d'obtenir le rendement le plus élevé avec une valeur maximale de 12,59 t/ha. En effet, chez ces plantes inoculées, une baisse de l'indice de Galle a été notée avec une valeur de 2,45, contrairement à la co-inoculation entre *Funneliformis mosseae* et *Pseudomonas putida*. L'application des pesticides à des doses réduites chez les plantes inoculées, n'a pas donné les résultats escomptés, car les rendements obtenus ne présentent aucune différence significative avec les témoins non inoculés à l'exception du traitement PS1.

DISCUSSION

I. Isolement, identification des microorganismes et production d'inoculum

Les résultats obtenus pour l'identification des isolats bactériens ont révélé une parfaite correspondance entre les méthodes phénotypiques et protéomiques. Cette dernière méthode a montré des pourcentages de similitudes allant de 76,6 % et 91,5 % entre les souches testées. Ces résultats sont en conformité avec les travaux de Blondiaux *et al.*, (2013) qui mettent en évidence les performances du MALDI-TOF comparés à certains systèmes d'identifications de référence. Par ailleurs, des études réalisées par Bizzini et Greub (2010), ont démontré que les performances d'identification des bactéries Gram négatif par cette nouvelle technologie ont pu atteindre des pourcentages élevés supérieurs à 60 %. De plus, cette technique a été utilisée dans des études spécifiques qui ont essentiellement évalué sa capacité à identifier les différentes espèces bactériennes chez les bacilles à Gram négatif tels que les *Pseudomonas putida* (Degand *et al.*, 2008).

Nos résultats ont révélé une forte présence de *Pseudomonas putida* au niveau de la rhizosphère des plantes de tomate comparativement au sol non rhizosphérique où aucune souche fluorescente n'a été isolée. Ces microorganismes sont donc capables de coloniser efficacement les systèmes racinaires. D'après Alexander, (1977), les petits bacilles à gram négatif représentaient une part significative de la microflore associée à la rhizosphère. De plus, *Pseudomonas* est le genre le plus abondant dans la rhizosphère parmi les bactéries à Gram-négatif du sol, et l'activité PGPR de certaines de ces souches est connue depuis de nombreuses années (Probanza *et al.*, 2002). Ils peuvent constituer plus de 60 % de la microflore bactérienne rhizosphérique (Digat et Gardan, 1987). Ces résultats confirment l'effet rhizosphère qui a été décrit par plusieurs auteurs (Samia, 2012), c'est-à-dire, la densité des bactéries est plus élevée dans la rhizosphère que dans le sol distant des racines (Lugtenberg et Kamilova, 2009). Selon, Sutra *et al.*, (2000) et Berg *et al.*, (2005), les *Pseudomonas* fluorescents peuvent être présents respectivement à des densités de $5,10^4 - 1,10^6$ et $1,1.10^3 - 6,7.10^5$ cfu/g de sol, et à des densités de $1,10^5 - 6,10^6$ et $3,6.10^7 - 7,6.10^7$ cfu/g de sol rhizosphérique. Ces rhizobactéries sont des hétérotrophes typiques. Elles nécessitent donc des composés organiques comme source d'énergie. Leurs besoins sont entièrement comblés à l'intérieur même de la rhizosphère car cet environnement est caractérisé par des interactions entre les exsudats racinaires et ces microorganismes (Bell-Perkins et Lynch, 2002). Ces exsudats racinaires incluent la sécrétion d'ions, d'oxygène libre, d'eau, d'enzymes, de mucilages ainsi qu'un grand nombre de métabolites primaires et secondaires (Bertin *et al.*, 2003). Les rhizobactéries trouvent ainsi dans la rhizosphère de ces

plantes, un grand nombre de nutriments favorables à leur développement (Rajkumar *et al.*, 2010), ce qui expliquerait leur absence dans les sols nus. Ils peuvent agir fortement sur la nutrition des plantes par des mécanismes variés (Lugtenberg et Kamilova, 2009 ; Ma *et al.*, 2011).

S'agissant de la mycorhization, les taux de colonisation racinaire sont supérieurs à 50 %. Des travaux antérieurs réalisés par Nedorost et Pokluda, (2012), ont aussi montré des taux similaires chez des plantes de tomate mycorhizées par des CMA. Les champignons mycorhiziens constituent ainsi une composante « clé » dans les relations plante-sol. Ces champignons, présents dans les sols de la plupart des écosystèmes, sont capables de former des associations symbiotiques avec les racines de nombreuses espèces végétales terrestres (environ 80 %) (Strullu, 1991 ; Van der Heijden *et al.*, 1998a).

II. Interactions entre les champignons mycorhiziens et les bactéries en serre

L'inoculation des plantes de tomate avec les souches de *Funneliformis mosseae*, *Glomus aggregatum* et *Pseudomonas putida* a induit des effets positifs sur leur croissance et développement. Le taux de mycorhization, les poids secs aériens, racinaires de même que la croissance en hauteur ont été fortement augmentés comparativement aux plantes de tomate non inoculées avec des différences significatives sur sol stérile et non stérile. Ces résultats sont conformes à ceux obtenus par Younes, (2014) et Diop *et al.*, (2013) qui ont montré que l'inoculation des plantes de Thuya par des champignons mycorhiziens du genre *Glomus* entraîne une stimulation de la croissance qui se traduit par une augmentation des biomasses sèches. Par ailleurs, Kloepper et Schroth, (1981c) ont aussi démontré que les souches de *Pseudomonas* fluorescents étaient capables de provoquer une augmentation de la croissance chez des plantes de pomme de terre. Cette stimulation de la croissance par les champignons mycorhiziens arbusculaires et les rhizobactéries tels que les *Pseudomonas* est fortement corrélée à une amélioration de la nutrition hydrominérale, la production de régulateurs de croissance, de molécules antifongiques... (Smith et Read, 2008). En effet, l'inoculation des plantes avec des *Pseudomonas* fluorescents ou des champignons mycorhiziens favorise la solubilisation du Phosphate, la stimulation de l'absorption de l'azote atmosphérique en le rendant assimilable par les plantes (Glick *et al.*, 2007). C'est le cas de *Pseudomonas putida* qui a été identifié comme une rhizobactérie solubilisant le phosphate soit par minéralisation des phosphates organiques, grâce à des phosphatases, soit par solubilisation des phosphates inorganiques, sous l'effet d'acides (Bano et Musarat, 2003 ; Harris *et al.*, 2006 ; Khan *et al.*,

2009 ; Tripathi *et al.*, 2011). D'autres travaux ont montré que les CMA possèdent les équipements enzymatiques nécessaires à l'utilisation de l'ammonium et des nitrates (Strullu, 1991 ; Azcon-Aguilar et Barea 1992). Les hyphes ont aussi la possibilité d'acquérir des minéraux peu mobiles dans le sol comme l'azote, permettant ainsi à la plante de l'assimiler. Par ailleurs, les souches de *Pseudomonas putida*, utilisées en tant qu'inoculant améliorent le développement des racines via la production de certaines phytohormones (Bloemberg et Lugtenberg, 2001), telles que des auxines dont l'acide indole acétique (AIA), des cytokinines et des gibbérellines (Vessey, 2003). Ces régulateurs de croissance jouent un rôle important dans l'élongation des racines ou l'élargissement des tissus au niveau de la plante. Elles produisent également de nombreux métabolites antifongiques (Weller *et al.*, 2002) tels que des phénazines, la pyolutéorine, la pyrrolnitrine et le DAPG (2,4 - diacetylphloroglucinol) qui sont les antifongiques les plus fréquemment détectés (Haas et Défago, 2005). Ces bactéries sont également capables de synthétiser des sidérophores appelés pyoverdines ou pseudobactines. Ces molécules sont impliquées dans l'amélioration de la croissance des plantes (Lemanceau *et al.*, 2009) et contribuent à l'acquisition du fer par les végétaux (Vansuyt *et al.*, 2003).

Les résultats obtenus sur sol stérile et sur sol non stérile ont montré que pour tous les paramètres étudiés, les valeurs les plus élevées ont été obtenues chez les plantes de tomates co-inoculées avec les rhizobactéries et les champignons mycorhiziens. Ces microorganismes partagent des habitats communs, c'est-à-dire la surface des racines. Ils peuvent interagir dans la rhizosphère au cours de leurs processus de colonisation des racines en tant que microorganismes associés (Azcón, 1989) et stimuler la croissance des plantes de manière efficace (Toljander *et al.*, 2007). Ainsi, de nombreux travaux ont montré l'effet synergique obtenu en inoculant simultanément un microorganisme type PGPR et un champignon endomycorhizien (Meyer et Linderman, 1986). Cependant les effets de la co-inoculation sur les plantes de tomate sont variables. Ils se traduisent soit par une augmentation ou une diminution des poids secs aériens, racinaires ou de la croissance en hauteur comparativement à la simple inoculation par les champignons seuls ou les *Pseudomonas*. Par exemple sur sol stérile, la co-inoculation entre *Funneliformis mosseae* et PS1 a induit une augmentation du poids sec aérien comparativement au traitement *Funneliformis mosseae* seul avec un gain de 15 %. Par contre sur sol non stérile, cette co-inoculation se traduit par une baisse du poids sec racinaire comparée aux traitements *Funneliformis mosseae* seul ou PS1 seul avec une différence significative. Ces résultats sont en accord avec les travaux de Edwards *et al.*,

(1998) qui ont montré que la co-inoculation de plantes de tomates avec des CAM et autres microorganismes de la rhizosphère tels que les *Pseudomonas* peut produire soit des effets positifs ou négatifs sur la biomasse végétale et sur la matière sèche. Les effets bénéfiques obtenus s'expliquent par le fait que l'association des endomycorhizes et des *Pseudomonas* fluorescents s'accompagne d'une plus grande stimulation de la croissance de la plante que la seule inoculation bactérienne ou fongique (Meyer et Linderman, 1986 ; Oliveira *et al.*, 1987). Par contre les baisses de croissance constatées avec la co-inoculation comparées à la seule inoculation bactérienne ou fongique peuvent s'expliquer par le fait que la microflore rhizosphérique est constituée d'un ensemble de microorganismes en équilibre et que si la souche introduite ne colonise pas la rhizosphère de façon agressive, son activité bénéfique ne peut s'exprimer car l'équilibre microbien antérieur à l'inoculation se rétablit rapidement (Baker et Cook, 1974).

III. Effets de différentes doses de pesticides associées à des microorganismes (*Pseudomonas putida* et *Funneliformis mosseae*) sur la croissance de la tomate en conditions contrôlées

Les CMA tels que *Funneliformis mosseae* et les rhizobactéries comme *Pseudomonas putida* améliorent positivement la croissance des plantes de tomate. Ces travaux ont été confirmés par plusieurs auteurs qui ont montré que les champignons mycorhiziens arbusculaires contribuent à la croissance des plantes par le rôle bénéfique que joue cette association dans la nutrition minérale (Camprubi *et al.*, 2000 ; Ba *et al.*, 2001) et hydrique (Augé *et al.*, 2004). Leur effet sur le développement et la croissance du symbiote végétal se traduit par une augmentation de la hauteur et du poids des plantes mycorhizées par rapport aux plantes non mycorhizées et l'importance du système racinaire (Binet *et al.*, 2007 ; Echairi *et al.*, 2008 ; Saad, 2009). Par ailleurs, Les effets bénéfiques des rhizobactéries du groupe des *Pseudomonas* peuvent être liés à la promotion directe de la croissance des plantes notamment par la production d'hormones, la solubilisation du phosphate ou la fixation de l'azote (Zehnder *et al.*, 2000 ; Vidyasekharan *et al.*, 2001 ; Khabbaz *et al.*, 2015 ; Rodríguez-Blanco *et al.*, 2015).

Les résultats obtenus ont montré aussi que les poids secs aériens, racinaires et la croissance en hauteur des plantes sont plus importants dans le cas de la co-inoculation comparés à la simple inoculation par le champignon seul ou le *Pseudomonas* seul. Ces résultats s'expliquent par le fait que les CMA peuvent interagir positivement avec les

Pseudomonas du sol en affectant la croissance de la plante. Ces résultats sont conformes à ceux de Babana et Antoun, (2006) ; Barea *et al.*, (2002) qui ont prouvé que les bactéries désignées sous le terme de PGPR comme les *Pseudomonas* fluorescents sont capables de solubiliser le phosphate dans le sol et dont la présence améliore la colonisation des racines par les CMA. Ces bactéries sont des auxiliaires à la mycorhization (Vivas *et al.*, 2003 et 2005). Par ailleurs, d'autres auteurs ont rapporté des influences positives sur la symbiose mycorhizienne arbusculaire après l'ajout de rhizobactéries comprenant des *Pseudomonas* fluorescents. Par exemple, la double inoculation d'un PGPR (*Pseudomonas putida*) et d'un champignon mycorhizien arbusculaire a induit un accroissement additif de la croissance du trèfle une fois additionnés plutôt que seuls (Meyer and Linderman, 1986). L'inoculation avec le PGPR a non seulement augmenté la colonisation des racines par le champignon mycorhizien, mais aussi la croissance mycélienne de spores de *Funneliformis mosseae* (Azcon, 1987). De même, Edward *et al.*, (1998) ont montré qu'il existe un effet d'interaction positif significatif entre les mycorhizo-pseudomonade chez des plantes de tomates traitées avec des *Pseudomonas*. En plus ces rhizobactéries promotrices de la croissance des plantes pourraient coloniser aussi la rhizosphère et produire des métabolites secondaires. Ces derniers agissent comme des antibiotiques naturels pour protéger les plantes de l'infection par les phytopathogènes et favoriser leur croissance (Lugtenberg and Kamilova, 2009).

L'application des produits phytosanitaires tels que le Thiofanate méthyl et l'Ethoprophos se traduit par des effets néfastes ou neutres sur les champignons mycorhiziens (*Funneliformis mosseae*) et les rhizobactéries comme *Pseudomonas putida*. Ces mêmes résultats ont été décrits par plusieurs chercheurs qui ont montré que les pratiques culturales de l'agriculture moderne avec les apports d'intrants chimiques ont un impact direct sur la flore microbienne et les endomycorhizes arbusculaires en particulier (Gosling *et al.*, 2006 ; Fortin *et al.*, 2008 ; Calonne *et al.*, 2012). Les pesticides affectent donc les micro-organismes non cibles en interférant avec les processus vitaux tels que la respiration, la photosynthèse, les réactions de biosynthèse, ainsi que la croissance et la division cellulaire (DeLorenzo *et al.*, 2001). Il a été démontré que la germination des spores de CMA et l'élongation des hyphes germinatives sont inhibées en présence de fongicides (Calonne *et al.*, 2010 ; Twanabasu *et al.*, 2013). C'est le cas de l'ajout de deux fongicides, dont le fenhexamide qui inhibait la germination des spores de *Rhizophagus irregularis*, et cette inhibition augmentait avec la concentration des fongicides (Zocco *et al.*, 2008). Schweiger et Jakobsen, (1998) ont aussi prouvé qu'en fonction des doses et des fongicides utilisés, leur effet sur le transport de

phosphore par les hyphes mycorhiziennes, qui reflète leur vitalité, était plus ou moins affecté. Des travaux effectués sur le riz (*Oryza sativa*), ont montré que l'application du fongicide, le chlorothalonil pouvait entraîner une diminution de la colonisation racinaire par *Funneliformis mosseae* ainsi qu'une biomasse inférieure pour les plantes mycorhizées comparées aux plantes non mycorhizées (Zhang *et al.*, 2006). Cette diminution du taux de colonisation est due à l'effet négatif des pesticides sur le CMA soit pendant les stades pré-symbiotiques par l'inhibition de la germination et de l'élongation des hyphes germinatives et donc la non détection d'une racine hôte ; soit pendant le stade symbiotique par la perturbation du processus de colonisation racinaire (Debiane *et al.*, 2009 ; Estaun, 1990). Ainsi, des études différentes ont signalé une modification de l'architecture hyphale des spores de diverses espèces de CMA en germination, notamment en présence de certains fongicides (Calonne *et al.*, 2010). Ces spores ont tendance à germer de façon linéaire pour minimiser le contact avec le fongicide contrairement à la germination de façon ramifiée. Une diminution de la sporulation et du taux d'arbuscules dans les racines mycorhizées a été aussi observée en présence de fongicides (Sainz *et al.*, 2006 ; Campagnac *et al.*, 2008, 2010 ; Zocco *et al.*, 2011). Par ailleurs, les bactéries du genre *Pseudomonas* fluorescents jouent un rôle important dans la nutrition des plantes grâce aux processus d'ammonification, de nitrification (Gobat *et al.*, 2010) et la dégradation de la matière organique (Asimi, 2009). Cependant, les fortes doses de pesticides entraînent un ralentissement du processus de dégradation des substrats carbonés (Peacock, 2000). Nos résultats ont aussi montré que le Thiofanate méthyl et l'Ethoprophos pouvaient ne pas avoir d'effets sur les souches de *Pseudomonas* fluorescents. Ce qui est confirmé par les travaux de Siddiqui *et al.*, (2000), qui ont montré que l'utilisation des fongicides seuls ou en association avec des *Pseudomonas* n'a eu aucun effet significatif sur la croissance en hauteur des plantes. Cette absence d'effet des pesticides pourrait être liée aux composés utilisés.

Par contre, l'application des produits phytosanitaires à de faibles doses a induit de façon générale une croissance plus importante des plantes de tomate, comparée aux doses recommandées par les producteurs. Les faibles doses de fongicide et de nématicide semblent donc ne pas avoir d'impact majeur sur les microorganismes du sol tels que *Funneliformis mosseae* et *Pseudomonas putida*. Ces résultats sont confirmés par les travaux de Schweiger et Jakobsen (1998), qui ont prouvé que les fongicides pouvaient ne pas avoir d'effets et que certains peuvent même stimuler la colonisation, l'absorption des éléments nutritifs notamment lorsque les doses sont réduites (Burrows et Ahmad, 2007). C'est le cas du Triadimefon et du

pyrazophos, deux fongicides qui favorisent la formation de mycorhizes (Von Alten *et al.*, 1993). Ainsi, il semble que l'effet des pesticides sur les champignons mycorhiziens et sur la colonisation mycorhizienne varie avec les pesticides employés et les plantes associées (Abd-Alla *et al.*, 2000). Par ailleurs, les travaux de Malathi *et al.*, (2002) ont montré que l'utilisation d'un nématicide, le thiofanate méthyl à des doses réduites stimulait la croissance des isolats de *Pseudomonas fluorescens*. Ces résultats peuvent s'expliquer par le fait qu'il existe une compatibilité entre certains microorganismes du sol et les pesticides utilisés à faibles doses. Cette compatibilité a été mise en évidence entre des souches de *Pseudomonas fluorescens* et un fongicide, l'azoxystrobine à des concentrations de 5, 10, 50, 100 et 250 ppm (Ongena *et al.*, 2013). En plus, Göre et Altin (2006), ont prouvé lors d'une expérience *in vitro* que l'application de Thiofanate méthyl aux doses de 0, 1, 3, 10, 30 et 100 µg/ml n'affecte pas les souches de *Pseudomonas fluorescens*. Des observations visuelles sur la pigmentation fluorescente, la croissance et le dénombrement de la bactérie ont révélé l'existence d'une compatibilité entre le nématicide et les souches de *Pseudomonas*. Mis à part cette compatibilité, les souches de *Pseudomonas putida* sont capables d'éliminer avec succès les résidus d'Ethoprophos et qu'il existe une relation positive entre la taille de l'inoculum et le taux de dégradation de l'éthoprophos dans le sol. Cette dégradation peut se faire sans phase de latence quand les souches de *Pseudomonas putida* sont introduites dans le sol avec une densité d'environ 10^6 cellules (Dimitrios *et al.*, 2000).

IV. Impact de l'inoculation de plants de tomate par des CMA et des *Pseudomonas putida* en agriculture intensive

Les microorganismes, *Funneliformis mosseae* et *Pseudomonas putida* exercent une influence positive sur la croissance et le développement des plants de tomates. Cet effet se traduit par une augmentation des rendements chez les plantes de tomate inoculées. Des résultats similaires ont été mentionnés par d'autres auteurs (Satraniet *al.*, 2009 ; Zougari-Elwedi *et al.*, 2012).

Les microorganismes solubilisant le phosphate tels que les *Pseudomonas* fluorescents peuvent augmenter les rendements des cultures (Vessey, 2003). Ces résultats positifs ont été confirmés par Nezarat et Gholami, (2009) sur des cultures inoculées par les rhizobactéries promotrices de croissance végétale. Des essais pratiqués au champ ont montré que l'inoculation des plants de maïs par des souches de *Pseudomonas spp* a généré une augmentation du rendement des cultures de laitue de 18 % (Smith, 1995). Biari *et al.*, (2008)

ont expliqué l'augmentation des rendements de maïs obtenus au niveau des plants inoculés avec les rhizobactéries par l'absorption plus accrue d'azote, du phosphore, du potassium, du fer, du zinc, du manganèse et du cuivre. Selon Contesto *et al.*, (2008), l'effet positif des rhizobactéries promotrices de la croissance végétale des plantes est dû à la synthèse d'hormones végétales qui modifient le niveau des hormones endogènes. D'après Khalid *et al.*, (2004), les bactéries produisant l'auxine (AIA) dans le sol génèrent une augmentation remarquable du rendement des récoltes.

Par ailleurs, l'inoculation des plantes avec des champignons mycorhiziens arbusculaires se traduit le plus souvent par l'obtention de meilleurs rendements par rapport aux témoins. Les travaux de Nwaga *et al.*, (2004) chez des plantes de maïs mycorhizées ont montré une augmentation de rendement de 52 à 59 % par rapport au témoin alors que pour cette même spéculation, une augmentation de 77 % a été notée par Uphoff *et al.*, (2006). En plus chez la tomate mycorhizée, cette augmentation est de 116 % d'après Jemo *et al.*, (2007). Ces résultats s'expliquent le plus souvent par une amélioration de la nutrition minérale et hydrique des plantes mycorhizées par des champignons, comme cela a été démontré par plusieurs auteurs (Javelle *et al.*, 2008 ; Gavériaux, 2012). L'absorption des éléments nutritifs constitue la première grande fonction attribuée aux champignons mycorhiziens arbusculaires chez les plantes-hôtes (Fortin *et al.*, 2008). On peut citer entre autres, la nutrition phosphatée car les champignons mycorhiziens arbusculaires rendent accessibles les ions phosphates solubles, présents dans les petits interstices du sol et qui ne sont pas accessibles aux poils absorbants (Smith et Read, 2008) ; l'azote, le potassium et les oligoéléments sont aussi bien assimilés par les complexes mycorhiziens (He et Nera, 2007).

Nos résultats ont aussi montré que les fréquences et intensité de mycorhization les plus élevées ont été obtenues chez les plantes de tomate inoculées avec *Funneliformis mosseae* avec des valeurs de 70 % et 14,40 %. Des résultats similaires ont été obtenus chez des racines de plantes de tomate colonisées par des CMA avec taux de mycorhization supérieurs à 50 % (Nedorost and Pokluda, 2012). Par contre les travaux de Banito *et al.*, (2015) chez des racines de tomate mycorhizées, ont montré des taux inférieurs à 50 %. Bien qu'il y ait une compatibilité fonctionnelle entre espèces végétales et les CMA déterminant l'association préférentielle entre les symbiotes (Diaga *et al.*, 2003), les essais d'inoculation au champ de plants avec un champignon n'ont pas toujours donné les résultats espérés, en raison de la compétition exercée la présence d'autres microorganismes (Barea *et al.*, 2002). Par ailleurs, l'inoculation des plants de soja par les CMA a permis d'augmenter significativement le rendement en gousses formées, des graines au niveau des plants inoculés par rapport aux

plants non inoculés. Ce résultat s'expliquerait par la réussite de l'infection mycorhizienne, dû à la capacité des CMA à développer des hyphes et à mobiliser l'eau et le phosphore soluble du sol (Smith and Read, 2008).

Dans le cas de la co-inoculation entre Fm et PS1, le rendement en fruits de tomate est de 6,03 t/ha. Il est inférieur à l'inoculation avec Fm seul ou PS1 seul, mais supérieur au témoin non inoculé avec aucune différence significative. Cette association peut entraîner une augmentation de la croissance des plantes de tomate de façon synergique (Gamalero *et al.*, 2004), effet connu des genres *Funneliformis* et *Pseudomonas*. Toutefois, Il est important de noter qu'il existe toujours des interactions entre les groupes microbiens du sol, avec des effets pouvant être néfastes pour la plante (Whipps, 2001). Le champignon mycorhizien *Funneliformis mosseae* peut donc exercer un effet antagoniste sur les souches de *Pseudomonas putida*. Ces effets antagonistes seraient liés à une compétition trophique entre les symbiotes (Weber *et al.*, 2005) et pourraient entraîner cette réduction de rendement dans le cas de l'association entre PS1 et Fm par rapport à l'inoculation de plantes avec PS1 seul. Par ailleurs, d'autres champignons mycorhiziens semblent inhiber la formation de biofilms de certaines bactéries utiles (Peres De Carvalho *et al.*, 2015) sur les hyphes fongiques ; rendant ainsi difficile la colonisation des racines et des hyphes.

Les traitements nématicides et fongicides chez les plantes inoculées avec Fm se traduisent par une baisse de rendement par rapport au traitement Fm seul. Le constat est le même chez les plantes inoculées avec PS1. Ces résultats s'expliquent par le fait que l'utilisation des pesticides dans les cultures peut atteindre le sol et entraîner une perturbation du métabolisme ou des activités enzymatiques locales (Engelen *et al.*, 1998, Liu *et al.*, 2008, Hussain *et al.*, 2009) telles que la β glucosidase, la déshydrogénase, les phosphatases, la protéase et l'uréase sécrétées par ces microorganismes (Gianfreda et Rao, 2008). Ce phénomène conduit à une réduction considérable de la disponibilité des éléments nutritifs pour les plantes et la fertilité du sol, d'où une baisse des rendements des cultures. L'utilisation des pesticides altère la communauté microbienne des sols, ne permettant plus aux plantes cultivées de profiter pleinement des propriétés de ces microorganismes (Fortin *et al.*, 2008). Par exemple les fongicides, en particulier peuvent avoir un impact direct sur la colonisation et la sporulation des CMA et même aboutir à leur disparition (Fortin *et al.*, 2008). En outre, la germination des spores de CMA et l'élongation des hyphes germinatives sont inhibées en présence de fongicides (Calonne *et al.*, 2010 ; Twanabasu *et al.*, 2013). Cette inhibition a également été observée chez des souches de *Pseudomonas putida* en présence de pesticides

(Chen *et al.*, 2009). En plus, les pesticides en persistant dans le sol entraînant une déstabilisation des écosystèmes du sol, ce qui nuit fortement aux effets des rhizobactéries (Agarry *et al.*, 2013 ; Ahemad *et al.*, 2009). Par contre, d'autres chercheurs ont démontré des réponses très positives des cultures à l'inoculation au champ malgré la présence de facteurs plutôt défavorables à la survie et à l'expression des fonctions des mycorhizes (Douds *et al.*, 2007 ; Pellegrino *et al.*, 2011). Par ailleurs, les baisses de rendement constatées dans le cas de l'inoculation avec *Funneliformis mosseae* comparativement à l'inoculation avec *Pseudomonas putida* peuvent être liées à la fertilisation car les apports d'engrais augmentent instantanément l'offre de phosphore disponible aux plantes. Selon Grant *et al.*, (2005), l'effet de l'inoculation sur les rendements des plantes diminuerait avec l'augmentation de la biodisponibilité des phosphates dans le sol. Selon Kahiluoto *et al.*, (2000), dans un sol très riche en cet élément, l'association mycorhizienne pourrait mener à une réduction du rendement des plantes en raison d'un déséquilibre du ratio coût sur bénéfice de la symbiose au profit du champignon. Les espèces de CMA sont globalement reconnues pour être moins efficaces et peuvent même être de nature parasitique pour la plante hôte, c'est-à-dire que le CMA prend plus d'énergie à la plante qu'il lui en procure par l'absorption de nutriments (Johnson, 1993).

Les PGPR du genre *Pseudomonas* sont capables de contrôler les agents pathogènes via la production d'antibiotiques et de sidérophores (Shivakumar, 2007). Ils peuvent également stimuler la croissance végétale et réduire l'impact de certaines maladies (Viswanathan et Samiyappan, 1999). Chez les plantes inoculées avec les souches de *Pseudomonas putida*, la valeur de l'indice de galle est faible et est de 2,45. Ils peuvent induire une résistance systémique contre différents agents pathogènes parmi lesquels, les nématodes en condition de plein champ (Ramamoorthy *et al.*, 2000). Par exemple, chez des plantes de tomate cultivées en plein champ, le niveau d'infestation des nématodes à galle *Meloidogyne incognita* est réduit suite à un bain racinaire de souches de *Pseudomonas fluorescens* (Santhi and Sivakumar, 1995 ; Kloepper et Ryu, 2006). Les rhizobactéries promotrices de la croissance des plantes ont réduit de façon significative les masses d'œufs sur les racines causées par les nématodes des cultures de tomates, ce qui a permis d'accroître le rendement (Kokalis-Burelle et Dickson, 2003). Ces *Pseudomonas* possèdent une activité antagoniste à large spectre contre les agents phytopathogènes comme les nématodes (Weller *et al.*, 2002). Par contre, nos résultats ont montré que chez les plantes traitées avec *Funneliformis mosseae*, le taux d'infestation est légèrement supérieur à celui des témoins non inoculés. Les CMA en

symbiose avec les plantes entraînent des modifications dans la composition et l'activité de la microflore, pouvant avoir un effet dépressif ou stimulant sur le développement des microorganismes tels que les nématodes (Kaznelson *et al.*, 1992). Les travaux de Banito *et al.*, (2015) ont montré que l'inoculation de plantes de tomate par des champignons mycorhiziens du genre *Funneliformis* a engendré une bonne mycorhization, mais un fort taux d'infestation des racines par les nématodes. Cependant ces résultats sont en contradiction avec ceux de Whipps, (2004) ; Liu *et al.*, (2007) qui ont prouvé que chez les racines des plantes mycorhizées, une atténuation des dommages causés par certains agents phytopathogènes tels que les nématodes contrairement aux plantes non mycorhizées peut être notée. En plus, Elsen *et al.*, (2005), dans leurs travaux sur l'interaction CMA-nématodes, ont montré une suppression significative de la population de nématodes en présence des CMA du genre *Funneliformis*. Ces effets s'expliquent par le fait qu'en présence d'un agent pathogène, la plante dont les racines sont mycorhizées réagit en produisant des substances antibiotiques qui inhibent la croissance de ces ennemis (Fortin *et al.*, 2008). Parmi ces substances, on peut citer les phytoalexines, les enzymes de la voie phénylpropanoïde, les chitinases, les b-1,3-glucanases, les peroxydases (Gianinazzi-Pearson *et al.*, 1994).

L'application des pesticides chez les plantes inoculées n'a pas d'effet significatif sur l'indice de galle. Les valeurs obtenues varient entre 2,58 et 3,83 et sont sensiblement les mêmes comparées aux plantes inoculées avec Fm seul ou PS1 seul avec respectivement 3,83 et 2,45. Les pratiques culturales moins intensives telles que les faibles apports d'intrants pourraient stimuler les mycorhizes, tout en réduisant les bioagresseurs telluriques.

**CONCLUSION GENERALE ET
PERSPECTIVES**

Conclusion générale et perspectives

La rhizosphère des plantes de tomate renferme de nombreux microorganismes tels que les rhizobactéries, appartenant au groupe des *Pseudomonas* fluorescents. Parmi les microorganismes qui ont été isolés, 16 isolats ont été identifiés comme étant des *Pseudomonas putida* avec des pourcentages de similarité compris entre 76 % et 92 %.

Les études conduites en milieu contrôlé ont révélé que l'inoculation de ces rhizobactéries seules, ou bien en association avec des champignons mycorhiziens arbusculaires (*Funneliformis mosseae*, *Glomus aggregatum*), induit des effets bénéfiques qui se traduisent par une augmentation du taux de mycorhization, des poids secs aériens, racinaires et de la hauteur des plantes de tomate. Cependant, cette stimulation de la croissance des plantes est plus importante dans le cas de la co-inoculation entre les CMA et les souches de *Pseudomonas putida*. C'est le cas du couple Fm/PS1 où les paramètres de mycorhization et de croissance ont été augmentés aussi bien sur sol stérile et non stérile. Ces résultats positifs traduisent l'effet synergique qui existe entre ces microorganismes.

Il a également été démontré que l'application des produits phytosanitaires comme le fongicide (Ethoprophos) et le nématicide (Thiofanate méthyl) peut avoir un impact sur les microorganismes lorsqu'ils ont appliqués à de fortes doses. Par contre, les faibles doses de pesticides testées n'ont pas d'impact majeur sur ces microorganismes car les paramètres de croissance ont connu une hausse chez les plantes de tomate traitées. Ce qui suggère une tolérance des pesticides par les CMA et les *Pseudomonas* à des doses réduites.

A partir de ces résultats obtenus en serre, un essai en plein champ a été effectué afin d'évaluer l'impact de l'inoculation sur le rendement, en agriculture intensive. Les résultats de l'application de la technologie de l'inoculation dans les itinéraires techniques agricoles ont montré que le rendement en fruits le plus important est obtenu chez les plantes de tomate inoculées avec les souches de *Pseudomonas putida* (12,59 t/ha). Par contre, l'application de la co-inoculation entre Fm/PS1 n'a pas donné les résultats escomptés, car le rendement obtenu est de 6,03 t/ha et est inférieur comparé au traitement Fm ou PS1 seul. Ces résultats sont justifiés par le fait que les souches de *Pseudomonas putida* sont capables de contrôler les dégâts causés par les nématodes à galle. En effet, chez ces plantes, l'indice de galle est faible avec une valeur de 2,45 ; ce qui n'est pas le cas avec la co-inoculation entre Fm/PS1 où l'indice est de 5. Cet essai a permis de montrer également que l'application des produits phytosanitaires à des doses réduites constitue une source de stress pour les microorganismes

en milieu naturel ; car chez les plantes inoculées avec Fm et PS1 et traitées avec le fongicide ou nématicide, les rendements ont faiblement baissé par rapport aux plantes inoculées avec Fm ou PS1 seul. Ainsi, il ressort de cette étude que l'inoculation avec les souches de *Pseudomonas putida* est beaucoup plus avantageuse pour l'amélioration du rendement comparée à l'utilisation du CMA ou des produits phytosanitaires. Néanmoins l'utilisation de ces microorganismes se traduit par une amélioration de la croissance des plantes de tomate et par conséquent une hausse du rendement par rapport aux plantes témoins non inoculées.

Ces résultats permettent d'envisager avec l'utilisation des rhizobactéries et des CMA, des systèmes culturaux plus sains. En effet, l'apport de ces microorganismes pourrait permettre une réduction des produits phytosanitaires et présenter un avantage économique et écologique intéressant.

Pour une bonne intégration de biofertilisant à base de ces microorganismes symbiotiques (champignons mycorhiziens / bactéries) dans les itinéraires techniques de production maraîchère, il faut :

- Sensibiliser l'opinion, les professionnels du secteur, sur le rôle majeur de ces microorganismes pour une production d'aliments plus sains, de bonne qualité et respectueuse de l'environnement ;
- Réaliser des tests en culture *in vitro* pour sélectionner des souches pures de CMA et de *Pseudomonas* fluorescents plus performantes ;
- Réaliser des tests en culture *in vitro* et en serre pour une meilleure connaissance des interactions entre ces microorganismes et les pesticides ;
- Intégrer les ressources fongiques symbiotiques et bactériennes dans les itinéraires techniques agronomiques pour une meilleure productivité et une gestion raisonnée des pesticides ;
- Mettre sur pied une unité de production de biofertilisants pour répondre aux besoins des agriculteurs.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- Abd-Alla M.H., Omar S.H., Karanxha S. (2000).** The impact of pesticides on arbuscular mycorrhizal and nitrogen-fixing symbioses in legumes. *Applied Soil Ecology*, 14, 191-200.
- Agarry S.E., Olu-arotiowa O.A., Aremu M.O. and Jimoda L.A. (2013).** Biodegradation of Dichlorovos (Organophosphate pesticide) in soil by bacterial isolates. *Journal of Natural Sciences Research*.3:12-16.
- Agboyi L.K., Ketoh G.K., Martin T. et Glitho I.A. (2016).** Pesticide resistance in *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae) populations from Togo and Benin. *Int. J. Trop. Insect Sci.*, 36(4), 204-210.
- Ahemad M., Khan M.S., Zaidi A., Wani P.A. (2009).** Remediation of Herbicides Contaminated Soil using Microbes. In: *Microbes in Sustainable Agriculture*, Khan, M.S., A. Zaidi and J. Musarrat (Eds.). Nova Publishers, New York, ISBN-13: 9781604569292, pp: 261-284.
- Ahemad M., Zaidi A., Khan M.S. and Oves M. (2009).** Factors affecting the variation of microbial communities in different agroecosystem in microbial states for crop improvement, Khan, M. S A. Zaidi and J. Musarrat (Eds) *Springer, Berlin, Heidelberg*, 301-324.
- Alexander M. (1977).** Introduction to soil microbiology. John Wiley and Sons, USA. Amazonia: evidence for unusual microorganisms and microbial population shifts associated with deforestation. *Appl. Environ. Microbiol.* 63: 2647-2653.
- Altindag M., Sahin M., Esitken A., Ercisli S., Guleryuz M., Donmez M.F. Et Sahin F. (2006).** Biological control of brown rot (*Moniliana laxa* Ehr) on apricot (*Prunus armeniaca* L. cv. Haclhaliloglu) by *Bacillus*, *Burkholdria*, and *Pseudomonas* application under *in vitro* and *in vivo* conditions. *Biological Control*, 38, pp. 369-372.
- Anonyme. (1999).** Tomate sous serre. *Bulletin Mensuel D'information et de Liaison du PNTTA*, N°57.4 p.

- Ashrafuzzaman M., Hossen F.A., Ismail M.R., Hoque M.A., Islam M.Z., Shahidullah S.M. et Meon S. (2009).** Efficiency of plant growth promoting Rhizobacteria (PGPR) for the enhancement of rice growth. *Afri. J. Biotechnol.*, 8: 1247-1252.
- Asimi S. (2009).** Influence des modes de gestion de la fertilité des sols sur l'activité microbienne dans un système de cultures de longue durée au Burkina Faso. Thèse de doctorat d'état ès-sciences naturelles. 177 pages.
- Atzhorn R., Crozier A., Wheeler C.T. et Sandberg G. (1988).** Production of gibberellins and indole- 3-acetic acid by *Rhizobium phaseoli* in relation to nodulation of *Phaseolus vulgaris* roots. *Planta* 175: 532–538.
- Audenaert K., Pattery T., Cornelis P., Höfte M. (2002).** Induction of Systemic Resistance to *Botrytis cinerea* in Tomato by *Pseudomonas aeruginosa* TNSK2: Role of Salicylic Acid, Pyochelin, and Pyocyanin. *Mol Plant Microbe Interact.* 15(11):1147-56.
- Augé R.M. (2001).** Water relations, drought and vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Mycorrhiza* 11: 3– 42.
- Augé R.M., Sylvia D.M., Park S., BATTERY B.R., Saxton A.M., Moore J.L., Cho K. (2004).** Partitioning mycorrhizal influence on water relations of *Phaseolus vulgaris* into soil and plant components. *Can. J. Bot.*, 82:503-514.
- Azcon R. (1987).** Germination and hyphal growth of *Glomus mosseae* in vitro: effects of rhizosphere bacteria and cell-free culture media. *Soil Biol. Biochem.* 19: 417-419.
- Azcón R. (1989).** Selective interactions between free-living rhizospheric bacteria and vesicular- arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Biol. Biochem.* 21 (1989) 639–644.
- Azcón-Aguilar C. and Barea J.M. (1992).** Interactions between Mycorrhizal fungi and other rhizosphere microorganisms. En: Allen M.F. (ed) Mycorrhizal functioning: An integrative plant-fungal process. Chapman & Hall, New York, pp. 163-198.
- Bâ A.M., Sanon K.B., Duponnois R., Dexheimer J. (1999)** Growth responses of *Azelia africana* Sm. seedlings to ectomycorrhizal inoculation in a nutrient-deficient soil. *Mycorrhiza* 9: 91-95.

- Bâ A., Guisson T., Duponnois R., Plenchette C., Sacko O., Sidibé D., Sylla K., Windou B. (2001).** Mycorhization contrôlée et fertilisation phosphatée : Applications à la domestication du jujubier. *Fruits*, 56(4) : 261-269.
- Baba Aissa F. (1999).** Encyclopédie des plantes utiles, flore d'Algérie et de Maghreb. ed. librairie moderne, Rouiba : 278-279 p.
- Babana A.H. et Antoun H. (2006).** Effect of Tilemsi phosphate rock-solubilizing microorganisms on phosphorus uptake and yield of field-grown wheat (*Triticum aestivum* L.) in Mali. *Plant Soil*, 287: 51-58.
- Baca B.E., Elmerich C. (2007).** Microbial production of plant hormones. *Associative and Endophytic Nitrogen-fixing Bacteria and Cyanobacterial Associations* p. 113 – 143.
- Badji B., Riba A., Mathieu F., Lebrihi A. et Sabaou N. (2005).** Activité antifongique d'une souche d'*Actinomadura* d'origine saharienne sur divers champignons pathogènes et toxigènes. *Journal de Mycologie Médicale*, 15, pp. 211-219.
- Bago B., Vierheilig H., Piché Y., Azcón-Aguilar C. (1996).** Nitrate depletion and pH changes induced by the extraradical mycelium of the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus irregularis* grown in monoxenic culture. *New Phytologist* 133: 273–280.
- Baker K.F., Cook R.J. (1974).** Biological control of plant pathogens. *A Phytopathol Soc*, St Paul, MN, 433 p.
- Bakker P.A., Pieterse C.M. et Van Loon L.C. (2007).** Induced Systemic Resistance by Fluorescent *Pseudomonas* spp. *Phytopathology*. 97: 239-243.
- Banito A., Banla E.M., Ayisah D.K., Sogbedji J.M. (2015).** Efficacité des champignons mycorrhiziens contre les nématodes parasites de la tomate au Togo. *J. Appl. Biosci.*89: 8256– 8262.
- Bano N. and Musarrat J. (2003).** Characterization of a new *Pseudomonas aeruginosa* strain NJ-15 as a potential biocontrol agent. *Cur.Microbiol.* 46: 324-328.
- Barea J.M. (2000).** Rhizosphere and mycorrhiza of field crops. En: Toutant J., Balazs E., Galante E., Lynch J., Schepers J., Werner D., Werry P. (eds) *Biol. Resource Management : Connecting Science and Policy* (OECD). INRA, Springer, Heidelberg-Alemania, pp 110- 125.

- Barea J.M., Azcón R. and Azcón-Aguilar C. (2002).** Mycorrhizosphere interactions to improve plant fitness and soil quality. *Antonie Van Leeuwenhoek International Journal of General and Molecular Microbiology*, 81: 343-351.
- Barea J.M., Pozo M.J., Azcón R., Azcón-Aguilar C. (2005).** Microbial co-operation in the rhizosphere. *Journal of Experimental Botany* 56: 1761–1778.
- Barriuso J., Marin S. and Mellado R.P. (2010).** Effect of the herbicide glyphosate on glyphosate-tolerant maize rhizobacterial communities: A comparison with pre-emergence applied herbicide consisting of a combination of acetochlor and terbuthylazine. *Environ. Microbiol.*, 12: 1021-1030.
- Bashan Y. et Holguin G. (1997).** *Azospirillum*-plant relationships: environmental and physiological advances (1990–1996). *Can. J. Microbiol.*43:103–121.
- Bashan Y. et Levanony H. (1990).** Current status of *Azospirillum* inoculation technology: *Azospirillum* as a challenge for agriculture. *Can. J. Microbiol.* 36:591–608.
- Bashan Y., Holguin G. et De-Bashan L.E. (2004).** *Azospirillum*-plant relationships: physiological, molecular, agricultural, and environmental advances (1997-2003), *Can. J. Microbiol.* 50:521-577.
- Bellinaso M.L., Greer C.W., Peralba M.C., Henriques J.A. and Gaylarde C.C. (2003).** Biodegradation of the herbicide by bacteria isolated from soil. *FEMS Microbiol Ecol.*43(2): 191-194.
- Batsch D. (2011).** Impact des pesticides sur la santé humaine. Thèse de doctorat. Université Henri Poincaré Nancy 1.
- Bell-Perkins L.J. and Lynch J.M. (2002).** Rhizosphere microbiology, p. 2713-2728. *In Encyclopedia of environmental microbiology*, Bitton G (ed.). A Wiley-Interscience Publication: Canada.
- Benchaabane M., Boutekrabt A., Toua D. (2008).** Le chancre bactérien de la tomate en Algérie. *Bulletin OEPP*, 30(2), pp. 337-339.
- Benedetto A., Magurno F., Bonfante P., Lanfranco L. (2005).** Expression profiles of a phosphate transporter gene (GmosPT) from the endomycorrhizal fungus *Glomus mosseae*. *Mycorrhiza* 15: 620–627.

- Benhamou N., Garand C., Goulet A. (2002).** Ability of nonpathogenic *Fusarium oxysporum* strain F047 to induce resistance against *Pythium ultimum* infection in cucumber. *Applied and Environmental Microbiology*, 68(8), p. 4044-4060.
- Berg G., Krechel A., Ditz M., Sikora R.A., Ulrich A. and Hallmann J. (2005).** Endophytic and ectophytic potato-associated bacterial communities differ in structure and antagonistic function against plant pathogenic fungi. *FEMS Microbiol. Ecol.* 51: 215-229.
- Berggren I., Van Vuurde J.W.L. et Martensson A.M. (2001).** Factors influencing the effect of deleterious *Pseudomonas putida* rhizobacteria on initial infection of pea roots by *Rhizobium leguminosarum* bv. viciae, *Appl. Soil Ecol.* 17: 97-105.
- Bertin C., Yang X.H. and Weston L.A. (2003).** The role of root exudates and allelochemicals in the rhizosphere. *Plant and Soil*, 256: 67-83.
- Bianciotto V., Andreotti S., Balestrini R., Bonfante P., Perotto S. (2001).** Extracellular polysaccharides are involved in the attachment of *Azospirillum brasilense* and *Rhizobium leguminosarum* to arbuscular mycorrhizal structures. *Eur J Histochem* 45: 39-49.
- Bianciotto V., Minerdi D., Perotto S., Bonfante P. (1996).** Cellular interactions between arbuscular mycorrhizal fungi and rhizosphere bacteria. *Protoplasma* 193: 123-131.
- Biari A., Gholami A., Rahmani H.A. (2008).** Growth promotion and enhanced nutrient uptake of maize (*Zea mays* L.) by application of plant growth promoting rhizobacteria in Arid region of Iran. *J.Boil. Sci.*, 8: 1015 1020.
- Binet M.N., Lemoine M.C., Martin C., Chambon C., Gianinazzi. (2007).** Micropropagation of olive (*Olea europaea* L.) and application of mycorrhiza to improve plantlet establishment. *Dev. Biol. Plant.*, 43: 473-478.
- Bizzini A., Greub G. (2010).** MALDI-TOF MS, a revolution in clinical microbial identification. *Clin Microbiol Infect.* 16:1614-9.
- Blancard D., Laterrot H., Marchoux G. et Candresse T. (2009).** Les maladies de la tomate. ed. INRA.

- Bleecker A.B. et Kende H. (2000).** Ethylene: a gaseous signal molecule in plants. *Annu. Rev. Cell Dev. Biol.* 16:1-18.
- Bloemberg G. and Lugtenberg B. (2001).** Molecular basis of plant growth promotion and biocontrol by rhizobacteria. *Cur.Opin. Plant Biol.* 4: 343-350.
- Blondiaux N., Gaillot O., Courcol R. J. (2013).** Identification bactérienne par spectrométrie de masse de type MALDI-TOF : évaluation au CHU de Lille. *Pathol. Biol.* 58 :55 – 57.
- Bolandnazar S., Aliasgarzad N., Neishabury M.R., Chaparzadeh N. (2007).** Mycorrhizal colonization improves onion (*Allium cepa* L.) yield and water use efficiency under water deficit condition. *Scientia Horticulturae* 114: 11-15.
- Bonfante-Fasolo P. (1984).** Anatomy and morphology of VA mycorrhizae. En: Powell C.L., Bagyaraj D.J. (eds) *VA mycorrhiza*, CRC Press, Boca Raton, pp. 5-33.
- Bossis E., Lemanceau P., Latour X. and Gardan L. (2000).** The taxonomy of *Pseudomonas fluorescens* and *Pseudomonas putida*: current status and need for revision. *Agronomie* .20: 51-63.
- Bottini R., Cassan F. et Picolli P. (2004).** Gibberellin production by bacteria and its involvement in plant growth promotion. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 65: 497–503.
- Breuninger M., Trujillo C.G., Serrano E., Fischer R., Requena N. (2004).** Different nitrogen sources modulate activity but not expression of glutamine synthetase in arbuscular mycorrhizal fungi. *Fungal Genetics and Biology* 41: 542–552.
- Brimecombe M.J., De Leij F.A. et Lynch J.M. (2007).** Rhizodeposition and microbial population, p. 74-98. In Pinto R., Varanini Z., Nannipieri P. (ed.), *The rhizosphere : biochemistry and organic substances at the soil-plant interface*. CRC Press. New York.
- Broadbent P., Baker K.F., Franks N., Holland J. (1977).** Effet of *Bacillus* spp on increased growth of seedlings in steamed and in non-treated soil. *Phytopathology* 67, 1027 – 1034.
- Brundrett M.C. (2009).** Mycorrhizal associations and other means of nutrition of vascular plants: understanding the global diversity of host plants by resolving conflicting information and developing reliable means of diagnosis. *Plant & Soil*, 320: 37-77.

- Burrows B.L., Ahmad I. (2007).** Fungicide seed treatments minimally affect arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) colonisation of selected vegetable crops. *Journal of Biological Sciences* 7: 417–420.
- Calonne M., Fontaine J., Debiante D., Laruelle F., Grandmougin-Ferjani A. & Lounès-Hadj A. (2010).** Propiconazole toxicity on the non-target organism, the arbuscular mycorrhizal fungus, *Glomus irregulare*. In: Carisse O (ed) *Fungicides*, Chapter 16, 326–346.
- Calonne M., Sahraoui A.L.H., Campagnac E., Debiante D., Laruelle F., Grandmougin Ferjani A., Fontaine J. (2012).** Propiconazole inhibits the sterol 14 α -demethylase in *Glomus irregulare* like in phytopathogenic fungi. *Chemosphere* 87: 376–383.
- Campagnac E., Fontaine J., Sahraoui A.L.H., Laruelle F., Durand R. & Grandmougin-Ferjani A. (2008).** Differential effects of fenpropimorph and fenhexamid, two sterol biosynthesis inhibitor fungicides, on arbuscular mycorrhizal development and sterol metabolism in carrot roots. *Phytochemistry*.69, 2912–2919.
- Campagnac E., Lounès-Hadj Sahraoui A., Debiante D., Fontaine J., Laruelle F., Garçon G., Verdin A., Durand R., Shirali P. & Grandmougin-Ferjani, A. (2010).** Arbuscular mycorrhiza partially protect chicory roots against oxidative stress induced by two fungicides, fenpropimorph and fenhexamid. *Mycorrhiza*. 20, 167–178.
- Campbell R. et Greaves M.P. (1990).** Anatomy and community structure of the rhizosphere in The Rhizosphere (ed. Lynch J.M.), John Wiley & Sons, Ltd, Essex, pp. 11–34.
- Camprubi A., Calvet C., Estaun V. (2000).** Micorrizas arbusculares en producción agrícola. *Horticult*, 144 : 38-41.
- Caravaca F., Alguacil M.M., Azcón R. and Roldan A. (2006).** Formation of stable aggregates in rhizosphere soil of *Juniperus oxycedrus* : Effect of AM fungi and organic amendments. *Applied Soil Ecology*, 33: 30-38.
- Cattelan A.J., Hartel P.G. and Fuhrmann J.J. (1999).** Screening for Plant Growth–Promoting Rhizobacteria to Promote Early Soybean Growth. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 1670–1680.
- CGER Vallée. (2016).** Bulletin Analyse Economique Filière Tomate. 16 p.

- Chalot M., Blaudez D., Brun A. (2006).** Ammonia: a candidate for nitrogen transfer at the mycorrhizal interface. *Trends in Plant Science* 11: 263–266.
- Chen H.L., Yao J., Wang F., Bramanti E., Maskow T. & Zaray G. (2009).** Acute toxic effects of three pesticides on *Pseudomonas putida* monitored by microcalorimeter. *Journal of Environmental Science and Health*. Vol 44, p. 157-163.
- Chen P., Lu Y., Harrington P. B. (2008).** Biomarker profiling and reproducibility study of MALDI-MS measurements of *Escherichia coli* by analysis of variance-principal component analysis. *Anal. Chem.* 80: 1474–1481.
- Cirad** (Organisme, France Ministère des affaires étrangères, Cirad, centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement France, et Gret, groupe de recherche et d'échanges technologique, ministère des affaires étrangère). **(2002).** Mémento de l'agronomie. (ed). Quae.p.1045-1046.
- Cissé I., Tandia A.A., Fall S.T. et Diop E.S. (2003).** Usage incontrôlé des pesticides en agriculture urbaine et périurbaine : cas de la zone des Niayes au Sénégal. *Cahiers d'études et de recherches francophones/Agriculture*, n°12, pp. 181-186.
- Compant S., Duffy B., Nowak J., Clément C. and Ait Barka E. (2005).** Use of plant growth-promoting bacteria for biocontrol of plant diseases: Principles, Mechanisms of Action, and Future Prospects. *Appl. Environ. Microbiol.* 71: 4951-4959.
- Contesto C., Desbrosses G., Lefoulon C., Béna G., Borel F., Galland M., Gamet L., Varoquaux F., Touraine B. (2008).** Effects of rhizobacterial ACC deaminase activity on *Arabidopsis* indicate that ethylene mediates local root responses to plant growth-promoting rhizobacteria. *Plant Sci.*, 175: 178-189.
- Cronquist A. (1981).** An integrated system of classification of flowering plants. Colombia University : 1256p.
- Dalpe Y. (2005).** Mycorrhizae: a potential tool for plant protection but not a panacea. *Phytoprotection* 86: 53-59.

- Debiane D., Garçon G., Verdin A., Fontaine J., Durand R., Shirali P., Grandmougin-Ferjani A. & Lounès-Hadj Sahraoui A. (2009).** Mycorrhization alleviates benzo[a]pyrene-induced oxidative stress in an *in vitro* chicory root model. *Phytochemistry*. 70, 1421–1427.
- Degand N., Carbonnelle E., Dauphin B., Beretti J-L., Le Bourgeois M., Sermet-Gaudelus I. et al. (2008).** Matrix-Assisted Laser Desorption Ionization–Time of Flight massspectrometry for identification of nonfermenting Gram-negative *Bacilli* isolated from cysticfibrosis patients. *J. Clin. Microbiol.* 46: 3361–3367.
- DeLorenzo M.E., Lewitus A.J., Scott G.I. & Ross P.E. (2001).** Use of metabolic inhibitors to characterize ecological interactions in an estuarine microbial food web. *Microbial Ecology*. 42, 317–327.
- Diaga D., Tahir A.D., Ibrahima N. (2003).** Actinorhizal, mycorrhizal and rhizobial symbioses: how much do we know? *African Journal of Biotechnology*, 2(1): 1-7.
- Digat B. (1992).** La bactérisation des substrats en horticulture et maraîchage. *Der Gartenbau*, (20) : 821-823.
- Digat B. and Gardan L. (1987).** Caractérisation, variabilité et sélection des souches bénéfiques de *Pseudomonas fluorescens* et *Pseudomonas putida*. *Bull OEPP*. 17: 559-568.
- Dimitrios G., Karpouzas. and Allan Walker. (2000).** Factors influencing the ability of *Pseudomonas putida* epI to degrade ethoprophos in soil. *Soil Biology & Biochemistry* 32: 1753-1762.
- Dimkpa C., Tanjaweinad I. et Asch F. (2009).** Plant–rhizobacteria interactions alleviate abiotic stress conditions. *Plant Cell Environ.* p. 1-13.
- Diop I., Kane A., Krasova – Wade Y., Sanon K.B., Houngnandan P., Neyra M., Noba K. (2013).** Impacts des conditions pédoclimatiques et du mode cultural sur la réponse du niébé (*Vigna unguiculata* L. Walp.) à l'inoculation endomycorhizienne avec *Rhizophagus irregularis*. *Journal of Applied Biosciences* 69 : 5465 – 5474.

- Diop T.A., Wade T.K., Diallo A., Diouf M. and Gueye M. (2003).** Solanum cultivar responses to arbuscular mycorrhizal fungi: growth and mineral status. *African Journal of Biotechnology*, vol 2(11), 429 – 443.
- Dobereiner J. (1997).** Biological nitrogen fixation in the tropics: social and economic contributions. *Soil Biol. Biochem.* 29: 771–774.
- Douds D.D., Nagahashi G., Reider C. and Hepperly P.R. (2007).** Inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi increases the yield of potatoes in a high P soil. *Biological Agriculture and Horticulture*, vol. 25, p 67-78.
- Ducousso M. and Thoen, D. (1991).** Les types mycorrhiziens des Acaciaeae. in : Physiologie des Arbres et Arbustes en zones arides et semi-arides. Groupes d'Etude de l'Arbre. Paris, France. pp. 175-182.
- Duponnois R. and Bâ A.M. (1999).** Growth stimulation of *Acacia mangium* Willd by *Pisolithus* sp. in some senegalese soils. *Forest Ecology & Management*, 119: 209-215.
- Echairi A., Nouaim R., Chaussod R. (2008).** Intérêt de la mycorhization contrôlée pour la production de plants d'arganier (*Argania spinosa*) en conditions de pépinière. Article de recherche. *Sécheresse*, 19(4) : 277-281.
- Edward S.G., Peter J., Young W. and Fitter A.H. (1998).** Interactions between *Pseudomonas fluorescens* biocontrol agents and *Glomus mosseae*, an arbuscular mycorrhizal fungus, within the rhizosphere. *FEMS Microbiology Letters* 166 : 297-303.
- Edwards S.G., Young J.P.W., Fitter A.H. (1998).** Interactions between *Pseudomonas fluorescens* biocontrol agents and *Glomus mosseae*, an arbuscular mycorrhizal fungus, within the rhizosphere. *FEMS Microbiology Letters*, 166 (2), p. 297–303.
- Elsen A., Swennen R., Waele D. (2005).** The effect of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) – nematode interactions on the roots development of different *Musa* genotypes. 224-237.
- Engelen B., Meinken K., Von-Wintzintgerode F., Heuer H., Malkomes H.P. & Backhaus H. (1998).** Monitoring impact of a pesticide treatment on bacterial soil communities by metabolic and genetic fingerprinting in addition to conventional testing procedures. *Applied and Environmental Microbiology* 64: 2814–2821.

- Esitken A., Karlidag H., Ercisli S., Sahin F. (2002).** Effects of foliar application of *Bacillus subtilis* Osu-142 on the yield, growth and control of shot-hole disease (*Coryneum* blight) of apricot. *Gartenbauwissenschaft*, 67, pp. 139-142.
- Estaun M.V. (1990).** Effect of sodium chloride and mannitol on germination and hyphal growth of the vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus mosseae*. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 29, 123–129.
- F.A.O. (2002).** Code international de conduite pour la distribution et l'utilisation des pesticides.
- F.A.O. (2005).** Statistiques de la FAO pour l'oléiculture.
- F.A.O. (2007).** Caractérisations des systèmes de production agricole au Sénégal. Document de synthèse. 39 p.
- Feddermann N., Finlay R., Boller T. & Elfstrand M. (2010).** Functional diversity in arbuscular mycorrhiza – the role of gene expression, phosphorous nutrition and symbiotic efficiency. *Fungal Ecol* 3: 1–8.
- Fernandes B. (2005).** Lutte biologique. *PHM – Revue horticole*, 465, pp. 31-34.
- Fischer S.E., Fischer S.I., Magris S., Mori G.B. (2007).** Isolation and characterization of bacteria from the rhizosphere of wheat. *World. J. Microbiol. Biotechnol.* 23: 895-903.
- Fortin J.A., Plenchette C. and Piché Y. (2008).** Les mycorhizes: La nouvelle révolution verte. *Edn multimondes*. Québec, Canada, 131 p.
- Fraústro Da Silva J.J.R. and Williams R.J.P. (2001).** The biological chemistry of the elements: the inorganic chemistry of life. Oxford: Clarendon Press.
- Fritz M., Jakobsen I., Lyngkjaer M.F., Thordal-Christensen H., Pons-Kuehnemann J. (2006).** Arbuscular mycorrhiza reduces susceptibility of tomato to *Alternaria solani*. *Mycorrhiza* 16: 413–419.
- Gallou A., Lucero Mosquera H.P., Cranenbrouck S., Suárez J.P., Declerck S. (2011).** Mycorrhiza induced resistance in potato plantlets challenged by *Phytophthora infestans*. *Physiological and Molecular Plant Pathology* 76: 20–26.

- Gamalero E., Trotta A., Massa N., Copetta A., Martinotti M.G., Berta G. (2004).** Impact of two fluorescent pseudomonads and an arbuscular mycorrhizal fungus on tomato plant growth, root architecture and P acquisition. *Mycorrhiza* 14, 185–192.
- Garbaye J. (2000).** The role of ectomycorrhizal symbiosis in the resistance of forests to water stress. *Outlook on Agriculture*, 29: 63-69.
- Garbaye J. (2013).** La symbiose mycorrhizienne, une association entre les plantes et les champignons. *Ed. Quae*, Versailles, 251 p.
- Garcia de Salmone I.E., Hynes R.K. and Nelson L. (2001).** Cytokinin production by plant growth promoting rhizobacteria and selected mutants. *Can. J. Microbiol.*47: 404-411.
- Gartemann K.H., Kirchner O., Engemann J., Grafen I., Eichenlaub R. et Burger A. (2003).** *Clavibacter michiganensis* subsp. *michiganensis*: first steps in the understanding of virulence of a Gram-positive phytopathogenic bacterium. *Journal of Biotechnology*. 106: 179–191.
- Gausсен H., Lefoy J. et Ozenda P. (1982).** Précis de Botanique. 2eme ed. Masson, Paris: 172p.
- Gavériaux J.P. (2012).** Les Glomeromycota – Mycorrhizes VAM et *Geosophon pyriformis* (Kützing) Wettstein, *Bull. Soc. Mycol. Nord Fr.*, n°92, pp. 1-17.
- Gernns H., Von Alten H., Poehling H.M. (2001).** Arbuscular mycorrhiza increased the activity of a biotrophic leaf pathogen – is a compensation possible? *Mycorrhiza* 11: 237–243.
- Gerretsen F.C. (1948).** The influence of microorganisms on the phosphate intake by the plant. *Plant Soil* 1, 51-81.
- Gianfreda L. & Rao MA.(2008).** Interactions between xenobiotics and microbial and enzymatic soil activity. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 38(4): 269–310.
- Gianinazzi S., Gianinazzi-Pearson V., Dexheimer J. (1979).** Enzymatic Studies on the Metabolism of Vesicular-Arbuscular Mycorrhiza.Iii. Ultrastructural Localization of Acid and Alkaline Phosphatase in Onion Roots Infected By *Glomus mosseae* (Nicol.& Gerd.). *New Phytologist* 82: 127–132.

- Gianinazzi-Pearson V. and Gianinazzi S. (1978).** Enzymatic studies on the metabolism of vesicular-arbuscular mycorrhiza. Soluble alkaline phosphatase specific to mycorrhizal infection in onion roots. *Physiological Plant Pathology* 12: 45–53.
- Gianinazzi-Pearson V., Gollote A., Dumas-Gaudot E., Franken P., Gianinazzi S. (1994).** Gene expression and molecular modifications associated with plant responses to infection by arbuscular mycorrhizal fungi. In: DANIELS et al. (1994) Advances in molecular genetics of plant-microbe interactions. *Dordrecht, Kluwer*, p. 179-186.
- Giovanetti M. and Gianinazzi-Pearson V. (1994).** Biodiversity in arbuscular mycorrhizal fungi. *Mycological Research*, 98: 705-715.
- Giove R. et Abis S. (2007).** Place de la méditerranée dans la production mondiale de fruits et légumes. Ed. Institut Agronomique Méditerranéen de Bari : 22p.
- Gleason M.L., Gitaitis R.D. et Rickert, M.D. (1993).** Recent progress in understanding and controlling bacterial canker of tomato in Eastern North America. *Plant Dis.* 77: 1069–1076.
- Glick B. R., Todorovic B., Czarny J., Cheng Z., Duan J., McConkey B. (2007).** Promotion of plant growth by bacterial ACC deaminase. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 26(5-6): 227-242.
- Glick B.R., Cheng Z., Czarny J. and Duan J. (2007).** Promotion of plant growth by ACC-deaminase producing soil bacteria. *Eur. J. Plant Pathol.* 119: 329–339.
- Glick B.R., Jacobson C.B., Schwarze M.M.K. and Pasternak J.J. (1994).** 1-Aminocyclopropane-1-carboxylic acid deaminase mutants of the plant growth promoting rhizobacterium *Pseudomonas putida* GR12-2 do not stimulate canola root elongation. *Can. J. Microbiol.* 40: 911-915.
- Gobat J.M., Arago M. & Matthey W. (2010).** Le sol vivant: Base de pédologie – Biologie des sols. Presse polytechniques et universitaires Romanes, 3e édition : pp. 1- 46.
- Göre M.E., Altın N. (2006).** Growth promoting of some ornamental plants by root treatment with specific fluorescent pseudomonads. *J Biol Sci* 6(3): 610 – 615.
- Gosling P., Hodge A., Goodlass G. and Bending G.D. (2006).** Arbuscular mycorrhizal fungi and organic farming. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 113: 17-35.

- Govindarajulu M., Pfeffer P.E., Jin H., Abubaker J., Douds D.D., Allen J.W., Bücking H., Lammers P.J., Shachar-Hill Y. (2005).** Nitrogen transfer in the arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Nature Letters* 435: 819–823.
- Graham J.H. and Syvertsen J.P. (1989).** Vesicular-arbuscular mycorrhizas increase chloride concentration in citrus seedlings. *New Phytol.*, 113 : 29-36.
- Grant C., Bittman S., Plenchette C. and Morel C. (2005).** Soil and fertilizer phosphorus: Effects on plant P supply and mycorrhizal development. *Canadian Journal of Plant Science*, vol. 85, p. 3-14.
- Grasselly D., Navez B., Letard M. (2000).** Tomate, pour un produit de qualité. 112.
- Gray E.J. and Smith D.L. (2005).** Intracellular and extracellular PGPR: commonalities and distinctions in the plant–bacterium signalling processes. *Soil Biol. Biochem.* 37: 395-412.
- Gupta S.S. (2003).** Chemotactic response of plant-growth-promoting bacteria towards roots of vesicular-arbuscular mycorrhizal tomato plants. *FEMS Microbiol. Ecol.* 45(3): 219-227.
- Gutierrez-Manero F.J., Ramos B., Probanza A., Mehouchi J., Talon M. (2001).** The plant growth promoting rhizobacteria *Bacillus pumilus* and *Bacillus licheniformis* produce high amounts of physiologically active gibberellins. *Physiol. Plant* 111: 206–211.
- Gyaneshwar P., Kumar G.N., Parekh L.J., Poole P.S. (2002).** Role of soil microorganisms in improving P nutrition of plants. *Plant Soil.* 245(1): 83-93.
- Haas D. and Défago G. (2005).** Biological control of soil-borne pathogens by fluorescent pseudomonads. *Nat. Rev. Microbiol.* 3: 307–319.
- Harley J.L. and Smith S.E. (1983).** Mycorrhizal Symbiosis. Academic Press, Londres, 483 p.
- Harrier L.A., Watson C.A. (2004).** The potential role of arbuscular mycorrhizal (AM) fungi in the bioprotection of plants against soil-borne pathogens in organic and / or other sustainable farming systems. *Pest Manage Sci* 60: 149–157.

- Harris J.N., New P.B. & Martin P.M. (2006).** Laboratory tests can predict beneficial effects of phosphate- solubilizing bacteria on plants. *Soil Biology & Biochemistry*, 38: 1521-1526.
- Harrison M.J., Van Buuren M.L. (1995).** A phosphate transporter from the mycorrhizal fungus *Glomus versiforme*. *Nature* 378: 626–629.
- Hawkins H.J., Johansen A., George E. (2000).** Uptake and transport of organic and inorganic nitrogen by arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant and Soil* 226: 275–285.
- He X. & Nara K. (2007).** Element biofortification: can mycorrhizas potentially offer a more effective and sustainable pathway to curb human malnutrition? Trends in *Plant Science*, 12: 331-333.
- Hecht-Buchholz C. (1998).** The apoplast-habitat of endophytic dinitrogen-fixing bacteria and their significance for the nitrogen nutrition of nonleguminous plants. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 161: 509–520.
- Helgason T. and Fitter A. (2005).** The ecology and evolution of the arbuscular mycorrhizal fungi. *Mycologist* 19, 96-101.
- Hiltner L. (1904).** Über neuere Erfahrungen und probleme auf gebiete der bodenbakteriologie unter besonderer berücksichtigung der gründung und brache. *Arb Landwirtsch Ges Berlin* 98: 59 - 78.
- Hinsinger P. (2001).** Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by rootinduced chemical changes: A review. *Plant & Soil*, 237: 173-195.
- Höfte M. et Altier N. (2010).** Fluorescent pseudomonads as biocontrol agents for sustainable agricultural systems. *Res. Microbiol.* 161: 464-471.
- Holland R.D., Wilkes J.G., Rafii F., Sutherland J.B., Persons C.C., Voorhees K.J. (1996).** Rapid identification of intact whole bacteria based on spectral patterns using matrixassisted laser desorption ionization with time of flight mass spectrometry. *Rapid Commun Mass Spectrom.* 10: 1227-1232.
- Houndété T.A., Kétoh G.K., Hema O.S., Brévault T. et Glitho I.A. (2010).** Insecticide resistance in field populations of *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae) in West Africa. *Pest Manage. Sci.*, 66(11), 1181-1185.

- Howell C.R. and Stipanovic R.D. (1980).** Suppression of *Pythium ultimum* induced damping-off of cotton seedlings by *Pseudomonas fluorescens* and its antibiotics, Pyoluteorin. *Phytopathology* 70(8): 712-715.
- Huat J. (2006).** Facteurs limitatifs du rendement de la tomate industrielle en périmètres irrigués au nord Sénégal. *Cahiers Agricultures*, 15 (3): 293-300.
- Hussain S., Siddique T., Saleem M., Arshad M. & Khalid A. (2009).** Impact of pesticides on soil microbial diversity, enzymes, and biochemical reactions. *Advances in Agronomy* 102: 159–200.
- Illa C. (2004).** Etat de la contamination des sols et des eaux par les pesticides en zone cotonnière: la boucle du Mouhoun (Burkina Faso). Mémoire de D.E.S.S. Université de Ouagadougou, 52 p.
- Inserm. (2013).** Pesticides : Effets sur la santé. Collection expertise collective, Inserm, Paris, 2013.
- Ismail Y. and Hijri M. (2010).** Induced resistance in plants and the role of arbuscular mycorrhizal fungi, in: Thangadurai D, Busso CA, Hijri M. (Eds), *Mycorrhizal biotechnology*, CRC Press, USA, pp. 77–99.
- ISRA. (1999).** Rapport annuel de l’Institut Sénégalais de Recherche Agricole. ISRA, Dakar. 62 p.
- Javelle A., Chalot M., Brun A., Botton B. (2008).** Nitrogen transport and metabolism in mycorrhizal fungi and mycorrhizas. *Plant surface and Microbiology*. 393–429.
- Jemo M., Nolte C. & Nwaga D. (2007).** Biomass production, N and P uptake of *Mucuna* after bradyrhizobia and arbuscular mycorrhizal fungi inoculation, and P-application on acid soil of southern Cameroon. In *Advances in Integrated Soil Fertility Management in Sub Saharan Africa: Challenges and Opportunities*. Bationo A et al. (eds), *Springer*. Pp 277-281.
- Jin H., Pfeffer P., Douds D., Piotrowski E., Lammers P., Shachar-Hill Y. (2005).** The uptake, metabolism, transport and transfer of nitrogen in an arbuscular mycorrhizal symbiosis. *New Phytologist* 168: 687–696.

- Jofre E., Lagares A. et Mori G. (2004).** Disruption of d'TDP-rhamnose biosynthesis modifies lipopolysaccharide core, exopolysaccharide production, and root colonization in *Azospirillum brasilense*. *FEMS Microbiol. Lett.* 231(2): 267-275.
- Johansen A., Finlay R., Olsson P. (1996).** Nitrogen metabolism of external hyphae of the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus irregularis*. *New Phytologist* 133: 705–712.
- Johnson N.C. (1993).** Can fertilization of soil select less mutualistic mycorrhizae? *Ecological applications*, Vol. 3, n°4, p. 749-757.
- Joo G.J., Kang S.M., Hamayun M., Na Kim C.I., Shin D.H. et Lee I.J. (2009).** *Burkholderia* sp. KCTC 11096BP as a newly isolated gibberellin producing bacterium. *J. Microbiol.* 47: 167–171.
- Jourdan E., Ongena M. et Thonart P. (2008).** Caractéristiques moléculaires de l'immunité des plantes induite par les rhizobactéries non pathogènes. *Biotechnol.Agron. Soc. Environ.* 12: 437-449.
- Jung S.C., García-Andrade J., Verhage A., Fernández I., García J.M., Azcón-Aguilar C., Pozo M.J. (2009).** Arbuscular mycorrhiza confers systemic resistance against *Botrytis cinerea* in tomato through priming of JA-dependent defense responses. In: Mauch-Mani B., Schmidt A. (eds). *Induced resistance: chances and limits*, IOBC/wprs Bulletin, Working Group “Induced resistance in plants against insects and diseases.” Proceedings of the meeting at Granada (Spain) 8–16.
- Jung S.C., Martinez-Medina A., Lopez-Raez J., Pozo M.J. (2012).** Mycorrhiza-induced resistance and priming of plant defenses. *Journal of chemical ecology* 38: 651–664.
- Kahiluoto H., Ketoja E., Vestberg M. (2000).** Promotion of utilization of arbuscular mycorrhiza through reduced P fertilization. *Plant Soil*, vol. 227, p. 191-206.
- Kanda M., Djaneye-Boundjou G., Wala K., Gnandi K., Batawila K., Sanni A. et Akpagana K.(2013).** Application des pesticides en agriculture maraichère au Togo. *VertigO*, 13(1), 4-8.
- Kapulnik Y.(1996).** Plant Growth promotion by rhizosphere bacteria. In *Plant Roots, the hiddenhalf*. Eds. Y. Waisel, A. Eshel and U. Kafkafi, pp. 769-781. Marcel Dekker, hc., New York.

- Karnwal A. (2009).** Production of indole acetic acid by fluorescent *Pseudomonas* in the presence of L-Tryptophan and rice root exudates. *J. Plant Pathol.* 91: 61-63.
- Katznelson H., Rouatt J.W. et Peterson E.A. (1962).** The rhizosphere effect of mycorrhizal and no mycorrhizal roots of yellow birch seedlings. *Canadian Journal of Botany* 40: 337-382.
- Kaznelson A., Rouatt B.N., Peterson F.A., (1992).** The rhizosphere effect of mycorrhizal root of yellow birch seedlings. *Can. J. Bot.*, 40: 77-382.
- Keneni A., Assefa F. et Prabu P.C. (2010).** Isolation of phosphate solubilizing bacteria from the rhizosphere of *faba bean* of Ethiopia and their abilities on solubilization insoluble phosphates . *J. Agr. Sci. Tech.* 12: 79-89.
- Kennedy A.C. et De Luna L.Z. (2004).** Rhizospher, p. 399-409. *In* Hillel D., Rosenzweig C., Powlson D., Scow K., Singer M., Sparks D. (ed.), *Encyclopedia of soil in the environment*. Vol 03. Columbia University, USA.
- Khalid A., Arshad M. et Zahir Z.A. (2004).** Screening plant growth-promoting rhizobacteria for improving growth and yield of wheat. *J. Appl. Microbiol.*, 96: 473-480(8).
- Khalvati M.A., Hu Y., Mozafar A., Schmidhalter U. (2005).** Quantification of water uptake by arbuscular mycorrhizal hyphae and its significance for leaf growth, water relations, and gas exchange of barley subjected to drought stress. *Plant biology* 7: 706–712.
- Khan A.A., Jilani G., Akhtar M.S., Naqvi S.M.S. and Rasheed M. (2009).** Phosphorus Solubilizing Bacteria: Occurrence, Mechanisms and their role in crop production. *J. agric. biol. sci.* 11: 48-58.
- Kim K.Y. and McDonald G.A. (1998).** Effect of phosphate solubilizing bacteria and vesicular-arbuscular mycorrhizae on tomato growth and soil microbial activity. *Fert. Soils* 26: 79-87.
- King E.D., Ward M.K., Raney D.E., (1954).** Two simple media for the demonstration of pyocyanin and fluorescin. *Journal of Laboratory and Clinical Medicine* 44, 301–7.
- Kloepper J.W. et Schroth M.N. (1978).** Plant growth-promoting rhizobacteria on radishes. *In: Proc Int Conf Plant Pathol Bact Angers*, 379-382.

- Kloepper J.W., Ryu C.M. (2006).** Bacterial endophytes as elicitors of induced systemic resistance. In: Schulz, B., Boyle, C., Siebern, T. (Eds.), *Microbial Root Endophytes. Springer Verlag, Heidelberg*, pp. 33–51.
- Kloepper J.W., Schroth M.N. (1981c).** Relationship of in vitro antibiosis of plant growth promoting rhizobacteria to plant growth and displacement of root microflora. *Phytopathology* 71, 1020-1023.
- Kloepper J.W., Zablowicz R.M., Tipping B., Lifshitz R. (1991).** Plant growth mediated by bacterial rhizosphere colonizers. In: D.L.Keister and B.Gregan (Eds.) *The rhizosphere and plant growth. BARC Symp.* 14, 315-326.
- Kokalis-Burelle N., Dickson D.W. (2003).** Effects of soil fumigants and bioyield tm on root knot nematode incidence and yield of tomato. In: Proc. Int. Res. Conf. Methyl Bromide *Alternatives and Emissions Reductions*, vol. 50, pp. 1-50.
- Kolev N. (1976).** Les cultures maraichères en Algérie. Tome1. Légumes fruits. Ed. Ministère de l’agriculture et des reformes Agricoles : 52p.
- Kumar V. et Narula N. (1999).** Solubilization of inorganic phosphates and growth emergence of wheat as affected by *Azotobacter chroococcum* mutants. *Biol. Fert. Soils*, 28(3): 301-305.
- Laumonier R. (1979).** Culture légumières et maraichère. Tome III. Ed. Baillier, Paris: 279p.
- Le Tacon F. (1985).** Les Mycorhizes : une coopération entre plantes et champignons. La recherche n°166, pp. 624–632.
- Lemanceau P. (1992).** Beneficial effects of rhizobacteria on plants: exemple of fluorescent *Pseudomonas* spp. *Agronomie*, 12: 413-437.
- Lemanceau P., Expert D., Gaymard F., Bakker P.A.H.M. and Briat J.F. (2009).** Role of iron in plant–microbe interactions. *Adv. Bot. Res.* 51: 491-549.
- Leong J. (1986).** Siderophores : the biochemistry and possible role in the biocontrol of plant pathogens: *Annu Rev Phytopathol* 24, 187 – 208.

- Ligon J.M., Hill D.S., Hammer P.E., Torkewitz N.R., Hofmann D., Kempf H.J., Pée K.H.V. (2000).** Natural products with antifungal activity from *Pseudomonas* biocontrol bacteria. *Pest Management Science*, 56(8), 688-695.
- Lindberg G.O. (1981).** An Antibiotic lethal to fungi. *Plant Dis* 65, 680-683.
- Liu A., Hamel C., Hamilton R.I., Ma B.L., Smith D.L. (2000).** Acquisition of Cu, Zn, Mn and Fe by mycorrhizal maize (*Zea mays* L.) grown in soil at different P and micronutrient levels. *Mycorrhiza* 9: 331–336.
- Liu A., Wang B., Hamel C. (2007).** Arbuscular mycorrhiza colonization and development at suboptimal root zone temperature. *Mycorrhiza* 14, 93–101.
- Liu G., Hu X., Sun B., Yang T., Shi J., Zhang L., Zhao Y. (2013).** Phosphatase Wip1 negatively regulates neutrophil development through MAPK-STAT1. *Blood* 121: 519–529.
- Liu X.M., Li Q., Liang W.J. & Jiang Y. (2008).** Distribution of soil enzyme activities and microbial biomass along a latitudinal gradient in farmlands of songliao plain, Northeast China. *Pedosphere* 18(4): 431–440.
- Lockwood J.L. (1981).** Exploitation Competition. In : *the fungal community. Its organization and role in the ecosystem* (DT Wicklow, GC Carrol, eds) M Dekker, Inc, 833 p.
- López-Pedrosa A., González-Guerrero M., Valderas A., Azcón-Aguilar C., Ferrol N. (2006).** GintAMT1 encodes a functional high-affinity ammonium transporter that is expressed in the extraradical mycelium of *Glomus irregularis*. *Fungal genetics and biology : FG & B* 43: 102–10.
- Lucy M., Reed E. et Glick B.R. (2004).** Applications of free living plant growth-promoting rhizobacteria. *Anton. Leeuw. Int. J. G.* 86: 1–25.
- Lugtenberg B. and Kamilova F. (2009).** Plant-growth-promoting rhizobacteria. *Annu. Rev. Microbiol.* 63:541–556.
- Lugtenberg B.J.J., Dekkers L., Bloemberg G.V. (2001).** Molecular determinants of rhizosphere colonization by *Pseudomonas*. *Annu Rev Phytopathol* 39: 461-491.

- Ma Y., Prasad M.N.V., Rajkumar M., Freitas H. (2011).** Plant growth promoting rhizobacteria and endophytes accelerate phytoremediation of metalliferous soils. *Biotechnology advances* 29: 248-258.
- MacMillan J. (2002).** Occurrence of gibberellins in vascular plants, fungi, and bacteria. *J. Plant Growth Regul.* 20, 387-442.
- Malathi P., Viswanathan P., Mohanraj D. and Sunder A.R. (2002).** Compatibility of bio control agents with fungicides against red rot disease of sugarcane. *Sugar Tech.* 4(3): 131-136.
- Maldonado-Mendoza I.E., Dewbre G.R., Harrison M.J., Samuel T., Noble R., Parkway S.N. (2001).** A phosphate transporter gene from the extra-radical mycelium of an arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus irregularis* regulated in response to phosphate in the environment. *Molecular Plant-Microbe Interactions* 14: 1140–1148.
- Marulanda A., Azcón R., Ruiz-Lozano J.M. (2003).** Contribution of six arbuscular mycorrhizal fungal isolates to water uptake by *Lactuca sativa* plants under drought stress. *Physiologia Plantarum* 119: 526–533.
- Matthysse A.G., McMahan S. (1998).** Root colonization by *Agrobacterium tumefaciens* is reduced in cel, attB, attD, and attR mutants. *Appl Environ Microbiol* 64: 2341-2345.
- Mayak S., Tirosh T. et Glick B.R. (2004).** Plant growth- promoting bacteria that confer resistance to water stress in tomato and pepper. *Plant Sci.* 166: 525-530.
- Meddich A., Oihabi A., Abbas Y. and Bizid E. (2000).** Rôles des champignons mycorrhiziens à arbuscules des zones arides dans la résistance du trèfle (*Trifolium alexandrinum*) au déficit hydrique. *Agronomie* 20 : 283-295.
- Messiaen C.M., Blancard D., Rouxel F. et Lfon R. (1993).** Les maladies des plantes maraîchères. 3^{ème} ed. INRA, Paris.
- Meyer J.R. and Linderman R.G. (1986).** Response of subterranean clover to dual-inoculation with vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi and a plant growth-promoting bacterium, *Pseudomonas putida*. *Soil Biol. Biochem.* 18: 185-190.

- Meziane H., Van der Sluis I., Van Loon L.C., Höfte M. et Bakker P.A.H.M. (2005).** Determinants of *Pseudomonas putida* WCS358 involved in inducing systemic resistance in plants. *Mol. Plant Pathol.* 6:177-185.
- Mikanowski L., Mikanowski P. (1999).** Tomate. Paris, edition du chêne-Hachette.192p.
- Mikola P. (1948).** On the physiology and ecology of *Cenococcum graniforme*. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae*, 36: 1-104.
- Miller R.M., Reinhardt D.R., Jastrow J.D. (1995).** External hyphal production of vesicular arbuscular mycorrhizal fungi in pasture and tallgrass prairie communities. *Oecologia* 103: 17–23.
- Mitter N., Srivastava A.C., Renu A.S., Sarbhoy A.K. et Agarwal D.K. (2002).** Characterization of gibberellin producing strains of *Fusarium moniliforme* based on DNA polymorphism. *Mycopathologia* 153:187–193.
- Moller K., Kristensen K., Yohalem D., Larsen J. (2009).** Biological management of gray mold in pot roses by coinoculation of the biocontrol agent *Ulocladium atrum* and the mycorrhizal fungus *Glomus mosseae*. *BiologicalControl* 49: 120–125.
- Monedij A.D., Nyamador W.S., Amevoin K., Adéoti R., Abbey GA., Ketoh G.K. et Glitho I.A. (2015).** Analyse de quelques aspects du système de production légumière et perception des producteurs de l'utilisation d'extraits botaniques dans la gestion des insectes ravageurs des cultures maraichères au Sud du Togo. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 9(1), 98-107.
- Moore E.R.B., Tindall B.J., Martins Dos Santos V.A.P., Pieper D.H., Ramos J.L. et Palleroni N.J. (2006).** Nonmedical: *Pseudomonas*, p.646-703. In M. Dworkin, S. Falkow, E. Rosenberg, K. H. Schleifer, et E. Stackebrandt (ed.), *Prokaryotes*, Springer, USA.
- Morton J.B. and Benny J. (1990).** Revised classification of arbuscular mycorrhizal fungi (Zygomycetes): a new order, Glomales, two new soborders, Glominae and Gigasporinae, and two new families, Acaulosporaceae and Gigasporaceae, with an amediation of Glomaceae. *Mycotaxon*, 37: 471-491.

- Mousain D. (1991).** Ectomycorhization et tolérance des arbres à la sécheresse. Dans : Physiologie des arbres et arbustes en zones arides et semi-arides. Groupe d'Etude de l'Arbre, Ed. John Libbey Eurotext, Paris, pp. 167-174.
- Mukerji K.G., Ciancio A. (2007).** Mycorrhizae in the integrated pest and disease management. In: Ciancio A., Mukerji K.G. (eds) General concepts in integrated pest and disease management. Springer, The Netherlands, pp 245–266.
- Munro D.B., Small E. (1998).** Les legumes du Canada. NRC Research Press.
- Ndiaye F. (2007).** Etude de la solubilité et de la mobilité des ions phosphates à l'interface solide-solution et détermination de leur biodisponibilité au niveau des sols du Sénégal. Rapport de stage.
- Nechadi S., Benddine F., Moumen A., Kheddami M. (2002).** Etat des maladies virales de la tomate et stratégie de lutte en Algérie. *Bulletion OEPP / EPPO Bulletin*, 32, pp. 21-24.
- Nedorost L., Pokluda R. (2012).** Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on tomato yield and nutrient uptake under different fertilization levels, *Acta univ. Agric. Et Silv. Mendel. Brun.*, 21(8): 181- 186.
- Neilands J.B. (1976).** Microbial iron transport compounds (siderochromes). In : *inorganic biochemistry* (GL Eichorn). Elsevier, Amsterdam, 167–202.
- Nezarat S., Gholami A. (2009).** Screening plant growth promoting rhizobacteria for improving seed germination, seedling growth and yield of maize. *Park. J. Biol. Sci.*, 12(1): 26-32.
- Norman M.J.T., Pearson C.J. and Searle P.G.E. (1995).** The Ecology of Tropical Food Crops. Cambridge University Press, Cambridge. 436 p.
- Nwaga D., The C., Ambassa-Kiki R. et al. (2004).** Selection of arbuscular mycorrhizal fungi for inoculating maize and sorghum, grown in oxisol/ultisol and vertisol in Cameroon In Managing nutrient cycles to sustain soil fertility in sub-Saharan Africa, Bationo A (eds), ASP/TSBF Institute of CIAT; Nairobi, Kenya, pp 467-486.
- O'Sullivan D.J. et O'Gara F. (1992).** Traits of fluorescent *Pseudomonas* spp. involved in suppression of plant root pathogens. *Microbiol. Rev.* 56: 662-676.

- Oehl F., Alves da Silva G., Goto B.T., Costa Maia L., Sieverding E. (2011).** Glomeromycota: two new classes and a new order. *Mycotaxon* 116: 365–379.
- Oihabi A., Perrin R. and Marty F. (1993).** Effets des endomycorhizes VA sur la croissance et la nutrition du palmier dattier. *Rev. Rés. Amelio. Prod. Agr. Milieu aride*, 5: pp. 1-9.
- Okon Y. (1985). *Azospirillum* as a potential inoculant for agriculture. *Trends Biotechnol* 3, 223 – 228.
- Oliveira E., Sieverding E., Toros (1987).** Interaction between three species of VAM fungi and an isolate of *Pseudomonas putida* on cassava. In: *Proc 7th North Am Conf Mycorrhizae* (DM Sylvia, LL Hung, JH Graham, eds) Univ Florida, Gainesville, FL 216.
- Ongena M., Jacques P.H. Tsvekove V.T. (2013).** Compatibility of azoxystrobin 25 SC with biocontrol agents. *Eur. J Plant Pathol.* 108: 429-441.
- Öpik, M., Zobel M., Cantero J.J., Davison J., Facelli J.M., Hiiesalu I., Jairus T., Kalwij J.M., Koorem K., Leal M.E., Liira J., Metsis M., Neshataeva V., Paal J., Phosri C., Põlme S., Reier Ü., Saks Ü., Schimann H., Thiéry O., Vasar M., Moora M. (2013).** Global sampling of plant roots expands the described molecular diversity of arbuscular mycorrhizal fungi. *Mycorrhiza* 23, 411–430.
- Palleroni N.J. and Moore E.R.B. (2004).** Taxonomy of pseudomonads: experimental approaches. In "Pseudomonas", vol. 1. Ramos J.L. (Eds). Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, Etats-Unis, pp. 3-44.
- PAN. (2006).** Document d'information sur la gestion des pesticides au Sénégal. Pesticide Action Network Africa, Dakar.
- Patten C.L. et Glick B.R. (2002).** Role of *Pseudomonas putida* indolacetic acid in development of host plant root system. *Appl. Environ. Microbiol.* 68: 3795-3801.
- Peacock A.D., Mueen M.D., Ringelberg D.R, Tyler D.D., Hedrick D.R, Gale P.M. & White D.C. (2000).** Soil microbial community responses to dairy manure or ammonium nitrate applications. *Soil Biology and Biochemistry*, 33 (7-8): pp. 1011-1019.

- Pellegrino E., Bedini S., Avio L., Bonari E. and Giovannetti M. (2011).** Field inoculation effectiveness of native and exotic arbuscular mycorrhizal fungi in a Mediterranean agricultural soil. *Journal of Soil and Biochemistry*, vol. 43, p. 367-376.
- Peres De Carvalho M.P., Turck P., Abraham W.R. (2015).** « Secondary metabolites control the associated bacterial communities of saprophytic basidiomycotina fungi ». *Microbes and Environments* 30 (2): 196–198.
- Péron J.Y. (2006).** Références Production Légumière 2ème édition. Paris, Lavoisier. 613.
- Peyronnel B., Fassi B., Fontana A., Trappe J.M. (1969).** Terminology of Mycorrhizae. *Mycologia*, 61: 410-411.
- Phillips J.M., Hayman D.S. (1970).** Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular- arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection, *Trans. Brit. Mycol. Soc.* 55: 158–161.
- Piano S., Neyrotti V., Migheli Q. et Gullino M.L. (1997).** Biocontrol capability of *Metschnikowia pulcherrima* against *Botrytis* postharvest rot of apple. *Postharvest Biol. Technol.* 11(3): 131-140.
- Ping L. et Boland W. (2004).** Signals from the underground: bacterial volatiles promote growth in *Arabidopsis*. *Trends Plant Sci.* 9: 263-266.
- Polese K.M. (2007).** La culture de tomate. Ed. Artémis : 95p.
- Pozo M.J., Verhage A., García-andrade J., García J.M., Azcón-aguilar C. (2009).** Priming plant defence against pathogens by arbuscular mycorrhizal fungi, in: Azcón-Aguilar C., Barea J., Gianinazzi S., Gianinazzi-Pearson V. (Eds.) *Mycorrhizas: functional processes and ecological impact*, Springer-Verlag, Germany, Chapitre 9, pp. 123 – 135.
- Probanza A. et Lucas Garcia J.A. (2002).** Pinus pineal seedling growth and bacterial rhizosphere structure after inoculation with PGPR *Bacillus*. *Applied Soil Ecology*, 20: 75-84.
- Pujic P. et Normand P. (2009).** La symbiose racinaire entre la bactérie *Frankia* et les plantes actinorhiziennes. *Biofutur*. 298 : 26 – 29.

- Pumplin N., Zhang X., Noar R., Harrison M. (2012).** Polar localization of a symbiosis-specific phosphate transporter is mediated by a transient reorientation of secretion. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 109: 665–672.
- Rajkumar M., Ae N., Prasad MNV., Freitas H. (2010).** Potential of siderophore-producing bacteria for improving heavy metal phytoextraction. *Trends in Biotechnology*, 28: 142-149.
- Ramade F. (1992).** Précis d'écotoxicologie. *Ed. Masson*, France, 302 p.
- Ramamoorthy V., Viswanathan R., Raguchander T., Prakasam V., Samiyappan R., (2000).** Induction of systemic resistance by plant growth promoting rhizobacteria in cropplants against pests and diseases. *Crop Protection*, 20 : 1-11.
- Ramette A., Frapolli M., Saux M.F.L., Gruffaz C., Meyer J.M., Défago G., Moënnelocoz Y. (2011).** *Pseudomonas protegens* sp. nov., widespread plant-protecting bacteria producing the biocontrol compounds 2, 4-diacetylphloroglucinol and pyoluteorin. *Systematic and applied microbiology*, 34 (3): 180-188.
- Ramos Solano B., Barriuso Maicas J., Pereyra de la Iglesia M.T., Domenech J. et Gutiérrez Mañero F.J. (2008b).** Systemic disease protection elicited by plant growth promoting rhizobacteria strains: relationship between metabolic responses, systemic disease protection, and biotic elicitors. *Phytopatology*. 98: 451-457.
- Redecker D., Schüßler A., Stockinger H., Stürmer S.L., Morton J.B., Walker C. (2013).** An evidence-based consensus for the classification of arbuscular mycorrhizal fungi (Glomeromycota). *Mycorrhiza* 23: 515–531.
- Regnault-Roger C. (2005).** Enjeux phytosanitaires pour l'agriculture et l'environnement. *Ed : Tek & Doc*. 1013p.
- Renaud V. (2003).** Tomate. Tous les légumes courants, rares ou méconnus cultivables sous nos climats. *Ulmer*. Paris, Ulmer: 135-137.
- Rick C.M. (1973).** Potential genetic resources in tomato species: Clues from observations in native habitats. *Genes, Enzymes, and Populations*. Plenum Press, New York, pp 255-269.

- Rillig M.C. and Steinberg P.D. (2002).** Glomalin production by an arbuscular mycorrhizal fungus: a mechanism of habitat modification? *Soil Biology and Biochemistry* 34: 1371–1374.
- Rosas S.B., Pastor N.A., Guiñazú L.B., Andrés J.A., Carlier E., Vogt V., Rovera M. (2011).** Efficacy of *Pseudomonas chlororaphis* subsp. *aurantiaca* SR1 for Improving Productivity of Several Crops. *Crop Production Technologies*, 978953307787-1, *InTech*, 199-210.
- Ruíz-Sánchez M., Aroca R., Mufioz Y., Polon R., Ruiz-Lozano J.M. (2010).** The arbuscular mycorrhizal symbiosis enhances the photosynthetic efficiency and the antioxidative response of rice plants subjected to drought stress. *Journal of plant physiology* 167: 862– 869.
- Saad D. (2009).** Etudes des endomycorhizes de la variété Sigoise d’olivier (*Olea europea* L.) et essai de leur application à des boutures semi-ligneuses multipliées sous nébulisation. Mémoire de Magister en Biotechnologie, Univ. Oran, 124 p.
- Sahin F., Cakmakci R. et Kantar F. (2004).** Sugar beet and barley yields in relation to inoculation with N₂-fixing and phosphate solubilizing bacteria. *Plant Soil*, 265: 123–129.
- Sainz M.J., González-Penalta B. & Vilarriño, A. (2006).** Effects of hexachlorocyclohexane on rhizosphere fungal propagules and root colonization by arbuscular mycorrhizal fungi in *Plantago lanceolata*. *European Journal of Soil Science*. 57, 83–90.
- Salisbury F.B. (1994).** The role of plant hormones. Marcel Dekker, (ed.). New York, USA.
- Sall M. (2015).** Les exploitations agricoles familiales face aux risques agricoles et climatiques: stratégies développées et assurances agricoles. Thèse de Doctorat, Université de Toulouse. 279 p.
- Samia M.M. (2012).** Localisation des déterminants de la suppression de quelques souches de *Pseudomonas* isolées de la rhizosphère de la pomme de terre. Thèse de doctorat en sciences, Université Ferhat Abbas de Sétif 1, Algérie.

- Santhi A., Sivakumar V. (1995).** Biocontrol potential of *Pseudomonas yuorescens* (Migula) against root-knot nematode, *Meloidogyne incognita* (Kofoid and White, 1919 ; Chitwood, 1949) on tomato. *J. Biol. Control*, 9: 113-115.
- Satrani B., El Ouadihi N., Guedira A., Frey-Klett P., Arahou M., Garbaye J. (2009).** Effet de la bactérisation des graines sur la croissance des plants de *Cedrus atlantica* Manetti. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 13(3), 367-372.
- Sawadogo V.R. (2016).** Pratiques paysannes d'utilisation des pesticides en cultures maraichères et leurs effets induits dans la Vallée du Sourou : Cas du périmètre de Di. Université Polytechnique De Bobo-Dioulasso (U.P.B). 45p.
- Saxena A.K., Shende R. and Grover M., (2006).** Interactions among beneficial microorganisms. In Soil Biology, Volume 7, Microbial activity in the rhizosphere by Mukerji K.G., Manoharachary C. and Singh J. (eds.). *Springer-Verlag Berlin Heidelberg* : 121-137.
- Schreiner R.P. and Bethlenfalvay G.J. (1995).** Mycorrhizal interactions in sustainable agriculture. *Critical Reviews in Biotechnology* 15: 271–285.
- Schüßler A., Schwarzott D., Walker C. (2001).** A new fungal phylum, the *Glomeromycota*: phylogeny and evolution. *Mycological Research* 105: 1413–1421.
- Schweiger P., Jakobsen I. (1998).** Dose-response relationships between four pesticides and phosphorus uptake by hyphae of arbuscular mycorrhizae. *Soil Biology and Biochemistry*, 30, 1415-1422.
- Scotland R.W. and Wortley A.H. (2003).** How many species of seed plants are there? *Taxon*, 52: 101-104.
- Seng P., Drancourt M., Gouriet F., La Scola B., Fournier P.E., Rolain J.M., Raoult D. (2009).** Ongoing revolution in bacteriology: routine identification of bacteria by matrix-assisted laser desorption ionization time-of-flight mass spectrometry. *Clin Infect Dis.* 49(4): 543 - 551.
- Shankara N., Van Lidt de Jeude J., De Goffau M., Van Dam B. (2005).** La culture de la tomate production, transformation et commercialisation. Agromisa Foundation, Wageningen. 105 p.

- Sharma K., Dak G., Agrawal A., Bhatnagar M. et Sharma R. (2007).** Effect of phosphate solubilizing bacteria on the germination of *Cicer arietinum* seed sand seedling growth. *J. Herb. Med. Toxicol.*, 1: 61-63.
- Sharma M.P. and Adholeya A. (2000).** Sustainable management of arbuscular mycorrhizal fungi in the biocontrol of soil-borne plant diseases. In: Upadhyay R.K., Mukerji K.G., Chamola B.P. (eds) Biocontrol potential and its exploitation in sustainable agriculture. Vol. I. Crop diseases. Kluwer/Plenum, New York, pp 117–138.
- Sharma N., Yadav K., Aggarwal A. (2016).** Growth response of two *Phaseolus mungo* L. cultivars induced by arbuscular mycorrhizal fungi and *Trichoderma viride*. *International Journal of Agronomy* ID p.1-6.
- Shivakumar B. (2007).** Biocontrol potential and plant growth promotional activity of fluorescent pseudomonads of western ghats. Master of Science (Agriculture). In *Agricultural Microbiology*.
- Siasou E., Standing D., Killham K. and Johnson D. (2009).** Mycorrhizal fungi increase biocontrol potential of *Pseudomonas fluorescens*. *Soil Biology & Biochemistry* 41: 1341 1343.
- Siddiqui I.A., Shaukat S.S., Ehteshamul-Haque S. et Khan S.A.J. (2000).** Effect of systemic fungicides on the efficacy of *Pseudomonas aeruginosa* (Schroeter) migula in the control of root-infecting fungi of wheat. *Acta Agrobotanica*. Vol 53: 39 – 46.
- Simon L., Bousquet J., Levesque R.C. and Lafonde M. (1993).** Origin and diversification of endomycorrhizal fungi and coincidence with vascular land plants. *Nature*, 363 : 67-69.
- Singh G. and Wright D. (2002).** *In vitro* studies on the effects of herbicides on the growth of rhizobia. *Lett. Applied Microbiol.*, 35: 12-16.
- Smith R.S. (1995).** Inoculant formulations and applications to meet changing needs. In Nitrogen fixation: fundamentals and applications ed. Tikhinivich I.A., Provorov N.A., Romanov V.I., Newton W.E. 635-657.
- Smith S.E. and Read D.J. (1997).** Mycorrhizal symbiosis. Academic Press. San Diego, USA.

- Smith S.E. et Read D.J. (2008).** Mycorrhizal symbiosis. 3e ed. New-York: Academic press is an imprint of *Elsevier*. 507p.
- Smith S.E., Smith F.A., Jakobsen I. (2003).** Mycorrhizal fungi can dominate phosphate supply to plants irrespective of growth responses. *Plant Physiology* 133: 16–20.
- Souna F., Chafi A., Chakroune K., Himri I., Bouakka M., Hakkou A., (2010).** Effect of mycorrhization and compost on the growth and the protection of date palm (*Phoenix dactylifera* L.) against Bayoud disease. *American-Eurasian Journal of Sustainable Agriculture*, 4(2): 260-267.
- Spaepen S., Vanderleyden J. et Remans R. (2007).** Indole-3-acetic acid in microbial and microorganism-plant signalling. *FEMS Microbiol. Rev.*, 31(4): 425-448.
- Strullu D.G. (1991).** Les mycorhizes des arbres et des plantes cultivées. *Techniques et Documentation Lavoisier. Paris* ; 242 p.
- Suslow T.V. (1982).** Role of Root-colonizing bacteria in plant growth. Phytopathogenic prokaryotes (1). M.S. Mount and G. Lacy, eds. Academic press, New York: 187-223.
- Sutra L., Rise Ade J.M. and Gardan L. (2000).** Isolation of fluorescent pseudomonads from the rhizosphere of banana plants antagonistic towards root necrosing fungi. *Lett. Appl. Microbiol.* 31: 289-293.
- Tanaka Y., Yano K. (2005).** Nitrogen delivery to maize via mycorrhizal hyphae depends on the form of N supplied. *Plant, Cell and Environment* 28: 1247–1254.
- Taylor I.B., Atherton J.G., Rudich J. (1986).** Biosystematics of the tomato. The tomato crop: A scientific basis of improvement. Chapman & Hall, London, pp 1-34.
- Tedersoo L., May T.W. and Smith M.E. (2010).** Ectomycorrhizal lifestyle in fungi: global diversity, distribution and evolution of phylogenetic lineages. *Mycorrhiza*, 20: 217-263.
- Thiam A. et Sagna M.B. (2009).** Monitoring des pesticides au niveau des communautés à la base. Rapport régional Afrique. PAN Africa, Dakar, Senegal.
- Tian C., Kasiborski B., Koul R., Lammers P.J., Bucking H., Shachar-Hill Y. (2010).** Regulation of the nitrogen transfer pathway in the arbuscular mycorrhizal symbiosis:

- gene characterization and the coordination of expression with nitrogen flux. *Plant Physiology* 153: 1175–1187.
- Tilak K.V.B.R., Ranganayaki N., Pal K.K., De R., Saxena A.K., Nautiyal C.S., Shilpi Mittal, Tripathi A.K., et Johri B.N. (2005).** Diversity of plant growth and soil health supporting bacteria. *Curr. Sci.* 89: 136-150.
- Tisdall J.M. (1991).** Fungal hyphae and structural stability of soil. *Aust. J. Soil Res.*, 29: 729-743.
- Tisdall J.M. (1994).** Possible role of soil microorganisms in aggregation in soils. *Plant and Soil* 159: 115–121.
- Tisserant E., Kohler A., Dozolme-Seddas P., Balestrini R., Benabdellah K., Martin F. (2012).** The transcriptome of the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus intraradices* (DAOM 197198) reveals functional tradeoffs in an obligate symbiont. *New Phytol* 193: 755–769.
- Toe A.M., Domo Y., Hema O.S., Guissou J.P. (2000).** Epidémiologie des intoxications aux pesticides et activité cholinestérasique sérique chez les producteurs de coton de la zone cotonnière de la Boucle du Mouhoun. *In Etudes et Recherches Sahéliennes* numéro 4-5 Janvier-Décembre, numéro spécial. Les pesticides au Sahel. Utilisation, Impact et Alternatives, pp39-48.
- Toe A.M., Kinané M.L., Koné S., Sanfo -Boyrn E. (2004).** Le non-respect des bonnes pratiques agricoles dans l'utilisation de l'Endosulfan comme insecticide en culture cotonnière au Burkina Faso: quelques conséquences pour la santé humaine et l'environnement. *In Revue Africaine de Santé et de Productions Animales*, vol. 2, N°3-4, 275-280.
- Toljander J.F., Lindahl B.D., Paul LR, Malin E., Finlay R.D. (2007).** Influence of arbuscular mycorrhizal mycelial exudates on soil bacterial growth and community structure. *FEMS Microbiol Ecol* 61 : 295-304.
- Tomashow L.S. (1996).** Biological control of plant pathogens. *Curr. Opin. Biotech.*, 77, pp. 343-347.

- Topan S.M. (2005).** Contribution à l'étude de la dégradation des pesticides dans les sols au Burkina Faso. Mémoire d'ingénieur option agronomique, IDRIUPB, Bobo Dioulasso, 86p.
- Tripathi J., Tiwari P., Ekka S. R. (2011).** In Vitro Study of *Pseudomonas* spp. Isolated from Soil. *Journal of Phytology*, 3(4): 21-22.
- Trouvelot A., Kough J.L., Gianinazzi-Pearson V. (1986).** Mesure du taux de mycorhization VA d'un système racinaire : Recherche de méthodes d'estimation ayant une signification fonctionnelle, in : Gianinazzi S. (Ed.), Les mycorhizes : Physiologie et Génétique, 1^{er} Séminaire Européen sur les mycorhizes, Dijon, INRA, Paris, pp. 217–221.
- Tsakelova EA., Klimova S.Y., Cherdyntseva T.A. et Netrusov A.I. (2006).** Microbial producers of plant growth stimulators and their practical use: a review. *Appl. Biochem. Microbiol.* 42: 117–126.
- Twanabasu B.R., Stevens K.J. & Venables B.J. (2013).** The effects of triclosan on spore germination and hyphal growth of the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus intraradices*. *Science of The Total Environment*. 454–455, 51–60.
- Uphoff N., Ball A.S., Fernanades E., Herren H., Husson O., Laing M., Palm C., Sanchez P., Sangiga N. et Thies J. (2006).** Biological approaches to sustainable soils systems. CRC Press. 764 p.
- Usharani G., Sujitha S., Sivasakthi S., Saranraj P. (2014).** Effect of arbuscular Mycorrhizal (AM) fungi (*Glomus fasciculatum* L.) for the improvement of growth and yield of maize (*Zea mays* L.). *Central European Journal of Experimental Biology* 3(2): 30-35.
- Van der Heijden M.G.A., Klironomos J.N., Ursic M., Moutoglis P., Streitwolf-Engel R., Boller T., Wiemken A. et Sanders I.R. (1998a).** Mycorrhizal fungal diversity determines plant biodiversity, ecosystem variability and productivity. *Nature*, 396, 69–72.
- Van Loon L.C. (2007).** Plant responses to plant growth-promoting rhizobacteria. *Eur. J. Plant Pathol.* 119: 243-254.

- Vansuyt G., Souche G., Straczek A., Briat J.F. and Jaillard B. (2003).** Flux of protons released by wild type and ferritin over-expressor tobacco plants: effect of phosphorus and iron nutrition. *Plant Phys. Biochem.* 41: 27-33.
- Vessey K.J. (2003).** Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant Soil.* 255: 571-586.
- Vidhyasekaran P., Sethuraman K., Rajappan K., Vasumathi K. (1997).** Powder formulations of *Pseudomonas fluorescens* to control pigeonpea wilt. *Bio. Control.* (8): 166 – 171.
- Vidyasekharan P., Kamala N., Ramanathan N., Rajappan K., Paranidharan V. and Velazhahan R. (2001).** Induction of systemic resistance by *Pseudomonas fluorescens* Pfl against *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae* in rice leaves. *Phytoparasitica*, 29: 1-12.
- Viswanathan R., Samiyappan R. (1999).** Induction of systemic resistance by plant growth promoting rhizobacteria against red rot disease caused by *Collectotrichum falcatum* went in sugarcane. Proceedings of Sugar Technology Association of India, 61: 24-39.
- Vivas A., Barea J.M., Azcon R. (2005).** *Brevibacillus brevis* isolated from Cadmium- or Zinc- contaminated soils improves in vitro spore germination and growth of *Glomus mosseae* under high Cd or Zn concentrations. *Microbiol Ecol.*, 49: 416-424.
- Vivas A., Voros I., Biro B., Barea J.M., Ruiz-Lozano J.M., Azcon R. (2003).** Beneficial effects of indigenous Cd-tolerant and Cd-sensitive *Glomus mosseae* associated with a Cd-adapted strain of *Brevibacillus* sp. In improving plant tolerance to Cd contamination. *Appl. Soil Ecol.*, 24: 777-786.
- Von Alten H., Linderman A., Schonbeck F. (1993).** Stimulation of arbuscular mycorrhizae by fungicide or rhizosphere bacteria, *Mycorrhiza*, 2, 167-173.
- Wang S., Feng Z. & Wang X. (2006).** Effects of environmental pollutants on arbuscular mycorrhiza formation and function. *Ying Yong Sheng Tai Xue Bao.* 17, 1321–1325.
- Wang X., Li X. (2013).** An overview of the updated classification system and species diversity of arbuscular mycorrhizal fungi. *Acta Ecologica Sinica Volume* 33: 834–843.
- Warnock S.J. (1988).** A review of taxonomy and phylogeny of the genus *Lycopersicon*. *Hortscience* 23: 669-673.

- Weber J., Ducouso M., Tham F.Y., Nourissier-Mountou S., Galiana A., Prin Y. & Lee S.K. (2005).** Co-inoculation of *Acacia mangium* with *Glomus intraradices* and *Bradyrhizobium* sp. in aeroponic culture. *Biology and Fertility of Soils*, 41: 233-239.
- Wehner J., Antunes P.M., Powell J.R., Mazukatow J., Rillig M.C. (2010).** Plant pathogen protection by arbuscular mycorrhizas: a role for fungal diversity? *Pedologia* 53: 197–201.
- Wei G., Kloepper J.W., Tuzun S. (1991).** Induction of systemic resistance of cucumber to *Colletotrichum orbiculare* by select strains of plant growth-promoting rhizobacteria. *Phytopathology*, 81(11), 1508-1512.
- Weller D.M., Raaijmakers J.M., McSpadden-Gardener B.B. and Thomashow L.S. (2002).** Microbial populations responsible for specific soil suppressiveness to plant pathogens. *Annu. Rev. Phytopathol.* 40: 309–348.
- Weyens N., Monchy S., Vangronsveld J., Taghavi S. et Vander Lelie D. (2010).** Plant-Microbe Partnerships, p. 254-2564 .In K.N. Timmis (ed.), Handbook of hydrocarbon and lipid microbiology, *Springer-Verlag*, Berlin Heidelberg.
- Whipps J.M. (2001).** Microbial interactions and biocontrol in the rhizosphere. In *Journal of Experimental Botany* 52: 487–511.
- Whipps J.M. (2004).** Prospects and limitations for mycorrhizas in biocontrol of root pathogens. *Can J Bot* 82: 1198–1227.
- Whitelaw M.A. (2000).** Growth promotion of plants inoculated with phosphate-solubilizing fungi. *Adv. Agron.* 69: 99–151.
- Williams T.L., Andrzejewski D., Lay J.O., Musser S.M. (2003).** Experimental factors affecting the quality and reproducibility of MALDI TOF mass spectra obtained from whole bacteria cells. *J. Am. Soc. Mass Spectrom.* 14: 342–351.
- Wright S.F. and Upadhyaya A. (1998).** A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant and Soil* 198: 97–107.

- Younes A. (2014).** Microorganismes de la rhizosphère des Tétracélinées : un outil pour optimiser la régénération assistée du *Tetracelinis articulata* Vahl. Thèse de doctorat, Université Mohammed V. 157 p.
- Zahir Z.A., Arshad M. et Frankenberger W.T. (2004).** Plant growth promoting rhizobacteria: applications and perspectives in agriculture. *Adv. Agron.*, 81, 97-168.
- Zeck W.M. (1971).** A rating scheme for field evaluation of root-knot nematode infestations. *Pflanzen-Nachricht. Bayer Ag.*, 24: 141 - 144.
- Zehnder G.W., Yao C., Wei G. and Kloepper J.W. (2000).** Influence of methyl bromide fumigation on microbe-induced resistance in cucumber. *Biocont. Sci. Technol.*, 10: 687-693.
- Zhang X.H., Zhu Y.G., Lin A.J., Chen B.D., Smith S.E., Smith F.A. (2006).** Arbuscular mycorrhizal fungi can alleviate the adverse effects of chlorothalonil on *Oryza sativa* L. *Chemosphere* 64 (10): 1627-1632.
- Zhu H. et Yao Q. (2004).** Localized and systemic increase of phenols in tomato roots induced by *Glomus versiforme* inhibits *Ralstonia solanacearum*. *J. Phytopathology*, 152: 537-542.
- Zocco D., Aarle I.M.V., Oger E., Lanfranco L. & Declerck, S. (2011).** Fenpropimorph and fenhexamid impact phosphorus translocation by arbuscular mycorrhizal fungi. *Mycorrhiza*. 21, 363–374.
- Zocco D., Fontaine J., Lozanova E., Renard L., Bivort C., Durand R., Grandmougin-Ferjani A., Declerck S. (2008).** Effects of two sterol biosynthesis inhibitor fungicides (fenpropimorph and fenhexamid) on the development of an arbuscular mycorrhizal fungus. *Mycological Research*, 112, 592-601.
- Zougari-Elwedi B., Sanaa M., Labidi S. et Sahraoui A.L.H. (2012).** Évaluation de l'impact de la mycorrhization arbusculaire sur la nutrition minérale des plantules de palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L. var. Deglet Nour). *Étude et Gestion des sols*. 19: 193-202.

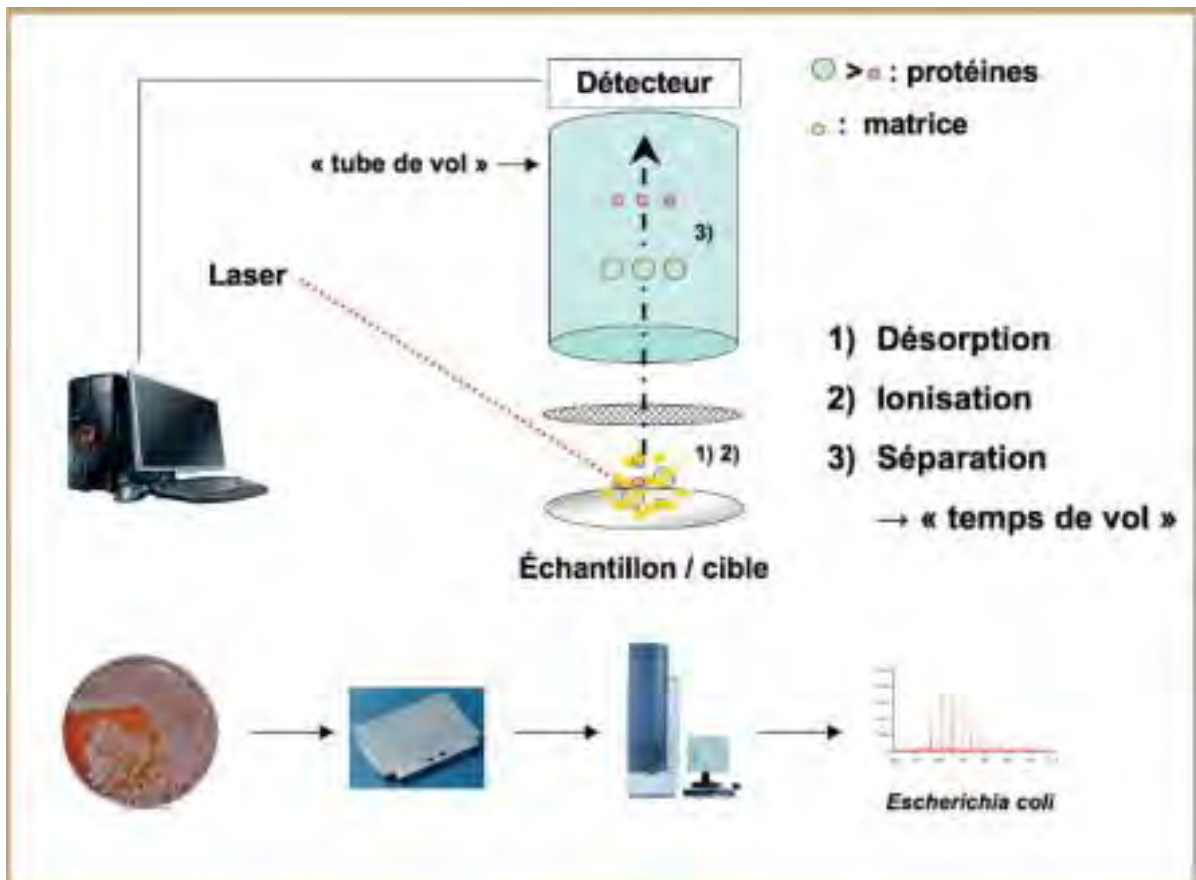
ANNEXES

Annexes

Annexe 1: Annexe 1 : Milieu King B (King et al., 1954)

Protéose peptone	20g
K ₂ HPO ₄	1,5g
MgSO ₄ ,7H ₂ O	1,5g
Glycérol	10ml
Agar	20g
Eau distillée	1L
Ph	7 ± 0,2

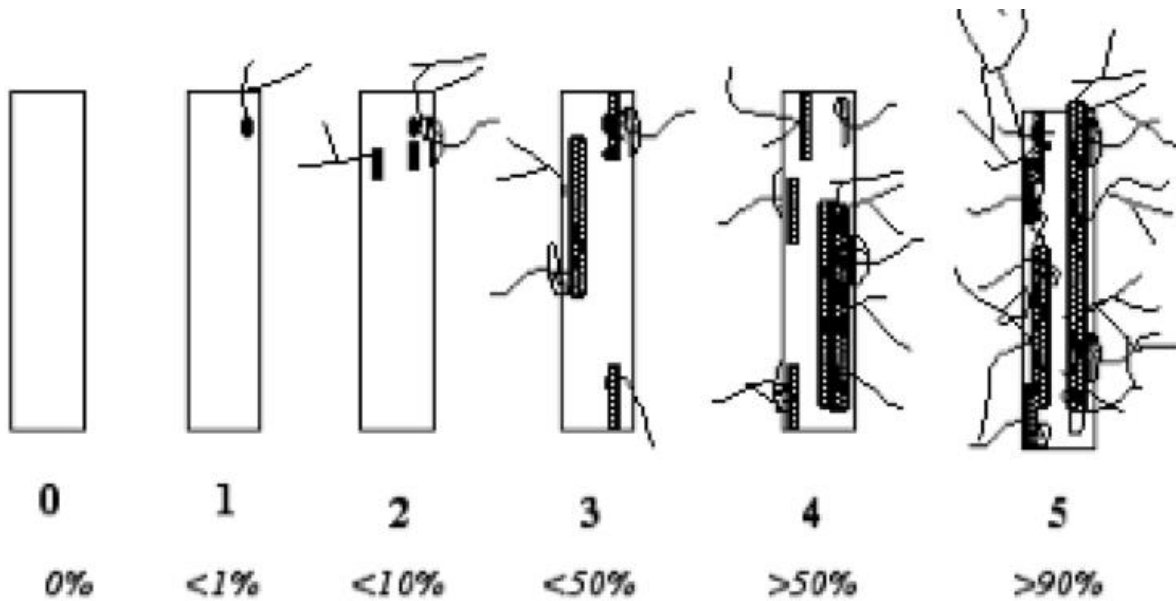
Annexe 2 : Principe MALDI-TOF



Annexe 3 : Solution minérale de Long Ashton (Hewitt, 1966)

Macroéléments	mg/l
KNO ₃	400
K ₂ SO ₄	350
Ca (NO ₃), 4H ₂ O	900
NaH ₂ PO ₄ , H ₂ O	200
MgSO ₄ , 7H ₂ O	500
Oligoéléments	
MnSO ₄	2,5
CuSO ₄ , 7H ₂ O	0,25
ZnSO ₄ , 7H ₂ O	0,3
H ₃ BO ₃	3,0
Nacl	5,0
(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ ,4H ₂ O	5ml/100L
EDTA-Fe (13%)(11g/l)	4ml

Annexe 4 : Notation de l'infection mycorhizienne (classe 0 à classe 5) selon Trouvelot et al. (1986)



La fréquence de mycorhization (F) :

$$F (\%) = (N - n_0) / N \times 100$$












Avec N = nombre de fragments observés et n_0 = nombre de fragments sans trace de mycorhization.

L'intensité de colonisation (M) :

$$M\% = [(95 \times n_5) + (70 \times n_4) + (30 \times n_3) + (5 \times n_2 + n_1)] / N$$

où n_5, n_4, \dots, n_1 sont les nombres de fragments notés 5, 4, ..., 1 respectivement ; classe 5 : plus de 91 %, classe 4 : de 51 à 90 %, classe 3 : de 11 à 50 %, classe 2 : moins de 10 %, classe 1 : trace et classe 0 : pas de mycorhization.

Annexe 5 : Notation : Echelle de Zeck, 1971

 <p>0</p>	<p>0 : Système racinaire complet et sain. Pas d'infestation.</p>	 <p>6</p>	<p>6 : 50 % du système racinaire comporte d galles et ne fonctionne plus.</p>
 <p>1</p>	<p>1 : Très peu de petites galles peuvent être détectées après examen.</p> <p>5%</p>	 <p>7</p>	<p>7 : 75 % du système racinaire comporte des galles fonctionne plus. Pertes de rendement</p>
 <p>2</p>	<p>2 : De petites galles plus nombreuses et facilement détectables</p> <p>10%</p>	 <p>8</p>	<p>8 : Les racines sont couvertes de galles, le plant n'a plus de nourriture</p> <p>30%</p>
 <p>3</p>	<p>3 : Nombreuses petites galles, quelques galles moyennes.</p> <p>15%</p>	 <p>9</p>	<p>9 : Le système racinaire meure. La plante est en train mourir</p> <p>35%</p>
 <p>4</p>	<p>4 : Nombreuses petites galles, quelques grosses galles, le majorité du système racinaire fonctionne encore.</p> <p>20%</p>	 <p>10</p>	<p>10 : Plante et racines sont mortes. Disparition du système racinaire.</p> <p>100%</p>
 <p>5</p>	<p>5 : 25 % du système racinaire comporte des galles et ne fonctionne plus</p>		

PUBLICATIONS ET COMMUNICATION

**Study of the Effect of *Pseudomonas Putida* and
Funneliformis Mosseae on the Growth and
Productivity of Tomato (*Solanum
Lycopersicum* L.) In Senegal**

Diaw Demba,

Gueye Ndiogou,

Sare Idy Carras,

Dangue Adiouma,

Diop Tahir Abdoulaye,

Laboratoire de Biotechnologies des Champignons, Département de Biologie Végétale, Faculté
des Sciences & Techniques, Université Cheikh Anta Diop, Dakar Fann, Sénégal

Doi: 10.19044/esj.2019.v15n6p380 URL: <http://dx.doi.org/10.19044/esj.2019.v15n6p380>

Abstract:

In Senegal, the Niayes zone plays an important role in the economy of the country. It is the main horticultural production area. Among the crops cultivated, tomato (*Solanum lycopersicum* L.) is the second place of horticultural crops. However, this crop is confronted with biotic and abiotic constraints leading to lower yields. Thus, the objective of this study is to evaluate the impact of beneficial microorganisms such as rhizobacteria from the group of fluorescent *Pseudomonas* (*Pseudomonas putida*) and arbuscular mycorrhizal fungi (*Funneliformis mosseae*) on the productivity of tomatoes. Soil samples were taken from the rhizosphere of tomato plants. The bacterial strains were isolated by the method of suspensions dilutions, and then seeded on King B medium. Their identification was carried out by using the MALDI TOF mass spectrometer. In order to evaluate the effect of these microorganisms on productivity, an experiment was conducted in the field for three months. An experimental device with three randomized blocks was adopted with four block treatments: T (control), PS1 (*Pseudomonas putida*), Fm (*Funneliformis mosseae*) and PS1 + Fm. The results obtained showed that the inoculation of tomato plants with PS1 or in combination with Fm induced the best yields with values exceeding respectively 5 t / ha and 1.5 t / ha compared with non-inoculated plants. The yield reductions observed in the case of co-inoculation between Fm and PS1 compared with PS1 treatment alone would suggest an antagonistic effect. These strains of *Pseudomonas putida* constitute an alternative for the increase of tomato productivity in the Niayes zone.

Keywords: Inoculation, microorganisms, productivity, tomato



Available online at <http://www.ifgdg.org>

Int. J. Biol. Chem. Sci. 12(4): 1914-1919, August 2018

ISSN 1997-342X (Online), ISSN 1991-8631 (Print)

**International Journal
of Biological and
Chemical Sciences**

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

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

Effet de la salinité sur la densité des isolats de *Pseudomonas* spp fluorescents de rhizosphère de plants de tomate, d'aubergine et d'oignon au Sénégal

Demba DIAW*, Mame Arama FALL-NDIAYE, Oubeidillah YOUSOUFA ALI,
Idy Carras SARE et Tahir Abdoulaye DIOP

*Laboratoire de Biotechnologies des Champignons, Département de Biologie Végétale,
Faculté des Sciences & Techniques, Université Cheikh Anta Diop, BP 5005, Dakar Fann, Sénégal.*

**Auteur correspondant, E-mail: dembadiaw2001@yahoo.fr ; Tel.: +221775318237*

RESUME

Parmi les microorganismes de la rhizosphère, figurent les *Pseudomonas* spp fluorescents qui sont des bactéries d'intérêt agricole (Plant Growth Promoting Rhizobacteria). Ces *Pseudomonas* pourraient permettre le développement de certaines plantes des sols salés et jouer ainsi un rôle important dans la réhabilitation de ces sols au Sénégal. Ainsi l'objectif de cette étude est d'évaluer l'effet de différentes concentrations de NaCl sur la croissance de *Pseudomonas* spp fluorescents. Des prélèvements de sol ont été effectués au niveau de la rhizosphère de trois spéculations (oignon, aubergine, tomate) et sur sol nu. Les souches ont été isolées par la méthode des suspensions dilutions, puis ensemencées sur milieu King B. L'identification des isolats a été effectuée par observation sur table UV. Trois isolats ont été sélectionnés et purifiés sur milieu King B pour chaque échantillon de sol. Afin d'évaluer l'effet de la salinité sur ces souches, les concentrations suivantes ont été appliquées : 0 M ; 0,17 M ; 0,34 M ; 0,51 M ; 0,70 M ; 0,85 M et 1,03 M. Les résultats obtenus après 72 h d'incubation montrent que les souches se développent pour des concentrations en NaCl allant de 0 M à 0,51 M. Les concentrations supérieures entraînent une réduction du nombre de colonies pour tous les isolats. Il existe un seuil de tolérance au sel pour chaque souche de *Pseudomonas*. Cependant, les souches isolées de la rhizosphère de plants d'oignon sont plus résistantes au sel par rapport aux isolats des rhizosphères de plants de tomate et d'aubergine. Ces isolats de *Pseudomonas* pourraient être utilisés dans les sols salés afin d'améliorer les rendements des cultures.

© 2018 International Formulae Group. All rights reserved.

Mots clés: Microorganismes, rhizosphère, PGPR, seuil de tolérance, salinité, résistance.



Effet des pesticides sur la mycorhization arbusculaire de la tomate

UER 301

Biotechnologies
 végétale et
 microbienne et
 amélioration des
 plantes

Demba DIAW

Directeur de Thèse : Professeur Tahir DIOP
Adresse : Laboratoire de Biotechnologies des Champignons
 BP 5005 Dakar - Sénégal
Email : lbc@ucad.sn

UMR/UR/ESP

Amélioration des
 plantes

INTRODUCTION

Les effets protecteurs des champignons mycorhiziens arbusculaires ont été largement démontrés chez les plantes cultivées. Cependant, le recours aux pesticides pour la protection des cultures peut avoir des effets variables selon qu'ils s'agissent de fongicides, d'insecticides ou d'acaricides. L'objectif de notre étude est d'évaluer l'effet des pesticides sur la mycorhization arbusculaire de la tomate (*Lycopersicon esculentum*).

MATERIEL ET METHODES

L'essai a été réalisé en serre au niveau du jardin botanique de la Faculté des Sciences et Techniques. Les plants de tomates ont été inoculés une semaine après semis avec l'isolat fongique *Glomus aggregatum* (Ga) en raison de 20 g par pots de culture. Au bout d'une semaine de culture, Les produits phytosanitaires constitués de deux fongicides (Soufre, manèbe), d'un insecticide (Diméthoate) et d'un acaricide ont été appliqués. Les doses ont été de 0.5 % pour le Soufre et le Manèbe, 0.2 % pour le Péropal et 0.02 % pour le Diméthoate. Le dispositif expérimental totalement randomisé est constitué de 6 traitements et 9 répétitions soit un nombre total de 54 plants.

RESULTATS



Témoin

Ga

Ga + Manèbe

Ga + Diméthoate

Aspects des racines de tomate en présence de champignons symbiotiques et de produits phytosanitaires

Effet des produits phytosanitaires sur l'établissement de la mycorhization des plants de tomate

Traitements	Intensité mycorhization (%)	Fréquence mycorhization (%)
Témoin	0 d	0 d
<i>Glomus aggregatum</i>	11.33 b	100 a
<i>Glomus aggregatum</i> + Soufre	15.33 a	85.33 b
<i>Glomus aggregatum</i> + Diméthoate	1.39 c	66.66 c
<i>Glomus aggregatum</i> + Manèbe	18.50 a	83.33 b
<i>Glomus aggregatum</i> + Péropal	1.33 c	66.66 c

*Pour chaque colonne, les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de probabilité de $P < 0.05$ (test de Newman et Keuls).

CONCLUSION

Les fongicides (Soufre et Manèbe) appliqués à des doses de 0.5% peuvent être conseillés aux horticulteurs pour une amélioration significative de la mycorhization des cultures de tomates.

RETOMBÉES SCIENTIFIQUES

Ces travaux ont permis la mise au point d'une nouvelle technologie (moculum à base des champignons mycorhiziens arbusculaires).

IMPACTS SOCIO-ECONOMIQUES

Cette technologie pourra être appliquée en maraîchage dans le but de maximiser les rendements mais aussi de protéger l'environnement tout en réduisant l'utilisation des pesticides.

Mots-clés : *Lycopersicon esculentum*, pesticides, Mycorhization

Résumé

La tomate (*Solanum lycopersicum* L.) est l'une des principales cultures industrielles pratiquées. Cette culture est très sensible aux attaques parasitaires, ce qui justifie l'utilisation intensive des intrants de synthèse pour augmenter la productivité. Toutefois, l'utilisation abusive de ces produits présente des effets néfastes sur la santé humaine et l'environnement. Des études ont été menées pour évaluer l'impact de l'inoculation des microorganismes bénéfiques (Champignons mycorrhiziens arbusculaires – *Pseudomonas* fluorescents) dans les itinéraires de production maraîchère afin de réduire l'utilisation des produits phytosanitaires. Les prélèvements de sol effectués au niveau de la rhizosphère de plantes de tomate ont permis de caractériser différents isolats de rhizobactéries appartenant au groupe des *Pseudomonas* fluorescents. L'identification de ces isolats à partir d'approches phénotypiques et de la spectrométrie de masse MALDI-TOF a révélé une appartenance de tous les isolats au même genre et à la même espèce (*Pseudomonas putida*) avec des pourcentages de similarité compris entre 76 % et 92 %. Les tests réalisés en milieu contrôlé ont montré que ces rhizobactéries sont capables de s'associer avec des champignons mycorrhiziens arbusculaires. C'est le cas de l'association du couple *Pseudomonas putida* – *Funneliformis mosseae* qui se traduit par une stimulation efficace de la croissance des plantes de tomate. A partir de ces résultats, un essai a été lancé pour évaluer l'impact de différentes doses de pesticides sur ces microorganismes. Les résultats ont montré que l'application des produits phytosanitaires comme le fongicide (Ethoprophos) et le nématicide (Thiofanate méthyl) ont un impact sur les microorganismes lorsqu'ils sont appliqués à de fortes doses. Les essais menés en plein champ pour évaluer l'impact de l'inoculation sur le rendement, en agriculture intensive, ont montré que l'apport des microorganismes s'est révélé plus bénéfique comparé à l'application des produits phytosanitaires à des doses réduites, car le rendement le plus important a été obtenu chez les plantes de tomate inoculées avec *Pseudomonas putida* (12,59 t/ha).

EVALUATION OF THE POTENTIAL OF MYCORRHIZAL AND RHIZOBACTERIAL INOCULANTS ON TOMATO DEVELOPMENT IN SENEGAL.

Summary

Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) is one of the main industrial crops. This crop is very sensitive to parasitic attacks. This justifies the intensive use of synthetic inputs to increase productivity. However, misuse of these products has adverse effects on human health and the environment. The objective of this study is to evaluate the impact of inoculation of beneficial microorganisms (arbuscular mycorrhizal fungi - fluorescent *Pseudomonas*) in vegetable production routes in order to reduce the use of phytosanitary products. Soil samples from the rhizosphere of tomato plants have been used to isolate and characterize different rhizobacterial isolates belonging to the group of fluorescent *Pseudomonas*. The identification of these isolates from phenotypic approaches and MALDI-TOF mass spectrometry revealed that all isolates belong to the same genus and species (*Pseudomonas putida*). The percentages of similarity obtained are between 76% and 92%. Tests carried out in a controlled environment have shown that these rhizobacteria are capable of associating with arbuscular mycorrhizal fungi. This is the case of the combination of the pair *Pseudomonas putida* - *Funneliformis mosseae* which results in an effective stimulation of the growth of tomato plants. High-performance couples were used to evaluate the impact of different doses of pesticides on these microorganisms. The results showed that the application of phytosanitary products such as fungicide (Ethoprophos) and nematocide (Thiofanate methyl) have a negative impact on microorganisms when applied at high doses. Field trials have shown that the contribution of microorganisms is more beneficial compared to reduced dose pesticides because the highest yield was obtained in tomato plants inoculated with *Pseudomonas putida* with 12.59 t / ha.

Discipline: Sciences de la Vie et de la Santé

MOTS-CLES : Inoculation - *Funneliformis mosseae* – *Pseudomonas putida* – pesticides – rendement
