



FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT DE BIOLOGIE
LABORATOIRE DE BIOLOGIE VEGETALE ET ENVIRONNEMENT

THÈSE

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE DOCTORAT

En

Spécialité : Biologie Végétale et Environnement

Option : Biodiversité et Gestion des Ecosystèmes

**Application des champignons mycorhiziens à arbuscules
dans la culture de la tomate industrielle**

Présentée par

ZIANE Hana

Devant le jury :

Président :	LAIFA Aziz	Professeur, Université d'Annaba
Directrice de thèse :	BEDDIAR Arifa	Professeur, Université d'Annaba
Co-directeur de thèse :	GIANINAZZI Silvio	Professeur, Inoculumplus, France
Examinatrice :	BORDJIBA Ouahiba	Professeur, Université d'Annaba
Examineur :	DJAMAI Rachid	Professeur, Université d'Annaba
Examineur :	NASRI Hichem	Professeur, Université d'El-Tarf

Le 09/ 01/ 2018

Dédicaces

Je dédie ce travail à mes parents,

Mes sœurs et mon frère,

Mes grands-parents,

Mon mari et mes enfants Dalia et Ishak.

Remerciements

Ce travail a été réalisé au niveau du laboratoire de Biologie Végétale et Environnement, Département de Biologie, Faculté des Sciences, Université d'Annaba, Algérie.

Je tiens d'abord à remercier Madame *Arifa Beddiar* d'avoir dirigé et suivi ce travail, pour ses précieux conseils, ses encouragements et sa disponibilité.

Mes remerciements vont à Monsieur *Silvio Gianinazzi* qui a contribué à l'encadrement de cette thèse. Ses grandes connaissances dans le domaine des mycorhizes m'ont été d'une grande aide pour l'aboutissement de ce travail.

Je remercie vivement Monsieur *Aziz Laifa* de m'avoir fait l'honneur de présider ce jury de même qu'à Madame *Ouahiba Bordjiba*, Monsieur *Rachid Djamai* et Monsieur *Hichem Nasri* qui ont accepté d'examiner ce travail.

Ma profonde gratitude va à Madame *Amel Meddad-Hamza* pour m'avoir introduit dans le domaine des mycorhizes et de l'agronomie, m'a guidée, a fait preuve d'une très grande disponibilité et surtout d'avoir toujours cru en moi.

Je remercie Monsieur *Nouar Abdelli* et le personnel de la pépinière de *Mansouri* de nous avoir accordé leur confiance en nous laissant mener nos expériences dans leurs champs agricoles/pépinière tout en respectant nos exigences.

Un remerciement particulier à Monsieur *Moufid Khirouni* qui a accepté nos échantillons pour la réalisation des analyses physico-chimiques des sols au sein du laboratoire agronomique de *FERTIAL*.

Je remercie le directeur du laboratoire *CACQE* Annaba de nous avoir permis de réaliser les analyses qualitatives de tomate et Monsieur *Aissa Boutabba* de nous y avoir dirigés.

Mes remerciements vont également à *Sihem Driai, Hana Ksentini, Nabila Hamza* et *Amir Boulemtafes* pour leur aide technique précieuse et aux doctorants et ex doctorants du *LBVE* pour leurs encouragements.

Je remercie tout spécialement mes parents *Karim Ziane* et *Nadia Gouri*, mes sœurs *Ghozlene* et *Nourhane* et mon frère *Raouf*, qui ont contribué infatigablement à la réalisation de ce travail. La réalisation de cette thèse n'aurait pas été possible sans leur soutien matériel, moral et affectif.

Mes sincères remerciements vont également à mon mari et à mes beaux-parents qui m'ont toujours encouragée et aidée.

Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont aidée à concrétiser ce travail et je leur exprime toute ma reconnaissance et ma gratitude.

RESUME

L'utilisation d'engrais chimiques en agriculture permet des rendements satisfaisants, toutefois, cela peut avoir des effets néfastes sur l'environnement et la santé humaine. La réduction des quantités d'engrais utilisés devient alors une nécessité. A cet effet, les champignons mycorhiziens à arbuscules (CMA) constituent des outils biologiques efficaces pour une optimisation de leur utilisation. L'objectif de ce présent travail a été d'évaluer les conséquences des pratiques culturales sur les communautés de CMA naturellement présentes dans quelques champs du Nord-Est algérien d'une part et de tester le potentiel des CMA pour une agriculture plus productive et moins dépendante des fertilisants chimiques, d'autre part.

L'impact des pratiques culturales conventionnelles habituellement utilisées dans la culture de la tomate sur les communautés de CMA indigènes a été évalué dans huit sols agricoles du Nord-Est de l'Algérie (wilayas d'Annaba, d'El Tarf et de Guelma). Les résultats ont révélé à la fois une réduction de leur abondance et la dominance des espèces *Funneliformis mosseae*, *Septoglomus constrictum* et *Rhizophagus irregularis*. Cet effet sur la population des CMA indigènes handicape l'expression de leur effet bénéfique et à terme, pourrait compromettre leur maintien dans les sols agricoles.

Une expérimentation en serre, à l'aide d'un sol agricole provenant d'un champ prévu pour la culture de la tomate industrielle, a montré que l'inoculation à la fois de souches de CMA natives (composées d'un mélange des espèces *Funneliformis mosseae* et *Septoglomus constrictum*) et exotiques (inoculum de CMA commercial) permet des niveaux de colonisation racinaire allant jusqu'à 47.6% et 60.1%, respectivement. De même, la croissance des plants de tomate inoculés s'est traduite par un meilleur développement en hauteur (+22%), en poids frais aérien (+23%) en poids frais racinaire (+16%) et en poids sec aérien (+15%).

L'utilisation au champ du même inoculum commercial a été combinée avec une fertilisation chimique allant de 0, 50 et 100% de la dose requise en NPK sur le site de Ben Amar, et en mono-ammonium phosphate, sulfate d'ammonium et NPK sur celui d'El Karma, localisés au Nord-Est algérien. Ceci a confirmé chez la tomate l'effet positif de l'inoculation de CMA sur les niveaux de colonisation mycorhizienne (jusqu'à +52.37%), sur la croissance (jusqu'à +22% de la hauteur, +42% du poids sec aérien et +19% du poids sec racinaire) ainsi que sur les rendements (jusqu'à +24%). De plus, à El Karma, l'inoculation de CMA, combinée avec un apport de 50% de la dose recommandée en fertilisants chimiques, a permis d'obtenir le même rendement que lors de l'apport de la dose complète de fertilisants sans inoculation.

Mots clés : Champignons mycorhiziens arbusculaires ; *Funneliformis mosseae* ; *Septoglomus constrictum* ; inoculum CMA commercial ; fertilisants chimiques ; tomate industrielle ; Nord-Est algérien.

ABSTRACT

The use of chemical fertilizers in agriculture allows satisfactory yields; however, this can have adverse effects on the environment and human health. Reducing the amount of fertilizers used then becomes a necessity. To this, arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) are effective biological tools to optimize fertilizers use. The objective of the present work was to evaluate the consequences of cultivation practices in Northeastern Algeria on AMF communities naturally present in some fields and to test the potential of AMF for a more productive agriculture that is less dependent on chemical fertilizers.

The impact of conventional cropping practices commonly used in tomato cultivation on indigenous AMF population was assessed in eight agricultural soils in Northeastern Algeria (Annaba, El Tarf and Guelma provinces). The results revealed both a reduction in their abundance and the dominance of *Funneliformis mosseae*, *Septoglomus constrictum* and *Rhizophagus irregularis*. This effect on the indigenous AMF population hinders the expression of their beneficial effect and, in the long term, could compromise their maintenance in agricultural soils.

In a greenhouse experiment using an agricultural soil from a field intended for the cultivation of industrial tomato, inoculation of both native AMF strains (composed of a mixture of the species *Funneliformis mosseae* and *Septoglomus constrictum*) and exotic (commercial AMF inoculum), allowed root colonization levels of up to 47.6% and 60.1%, respectively. Similarly, the growth of inoculated tomato plants resulted in a better development in height (+ 22%), in aerial fresh weight (+ 23%) in root fresh weight (+ 16%) and in aerial dry weight (+ 15%).

Field use of the same commercial inoculum was combined with chemical fertilization of 0, 50 and 100% of the required NPK dose on the site Ben Amar, and of mono-ammonium phosphate, ammonium sulphate and NPK on the site El Karma, located in North-East Algeria. This confirmed in tomato the positive impact of inoculation on mycorrhizal colonization levels (up to + 52.37%), on growth (up to + 22% of height, + 42% of aerial dry weight and + 19% of root dry weight) and on yields (up to + 24%). In addition, in El Karma, AMF inoculation combined with 50% of the recommended chemical fertilizer dose, gave the same yield as when the full fertilizer dose was added without inoculation.

Key words: Arbuscular mycorrhizal fungi ; *Funneliformis mosseae* ; *Septoglomus constrictum*; commercial AMF inoculum ; chemical fertilizers ; industrial tomato ; North-East Algeria.

ملخص

إن استخدام الأسمدة الكيماوية في الزراعة الحديثة ضروري من أجل ضمان عوائد عالية، غير أن هذا الاستخدام تسبب في آثار ضارة على البيئة والصحة البشرية. لهذا فتحسين فعالية النباتات في امتصاص العناصر الغذائية وتخفيض كميات الأسمدة المستخدمة ضروري، ولهذا، قد تكون الفطريات الميكور هيزية الشجرية أدوات فعالة.

كان الهدف الرئيسي لهذه الأطروحة تقييم نتائج الممارسات الزراعية على المجتمعات المحلية للفطريات الميكور هيزية الشجرية واختبار إمكانات الفطريات الميكور هيزية الشجرية من أجل زراعة أكثر إنتاجية وأقل اعتماداً على الأسمدة الكيماوية في شمال شرق الجزائر وهكذا، أجريت تجارب تحت ظروف البيت الأخضر والحقل.

تم تقييم آثار الممارسات الزراعية الحديثة المطبقة في زراعة الطماطم في ثمانية حقول زراعية في شمال شرق الجزائر (في ولايات عنابة، الطارف وقالمة) على تنوع ووفرة الفطريات الميكور هيزية الشجرية. أظهرت النتائج أن ابواغ الفطريات الميكور هيزية موجودة بنسبة منخفضة والأنواع أيضاً منخفضة متميزة بهيمنة ثلاث أنواع. تشير هذه البيانات إلى أن الممارسات الزراعية تعيق تعبير مجتمعات الفطريات الميكور هيزية الشجرية عن آثارها المفيدة، ويمكن أن تؤدي على المدى الطويل، إلى الإضرار بصيانتهم في التربة الزراعية.

التجربة في البيت الأخضر أجريت في تربة لزراعة الطماطم الصناعية، من أجل مقارنة تأثير عينات فطريات ميكور هيزية شجرية محلية وغريبة من تطعيم تجاري، أضيفت في تربة معقمة وغير معقمة واختبرت لتأثيرها على نسبة الاستعمار الميكور هيزي للجدور وعلى نمو نبات الطماطم. التطعيم بالعينتين زاد في مستويات الاستعمار في الجذور (47.6% و 60.1%) ومعظم معاملات نمو نباتات الطماطم (+22% من الارتفاع، +23% من الوزن الطازج الهوائي، +16% من الوزن الطازج للجدور و +15% من الوزن الجاف الهوائي).

ثم من أجل اختبار تأثير التطعيم مع التسميد الكيماوي على النمو والعائد وجودة الثمار أجريت تجربتان في حقليين مميزين بزراعة الطماطم (في محليات بن عمار والكرمة، شمال شرق الجزائر). نبات الطماطم كان مطعم بالعينات التجارية ومزرع مع ثلاث كميات من الأسمدة الكيماوية (0 و 50 و 100% من الكمية الموصى بها). الفطريات الميكور هيزية الشجرية المدخلة زادت بشكل ملحوظ من مستويات الاستعمار في الجذور (تصل إلى +52.37%)، النمو (يصل إلى +22%)، من الارتفاع +42%، من الوزن الجاف الهوائي و +19% من الوزن الجاف للجدور) والعوائد (تصل إلى +24%) بالمقارنة مع الفطريات المحلية وحدها. وبالإضافة إلى ذلك في الكرمة، مع التطعيم الميكوريزي، تطبيق 50% من الكمية الموصى بها من الأسمدة الكيماوية أعطى نفس العائد بالنسبة إلى كمية كاملة من الأسمدة الكيماوية دون تطعيم. تظهر النتائج بوضوح أنه في بعض أنواع التربة، قد تحتاج النباتات إلى التسميد والتطعيم لتحقيق النمو وأعلى محاصيل، وأن تطبيق الفطريات الميكور هيزية الشجرية يمكن أن يعوض التخفيض من الأسمدة الكيماوية.

الكلمات المفتاحية: الفطريات الميكور هيزية الشجرية، تطعيم ميكور هيزي تجاري، الأسمدة الكيماوية، الطماطم الصناعية، شمال شرق الجزائر.

TABLE DES MATIERES

RESUME

TABLE DES MATIERES

LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

INTRODUCTION..... 1

CHAPITRE I SYTNHESE BIBLIOGRAPHIQUE 5

1 Les champignons mycorhiziens à arbuscules 5

1.1 Généralités sur la symbiose mycorhizienne 5

1.2 La symbiose mycorhizienne arbusculaire 8

1.2.1 Structure des champignons mycorhiziens à arbuscules 8

1.2.2 Cycle de vie des CMA 10

1.2.3 Classification des Glomeromycètes..... 12

1.2.4 Importance des CMA 15

2 Challenges de l’agriculture moderne..... 18

2.1 Répondre à la demande mondiale en aliments 18

2.2 Réduire la dépendance aux engrais 18

2.2.1 Augmenter l’efficacité dans l’absorption des nutriments 18

2.2.2 Prendre en compte le phosphate comme ressource non renouvelable 19

3 Impact de l’agriculture moderne sur l’environnement et sur les mycorhizes et pratiques contribuant à leur restauration..... 19

3.1 Impacts environnementaux des engrais 19

3.2 Diminution de la biodiversité 20

3.3 Impact des pratiques culturales sur les mycorhizes..... 21

3.3.1 La fertilisation 21

3.3.2 Les rotations de culture 21

3.3.3 Le travail du sol 22

3.3.4 Les pesticides	22
3.3.5 La sélection génétique des nouveaux cultivars	23
3.4 Les CMA solution agro-écologique.....	23
3.4.1 Les inoculants mycorhiziens commerciaux.....	23
3.4.2 Défi futur de l'utilisation des CMA dans la production agricole.....	23
4 Application des CMA en Algérie	24
4.1 Etudes menées sur l'application des CMA en agriculture en Algérie.....	24
4.2 L'agriculture biologique en Algérie.....	24
5 Généralités sur la tomate industrielle en Algérie	25
5.1 Tomate industrielle et transformation	25
5.2 Superficies	25
5.3 Rendements.....	26
5.4 La plante.....	26
5.4.2 Taxonomie.....	26
5.4.3 Exigences	27
5.4.4 Variétés hybrides.....	27
CHAPITRE II MATERIEL ET METHODES	29
1 Impact des pratiques culturales sur les communautés CMA dans les champs de tomate au Nord-Est de l'Algérie	29
1.1 Présentation des sites d'étude.....	29
1.2 Isolement et observation des spores CMA	31
1.2.1 Prélèvement des échantillons de sols	31
1.2.2 Isolement des spores.....	31
1.2.3 Observation microscopique.....	32
1.2.4 Identification et description des spores	32
1.2.5 Abondance des spores	32
1.3 Estimation des niveaux de colonisation racinaire des plants de tomate.....	32
1.3.1 Prélèvement des échantillons de racines	32
1.3.2 Estimation des niveaux de colonisation racinaire	33

2 Evaluation de l'effet des champignons mycorhiziens à arbuscules indigènes et commerciaux sur la croissance de la tomate industrielle sous serre	35
2.1 Choix de la serre	35
2.2 Choix du substrat de culture	35
2.3 Production du matériel végétal	36
2.4 Matériel fongique	37
2.5 Schéma expérimental et traitements	38
2.6 Paramètres mesurés	38
2.6.1 Etude du potentiel mycorhizogène du sol	39
2.6.2 Estimation des niveaux de colonisation des racines de la tomate	40
3 Effets des champignons mycorhiziens à arbuscules et des niveaux de fertilisation sur le développement de la tomate industrielle en conditions de champ.....	40
3.1 Présentation des sites expérimentaux	40
3.2 Matériel végétal	41
3.3 Matériel fongique	42
3.4 Fertilisation dans les sites expérimentaux.....	42
3.5 Inoculation CMA dans les sites expérimentaux	43
3.6 Schéma expérimental et traitements	43
3.7 Paramètres mesurés	44
3.8 Calcul de l'efficacité sur la croissance et le rendement.....	46
4 Analyses statistiques.....	47
CHAPITRE III RESULTATS ET DISCUSSION.....	48
1 Impact des pratiques culturales sur les communautés CMA dans les champs de tomate au Nord-Est de l'Algérie	48
1.1 Abondance et biodiversité des CMA	48
1.2 Niveaux de colonisation racinaires des plants de tomate.....	53
2 Evaluation de l'effet des champignons mycorhiziens à arbuscules indigènes et commerciaux sur la croissance de la tomate industrielle sous serre	55
2.1 Potentiel mycorhizogène du sol et niveaux de colonisation des racines mycorhizées	55
2.2 Croissance	56

3 Effets des champignons mycorhiziens à arbuscules et des niveaux de fertilisation sur le développement de la tomate industrielle en conditions de champ.....	60
3.1 Site de Ben Amar	60
3.1.1 Potentiel mycorhizogène du sol et colonisation mycorhizienne des racines.....	60
3.1.2 Croissance des plants	61
3.1.3 Taux de chlorophylle.....	62
3.1.4 Nombre de fleurs	65
3.1.5 Rendement et nombre de fruits.....	66
3.1.6 Paramètres de qualité des fruits	69
3.2 Site d'El Karma	70
3.2.1 Colonisation mycorhizienne des racines	70
3.2.2 Croissance des plants de tomate	71
3.2.3 Rendement et nombre de fruits.....	73
3.2.4 Paramètres de qualité des fruits	75
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	80
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	83
ANNEXES	

LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES

%	Pourcent
·OH	Radical hydroxyl
'	Minute
°	Degré
°C	Degré Celsius
µg	Micro gramme
µl	Micro litre
µm	Micro mètre
ADN	Acide désoxyribonucléique
AMF	Arbuscular mycorrhizal fungus (Champignon mycorhizien à arbuscules)
ANOVA	Analysis of variance (tests des comparaisons multiples)
ATP	Adénosine triphosphate
C	Carbone
Ca	Calcium
Cl	Chlore
Cm	Centimètre
CMA	Champignon mycorhizien à arbuscules
CO	Monoxyde de carbone
Cu	Cuivre
DBO5	Demande Biochimique en Oxygène
DCO	Demande Chimique en Oxygène
E	Est
FAO	Food and Agriculture Organization
FC	Fertilisants chimiques
Fe	Fer
g	Gramme
GLM	Genral Linear Model
H ₂ O ₂	Peroxyde d'Hydrogène
ha	Hectare

HCl	Chlorure d'Hydrogène
HSD	Honestly Significant Difference
IC	Inoculum Commercial
IF	Isolat Fongique natif
ITCMI	Institut Technique des Cultures Maraichères et Industrielles
KCl	Chlorure de potassium
Kg	Kilogramme
KOH	Hydroxyde de potassium
L	Litre
L.	Linné
m	Mètre
m ²	Mètre carré
MA	Mycorhize arbusculaire
MAP	Phosphore mono-ammoniacal
meq	Milliéquivalent
mg	Milligramme
Mg	Magnésium
Mill.	Miller
min	Minute
ml	Millilitre
mm	Millimètre
MO	Matière organique
MPN	Most Propable Number
ms	Millisiemens
N	Nord
N	Nitrogène (Azote)
Na	Sodium
NH ₃ ⁺	Ammoniac
NH ₄ ⁺	Ammonium
NI	Non inoculé
Nm	Nanomètre
NO ₂	Dioxyde d'Azote

NO ₃ ⁻	Nitrate
NPK	Azote Phosphore Potassium
NS	Sol Non-Stérile
O ²	Oxygène moléculaire
ONS	Office National des Statistiques
ONU	Organisation internationale des Nations Unies
P	Phosphore
P ₂ O ₅	Pentoxyde de phosphore
pH	Potentiel d'Hydrogène
Pi	Phosphore inorganique
PNUE	Programme des Nations Unies pour l'Environnement
ppm	Parti par million
PVLG	Polyvinyle alcool acide Lactique Glycerol
S	Sol
SO ²	Dioxyde de soufre
SO ₄	Sulfate
SS	Sol Stérile
t	Tonne
Zn	Zinc

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Schéma de la colonisation des champignons ectomycorhiziens et endomycorhiziens à arbuscules (Modifiée de Bonfante & Genre, 2010).....	6
Figure 2 : Schéma des principaux types de mycorhizes représentés sur une coupe transversale de racine d'après Le Tacon (1985).....	7
Figure 3 : Structures des mycorhizes à arbuscules. (a) Structure d'un arbuscule (Schüßler & Walker, 2010), (b) Structures d'hyphes et vésicules dans le cortex racinaire (Müller et al., 2017).....	9
Figure 4 : Formation de l'appressorium (Reinhardt, 2007).....	11
Figure 5 : Schéma de la colonisation par les champignons mycorhiziens à arbuscules (Bothe et al., 2010).....	11
Figure 6 : Phylogénie des <i>Fungi</i> (Schüßler et al., 2001).....	12
Figure 7 : Arbre phylogénétique des <i>Glomeromycota</i> basé sur les analyses moléculaires et morphologiques. (Les dessins dans les colonnes centrales montrent les types de formation de spores des genres et les boucliers de germination typiques chez ces genres) (Oehl et al., 2011).....	14
Figure 8 : Localisations des sites d'étude (El Karma, Ben Amar, Chbaïta Mokhtar, Drean, Denden et Djebel Houara) (Image satellite Google maps 2017).....	29
Figure 9 : Echelle d'évaluation de la présence des arbuscules.....	33
Figure 10 : Echelle d'intensité de colonisation du cortex racinaire.....	34
Figure 11 : Serre de l'université Badji Mokhtar, Sidi Amar, Annaba.....	35
Figure 12 : Plants de tomate industrielle produits en pépinière.....	42
Figure 13 : Proportion des spores CMA vivantes et mortes dans les parcelles cultivées (PC) et non cultivées (PT) dans huit champs de tomate au Nord-Est de l'Algérie (El Karma, Ben Amar, Chbaïta Mokhtar 1, 2 et 3, Drean, Denden et Djebel Houara).....	51
Figure 14 : Abondance des spores vivantes dans les parcelles cultivées (PC) et non cultivées (PT) dans huit champs de tomate au Nord-Est de l'Algérie (El Karma, Ben Amar, Chbaïta Mokhtar 1, 2 et 3, Drean, Denden et Djebel Houara).....	52

Figure 15 : Effet d'un inoculum CMA commercial (IC) et d'isolats fongiques natifs (IF) sur les niveaux de colonisation mycorhizienne racinaire des plants de tomate cultivés en serre dans du sol stérilisé (SS) et non stérilisé (NS) comparés aux témoins (NI).....	56
Figure 16 : Plants de tomate au stade premières feuilles dans les plaques micro-alvéolées en pépinière.....	58
Figure 17 : Croissance des plants de tomate inoculés avec un inoculum CMA commercial (IC) ou avec un isolat fongique natif (IF) et cultivés dans un sol stérile (SS) et non-stérile (NS) en serre.....	59
Figure 18 : Effet de la fertilisation par NPK sur les niveaux de colonisation mycorhizienne des racines de tomate inoculée (I) et non-inoculée (NI) par un inoculum de CMA commercial.....	61
Figure 19 : Taux de concentration en chlorophylle <i>a</i> des plants de tomate inoculés (I) et non-inoculés (NI) par un inoculum CMA commercial et cultivés en champ avec trois doses d’NPK (0, 50 et 100% des doses recommandées).....	63
Figure 20 : Taux de concentration en chlorophylle <i>b</i> des plants de tomate inoculés (I) et non-inoculés (NI) par un inoculum CMA commercial et cultivés en champ avec trois doses d’NPK (0, 50 et 100% des doses recommandées).....	64
Figure 21 : Taux de concentration en chlorophylle (<i>a+b</i>) des plants de tomate inoculés (I) et non-inoculés (NI) par un inoculum CMA commercial et cultivés en champ avec trois doses d’NPK (0, 50 et 100% des doses recommandées).....	65
Figure 22 : Nombre de fleurs des plants de tomate inoculés (I) et non-inoculés (NI) par un inoculum CMA commercial et cultivés en champ avec trois doses d’NPK (0, 50 et 100% des doses recommandées).....	66
Figure 23 : Rendement des plants de tomate inoculés (I) et non-inoculés (NI) par un inoculum CMA commercial et cultivés en champ avec trois doses d’NPK (0, 50 et 100% des doses recommandées).....	68
Figure 24 : Nombre de fruits des plants de tomate inoculés (I) et non-inoculés (NI) par un inoculum CMA commercial et cultivés en champ avec trois doses d’NPK (0, 50 et 100% des doses recommandées).....	68
Figure 25 : Effet des fertilisants chimiques (FC) sur les niveaux de colonisation mycorhizienne des racines des plants de tomate inoculés (I) et non-inoculés (NI) par un inoculum CMA commercial.....	71

Figure 26 : Rendement des plants de tomate inoculés par un inoculum CMA commercial et cultivés en champ avec trois doses de fertilisants chimiques (0, 50 et 100% des doses recommandés).....74

Figure 27 : Nombre de fruits des plants de tomate inoculés avec un inoculum CMA commercial et cultivés en champ avec trois doses de fertilisants chimiques (0, 50 and 100% des doses recommandées).....75

Figure 28 : Plants de tomate non inoculés (gauche) et inoculés par un inoculum CMA commercial (droite) et fertilisés 2 semaines après la transplantation au site d'El Karma.....77

Figure 29 : Plant de tomate non inoculé (à gauche) et inoculé par un inoculum CMA commercial (à droite) cultivés avec 50% FC.....77

Figure 30 : Récolte des fruits des plants de tomate inoculés par un inoculum CMA commercial (à gauche) et non inoculés (à droite) et cultivés avec trois doses de fertilisants chimiques.....77

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Taxonomie de la tomate établie par Cronquist.....	27
Tableau 2 : Propriétés physico-chimiques du substrat de culture (El Karma).....	30
Tableau 3 : Propriétés physico-chimiques du sol de Ben Amar.....	37
Tableau 4 : Fertilisants chimiques appliqués au site de Ben Amar.....	39
Tableau 5 : Fertilisants chimiques appliqués au site d'El Karma.....	39
Tableau 6 : Hauteur, poids frais et sec des parties aériennes et racinaires des plants de tomate inoculés par un inoculum CMA commercial (IC) ou par des isolats fongiques natifs (IF) et cultivés en serre.....	51
Tableau 7 : Croissance des plants de tomate inoculés par un inoculum CMA commercial et cultivés en champs avec trois doses d'NPK (0, 50 and 100% de la dose recommandée).....	55
Tableau 8 : Taux d'acidité, matière sèche soluble et pH des fruits de tomate inoculés (I) et non-inoculés (NI) par un inoculum CMA commercial et cultivés avec trois doses d'NPK (0, 50 et 100% de la dose recommandée).....	62
Tableau 9 : Croissance des plants de tomate inoculés par un inoculum CMA commercial et cultivés en champs avec trois doses de fertilisants chimiques (0, 50 et 100% des doses recommandées).....	66
Tableau 10: Taux d'acidité, matière sèche soluble et pH des fruits des plants de tomate inoculés (I) et non inoculés (NI) avec un inoculum CMA commercial et cultivés en champ avec trois doses de fertilisants chimiques (0, 50 et 100% des doses recommandées).....	69
Tableau 11 : Niveaux de colonisation racinaire, croissance, rendement et qualité de la tomate industrielle inoculés (I) et non-inoculés (NI) par un inoculum CMA commercial et fertilisés avec trois doses d'NPK (0, 50 et 100% de la dose recommandée) dans le site de Ben Amar.....	71

Tableau 12 : Niveaux de colonisation racinaire, croissance, rendement et qualité de la tomate industrielle inoculés (I) et non-inoculés (NI) par un inoculum CMA commercial et fertilisés avec trois doses de fertilisants chimiques (FC) (0, 50 et 100% de la dose recommandée) dans le site d'El Karma.....72

Tableau 13 : Abondance des espèces de champignons mycorhiziens à arbuscules par le nombre de spores (spores 100 g⁻¹) dans 8 champs de tomate au Nord-Est de l'Algérie (El Karma, Ben Amar, Chbaita Mokhtar 1, 2 et 3, Drean, Denden et Djebel Houara).....75

Tableau 14 : Niveaux de colonisation mycorhizienne racinaire (F%, M%, m%, a%, et A%) des plants de tomate cultivés dans huit champs de tomate au Nord-Est de l'Algérie (El Karma, Ben Amar, Chbaita Mokhtar 1, 2 et 3, Drean, Denden et Djebel Houara).....79

Introduction

INTRODUCTION

De nombreux sols agricoles dans le monde sont appauvris en un ou plusieurs des nutriments essentiels nécessaires à la croissance et à la productivité des plantes, de sorte que les additions d'engrais sont indispensables pour assurer des rendements maximaux (Baligar *et al.*, 2001). Cependant, des quantités nuisibles d'engrais sont déversées annuellement dans les agrosystèmes terrestres car ils ne sont pas absorbés efficacement. Les estimations des quantités utilisées font ressortir qu'elles sont supérieures à environ 50% pour l'azote, 10% pour le phosphore, et d'environ 40% pour le potassium (Vitousek *et al.*, 1997 ; Baligar *et al.*, 2001 ; Malhi *et al.*, 2002).

Au-delà d'une certaine quantité, l'apport en phosphore n'a plus aucun impact sur le rendement et devient inutile (Blal *et al.*, 1990 ; Fageria *et al.*, 2003). En effet, le P est absorbé au niveau des racines des plants de manière plus rapide que le remplacement par diffusion, causant la perte de cet élément et inhibant son absorption (Smith *et al.*, 2011). D'autre part, le phosphore dans les engrais phosphatés provient de ressources non renouvelables, n'a pas de substitut pour la croissance des plantes (van Vuuren *et al.*, 2010) et représente une source de pollution (Semu & Singh, 1995).

Les taux d'engrais utilisés sont appelés à augmenter d'avantage à l'avenir si les mêmes pratiques conventionnelles sont appliquées pour améliorer la production alimentaire afin de satisfaire la population mondiale croissante (Tilman *et al.*, 2002 ; Cordell *et al.*, 2009). Il est donc important d'optimiser l'efficacité avec laquelle les engrais sont utilisés dans la production agricole (White & Brown, 2010). Cela peut être réalisé par une amélioration de l'absorption et l'utilisation des nutriments par les plantes. Dans ce contexte, les champignons mycorhiziens à arbuscules (CMA) sont une composante essentielle à considérer (Gianinazzi *et al.*, 2010).

Ces champignons sont associés aux racines et favorisent la croissance des plantes. Ils augmentent les rendements (Waller *et al.*, 2005) en rendant plus efficace l'absorption du phosphore disponible à partir du sol, ainsi que d'autres nutriments minéraux faiblement mobiles dans le sol et essentiels pour la croissance végétale (Clark & Zeto, 2000 ; Smith & Read, 2008). Ils ont également un effet majeur sur les propriétés microbiologiques et physiques du sol, principalement dans l'agrégation des particules du sol prévenant ainsi le lessivage de surface et l'érosion (Rillig & Mummey, 2006).

L'efficacité des CMA dans l'amélioration de l'acquisition des nutriments, y compris de l'eau, provient principalement du mycélium extraradical qui explore le sol et transfère les nutriments à la plante, élargissant la zone d'absorption racinaire à des distances pouvant atteindre plusieurs mètres de la racine (Smith & Read, 2008). L'aide de ces microorganismes est particulièrement précieuse lorsque les nutriments sont plus difficiles à absorber car ils sont « fixés » dans le sol. En effet, le P étant immobile dans le sol, les CMA fournissent une voie très efficace par laquelle le P est récupéré à partir de grands volumes de sol et rapidement livré aux cellules corticales dans la racine, en contournant l'absorption directe (Smith *et al.*, 2011). Les CMA limitent ainsi la filtration et la perte d'éléments nutritifs à l'environnement et contribuent alors à une gestion intégrée de ces éléments (Adesemoye *et al.*, 2008). L'effet des CMA dans l'amélioration de la croissance et du rendement de nombreuses plantes cultivées a été démontré en particulier dans les sols dont la teneur en éléments nutritifs est faible à moyenne (Smith & Read, 2008).

Le présent travail a été réalisé sur la tomate cultivée dans le Nord-Est de l'Algérie. Les cultures industrielles sont une vocation principale dans cette région, particulièrement celle de la tomate qui a connu une expansion très importante (FAO, 2005 ; Bedrani, 2008). La tomate est particulièrement sensible à l'inoculation par les CMA (Edathil *et al.*, 1996). Sa croissance et sa qualité sont affectées positivement par cette symbiose (Giovannetti *et al.*, 2012) ; que ce soit dans des conditions de stress de salinité et de sécheresse (Al Karaki, 2000 ; Subramanian *et al.*, 2006), d'interaction avec des pathogènes (Fakhro *et al.*, 2010 ; Steinkellner *et al.*, 2012), ou en combinaison avec l'engrais NPK ou différents niveaux de P (Poulton *et al.*, 2002 ; Mujica Perez *et al.*, 2010 ; Conversa *et al.*, 2013).

L'addition d'inoculum CMA au sol représente donc une possible stratégie pour réduire, voire mieux utiliser l'apport d'engrais (Blal *et al.*, 1990) et ainsi maintenir la productivité des cultures. La validité de cette stratégie doit être évaluée en plein champ, où une communauté locale peut être déjà présente (Pellegrino *et al.*, 2013). Cette communauté étant déjà endommagée en terme de biodiversité et de capacité à effectuer une colonisation suite aux pratiques culturales intensives tels que les monocultures, les labours, et l'usage de pesticides et de fertilisants chimiques (Helgason *et al.*, 1998 ; Douds & Johnson, 2007 ; Kjoller & Rosendahl, 2000).

Par conséquent, l'objectif principal de ce travail est d'évaluer comment le potentiel mycorhizien peut favoriser une agriculture plus productive et moins soumise à l'application des fertilisants chimiques, car en dépit de la faible quantité de fertilisants utilisée en Algérie par

rapport à la moyenne mondiale (FAO, 2005), cette utilisation a eu néanmoins un impact négatif sur l'environnement dans cette région, notamment la pollution des eaux de surface (Derradji *et al.*, 2007 ; Harrat & Achour, 2010).

Ainsi, une première étape a consisté en l'évaluation de la biodiversité et de l'abondance des CMA indigènes dans huit champs agricoles cultivés de tomate, situés dans des zones contrastées par cette culture au Nord-Est Algérien (Localités d'El Karma, de la wilaya d'Annaba, Ben Amar, Chbaïta Mokhtar, Drean et Denden, de la wilaya d'El Tarf, et Djebel Houara, de la wilaya de Guelma). Les pratiques culturales suivies dans ces exploitations agricoles pour assurer de bons rendements sont conventionnelles, notamment l'application de fertilisants chimiques et le travail de sol. Le but était de déterminer si ces sols requéraient un éventuel apport exogène en CMA tant que biofertilisant, afin de faciliter la restauration des communautés de CMA dans cette région.

Une deuxième étape a été la mise en évidence du potentiel de souches de CMA natives, isolées d'un sol algérien, et de celles exotiques d'un inoculum CMA commercial dans la promotion des niveaux de colonisation racinaire et de la croissance des plants de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill. cv. Isma F1). L'essai a été conduit en conditions contrôlées de serre, dans un sol agricole provenant d'un champ situé dans la localité d'El Karma et prévu pour la culture de la tomate industrielle.

Une troisième étape a eu pour but la recherche d'un équilibre favorable entre la bio-fertilisation basée sur l'application des CMA et la fertilisation chimique, afin d'assurer une bonne production dans un système agricole plus respectueux de l'environnement. Pour cela, deux essais ont été conduits en conditions réelles dans deux champs agricoles situés respectivement dans les localités de Ben Amar et El Karma. Le même inoculum CMA commercial a été utilisé en combinaison avec différents taux de fertilisants chimiques. Son efficacité a été testée sur les niveaux de colonisation racinaire, la croissance, le rendement, le nombre de fruits, le nombre de fleurs, le taux de chlorophylle et sur certains paramètres de qualité des fruits de la tomate.

Cette thèse est subdivisée en trois chapitres. Le premier chapitre est dédié à l'état des connaissances en littérature scientifique sur les champignons mycorrhiziens à arbuscules et leur importance pour les végétaux et l'environnement, sur les challenges de l'agriculture moderne et ses impacts sur l'environnement, en particulier sur le dépérissement des CMA et les pratiques pouvant contribuer à la restauration de ces derniers dans la culture de la tomate industrielle en

Algérie. Le second chapitre concerne le matériel et les méthodes afférentes à la réalisation des essais. Enfin, le troisième chapitre concerne les résultats obtenus et leurs discussions.

Il est suivi d'une conclusion générale, des perspectives de recherche future et des références bibliographiques citées tout au long de ce manuscrit.

Chapitre I

Synthèse bibliographique

CHAPITRE I SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

1 Les champignons mycorhiziens à arbuscules

1.1 Généralités sur la symbiose mycorhizienne

Le sol est le support d'une vie microbienne intense et c'est aussi le milieu où germent les graines de la grande majorité des végétaux. C'est le substrat dans lequel ces derniers puisent l'eau et les sels minéraux qui leur sont nécessaires. Il est considéré, de ce fait, le siège privilégié des échanges entre les composants biotiques qui y habitent (Davet, 1996).

Dans le sol, il y a de nombreuses interactions des racines des plantes avec d'autres plantes, microbes et nématodes présents dans la rhizosphère. Certaines interactions plantes-plantes et plantes-microorganismes peuvent être positives et négatives. Parmi les interactions plantes-microbes positives, il y a les associations mycorhiziennes (Bais *et al.*, 2006).

L'association des racines des plantes avec certains champignons du sol se produit en différentes formes et est appelée mycorhize, du grec « mycés », qui signifie champignon et « rhiza », qui signifie racine (Parniske, 2008). Cette association a le statut de symbiose, du grec « sym » qui signifie ensemble, et « bio » qui signifie vie (Garbaye, 2013) et c'est l'une des formes les plus communes des relations mutualistes dans la nature (Smith & Read, 2010).

Les champignons des associations mycorhiziennes fonctionnent comme des extensions du système racinaire. Leurs hyphes augmentent d'une façon extraordinaire le contact avec le sol et la surface totale d'absorption. La mycorhize participe au transfert direct du phosphore, du zinc, du cuivre et d'autres nutriments du sol aux racines. La plante, de son côté, fournit du carbone organique au champignon (Raven *et al.*, 2017).

Les associations mycorhiziennes elles-mêmes peuvent être classées sur la base du type de champignon impliqué et la gamme de structures produites par la combinaison racine-champignon résultant (Figure 2) :

-Les ectomycorhizes

La symbiose ectomycorhizienne (Figure 1) se traduit par la formation d'ectomycorhize (ECM), organe mixte, et par l'apparition de fructifications appelées sporophores visibles à

proximité de la plante hôte (Bâ *et al.*, 2011). Le champignon forme un manteau qui enveloppe les racines, et présente un réseau d'hyphes, appelé réseau de Hartig, qui pénètre entre les cellules épidermiques et corticales racinaires sans jamais traverser leur paroi (Dickie *et al.*, 2006).

Les arbres sont majoritairement impliqués dans cette symbiose, mais on trouve aussi des arbustes, des lianes et des herbacées. La diversité des champignons ectomycorhiziens est évaluée de 20.000 à 25.000 espèces appartenant majoritairement à des Basidiomycètes et Ascomycètes et plus rarement à des Gloméromycètes (Bâ *et al.*, 2011 ; Maiti, 2012).

-Les endomycorhizes

A l'inverse des ectomycorhizes, les champignons se développent dans ce cas à l'intérieur des cellules (Figure 1). Seul un réseau lâche d'hyphes entoure la racine. Le manteau fongique est absent et les poils absorbants peuvent se développer (Nultsch, 1998).

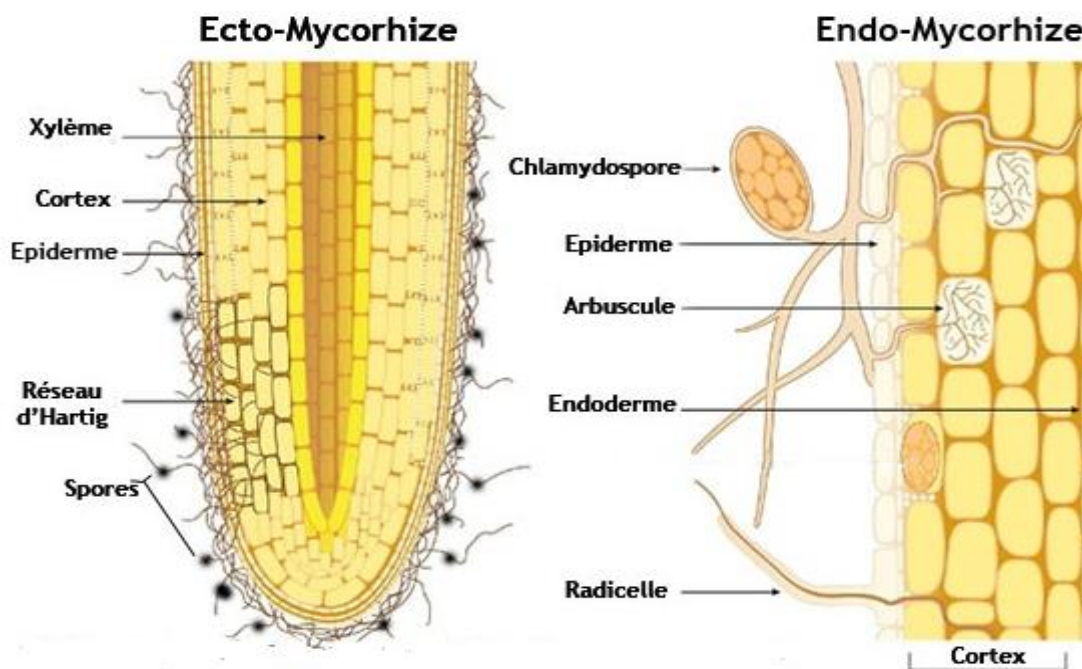


Figure 1 : Schéma de la colonisation des champignons ectomycorhiziens et endomycorhiziens à arbuscules (Modifiée de Bonfante & Genre, 2010)

-Les ectendomycorhizes

Comme le nom l'indique, ce sont des formes intermédiaires qui possèdent à la fois des caractères d'ectomycorhize (manteau fongique, réseau de Hartig) et d'endomycorhize (suçoirs intracellulaires). Elles sont connues chez quelques pins et sapins, chez lesquels le manteau fongique est moins développé que chez les ectomycorhizes et où les hyphes pénètrent dans les

cellules corticales où elles peuvent être résorbées (Nultsch, 1998). Les champignons impliqués appartiennent aux Ascomycètes. Ces espèces forment rarement de fructifications distinctes dans le sol et leur identification peut être difficile à effectuer (Scott, 2013).

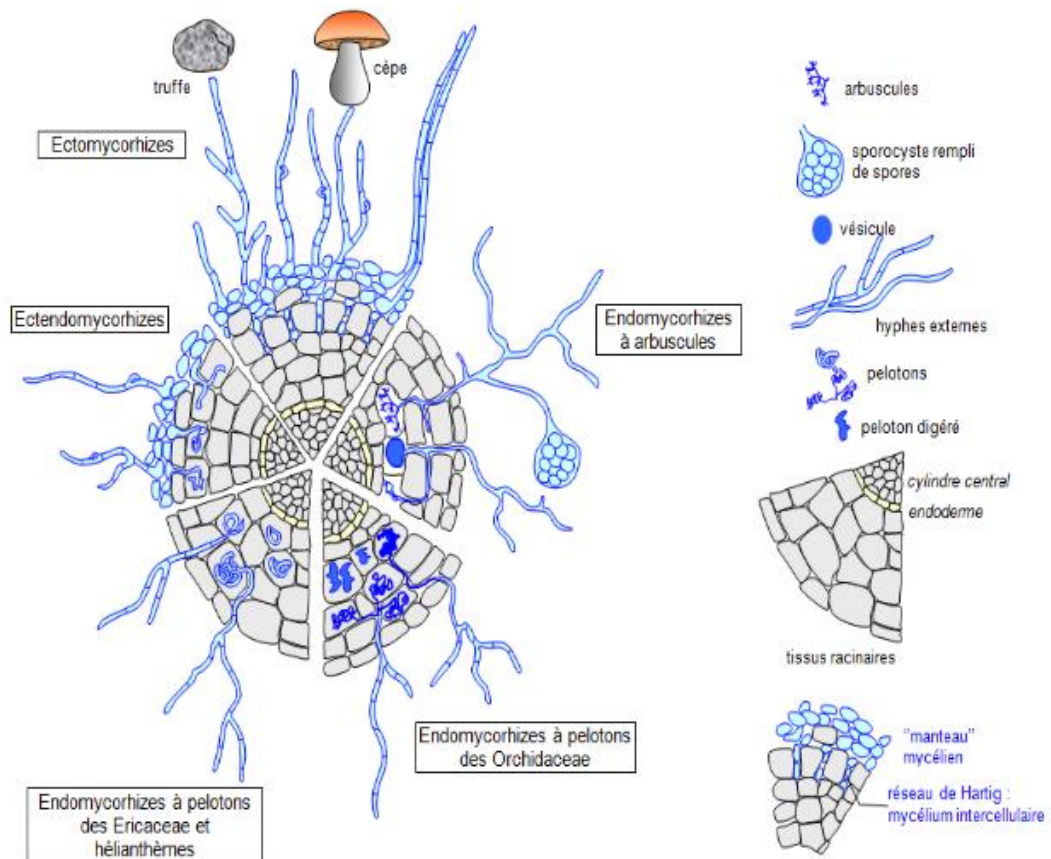


Figure 2 : Schéma des principaux types de mycorhizes représentés sur une coupe transversale de racine d'après Le Tacon (1985).

- Les mycorhizes éricoïdes

Les mycorhizes éricoïdes sont exclusivement formés par les plantes appartenant à l'ordre des éricales (*Ericaceae*, *Epacridaceae*, et *Empetraceae*). Le champignon pénètre l'épiderme et forme des pelotons mycéliens. Les champignons impliqués sont principalement des ascomycètes et quelques Basidiomycètes (Perotto *et al.*, 2002). Les plantes formant des mycorhizes éricoïdes se rencontrent surtout dans des milieux sujets à l'entourbement (Fortin *et al.*, 2016).

-Les mycorhizes des orchidées

Ces mycorhizes sont uniques du fait qu'elles surviennent seulement chez la famille des Orchidacées (Peterson *et al.*, 2004). Leur principale caractéristique est la formation de pelotons d'hyphes cloisonnés dans les cellules corticales (Paek & Murthy, 2013). Les champignons impliqués sont principalement les Basidiomycètes (Berch *et al.*, 2009). Il en existe plus de 100 espèces (Raven *et al.*, 2000).

-Les mycorhizes arbusculaires

Les mycorhizes arbusculaires sont la forme la plus répandue d'endomycorhizes. Le champignon forme dans l'écorce de la racine des vésicules elliptiques et des hyphes intracellulaires finement ramifiées en arbuscules qui représentent des suçoirs (Dar, 2010).

1.2 La symbiose mycorhizienne arbusculaire

L'association entre les plantes terrestres et les champignons mycorhiziens à arbuscules (CMA) est très ancienne et l'histoire de l'évolution des plantes terrestres est étroitement liée avec l'évolution des CMA. Les CMA étaient quasiment des facteurs clé dans la colonisation des plantes terrestres (Smith & Read, 2008). Les preuves de l'existence de Glomeromycètes proviennent de spores et hyphes observés dans les fossiles de l'Ordovicien, il y a environ 460 millions d'années (Redecker *et al.*, 2000). Des structures ressemblant à celles des arbuscules dans des plantes fossiles du Dévonien indiquent la probable présence des associations de champignons arbusculaires (Remy *et al.*, 1994).

Les CMA se retrouvent chez plus de 70% des espèces végétales vasculaires terrestres actuelles, en plus de nombreuses mousses et hépatiques, on trouve les mycorhizes arbusculaires chez les fougères, les lycopodes, plusieurs conifères et la majorité des plantes à fleurs, mono et dicotylédones (Fortin *et al.*, 2008).

1.2.1 Structure des champignons mycorhiziens à arbuscules

Leur structure morphologique comprend des arbuscules, des vésicules, cellules auxiliaires, hyphes et spores (Figure 3). Ces structures sont formées à l'intérieur des racines des plants. Les hyphes et les spores peuvent être également formés à l'extérieur des racines, dans la rhizosphère

et créent une surface de contact entre les cellules des racines des plantes, les structures CMA et les ressources du sol (Smith & Read, 2008).

1.2.1.1 Les arbuscules : Ce sont des structures fongiques qui se développent dans les cellules corticales des racines, ce sont des invagination des hyphes finement divisées, ramifiées de manière dichotomique, au niveau desquelles ont lieu les échanges nutritionnels, et plus précisément dans l'espace péri-arbusculaire (apoplasme) qui sépare les cellules végétales et fongiques (Teotia *et al.*, 2017 ; Drain *et al.*, 2017).

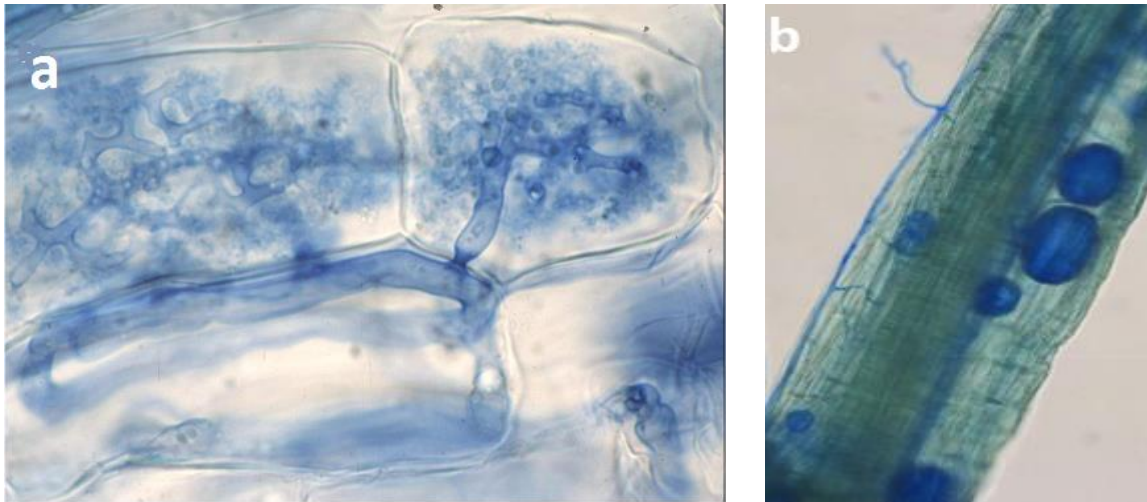


Figure 3 : Structures des mycorhizes à arbuscules. (a) Structure d'un arbuscule (Schüßler & Walker, 2010), (b) Structures d'hyphes et vésicules dans le cortex racinaire (Müller *et al.*, 2017).

Le champignon ne cherche pas à envelopper les cellules de l'hôte, comme c'est le cas avec les ectomycorhizes, mais y pénètre de façon subtile, sans trop en perturber les structures (Fortin *et al.*, 2016). Deux types d'arbuscules sont reconnus, le type *Arum*, où le champignon forme des hyphes intercellulaires denses au niveau des espaces entre les cellules corticales et invaginent les cellules pour former les arbuscules, et dans le type *Paris* au contraire, la colonisation se fait directement de cellule à cellule dans la racine (Shah, 2014).

Les arbuscules signifient littéralement « petits arbres », ils durent environ 2 à 3 semaines et ensuite développent une apparence granuleuse lorsqu'ils dégénèrent (Ravichandra, 2014).

1.2.1.2 Les vésicules : Ce sont des structures ovales ou lobées irrégulièrement, aux parois fines et contenant des lipides, produites sur les hyphes dans le cortex racinaire et servent d'organe de stockage au champignon (Kapoor *et al.*, 2012 ; Ravichandra, 2014). Lorsqu'elles sont âgées, elles servent de structure de reproduction (Teotia *et al.*, 2017).

1.2.1.3 Les spores : Les spores sont produites sur le mycélium externe des mycorhizes arbusculaires, à l'extrémité des hyphes (Garbaye, 2013). Elles sont composées d'une paroi extérieure, une paroi intérieure et de structures de pré-germination (Souza, 2015).

Chez beaucoup d'espèces, la paroi des spores est simple et ne diffère pas fondamentalement des parois des hyphes (chlamydospores glomoides), cependant, chez d'autres genres, les spores ont plusieurs parois, développent des boucliers de germination complexes, et ne sont presque pas homologues avec les spores glomoides (Pöggeler & Wöstemeyer, 2011).

Leurs tailles varient de 22 à 1050 μm de diamètre. Ce sont les plus larges spores produites dans le royaume *Fungi* (Souza, 2015). Elles contiennent des réserves nutritives lipidiques sous forme de gouttes huileuses et un grand nombre de noyaux (de 800 à 35000 noyaux haploïdes par spore) (Garbaye, 2013).

Les spores sont transportées via plusieurs vecteurs, dont le vent, les rongeurs (Allen et al., 1993), les vers de terre, les microarthropodes (Klironomos & Moutoglis, 1999) et même en dispersion anthropique (Schwartz *et al.*, 2006).

1.2.2 Cycle de vie des CMA

Le cycle de vie des CMA commence par une étape pré-symbiotique au cours de laquelle se déroule un échange de signaux diffusibles produits par le champignon et les racines. Les plantes produisent des exsudats racinaires capables d'activer l'activité métabolique et une ramification intense des hyphes du champignon. Les champignons sécrètent eux aussi des signaux diffusibles induisant notamment dans les cellules végétales des variations de concentration en calcium dans le cytosol et le noyau, la régulation transcriptionnelle de gènes et la ramification des racines. La germination des spores se fait de façon asynchrone, l'ensemble des étapes qui suivent sont donc elles aussi non synchronisées à l'échelle de la plante (Genre *et al.*, 2005, 2008 ; Bothe *et al.*, 2010).

Ensuite commencent les étapes symbiotiques au cours desquelles le champignon forme un hyphopode ou appressorium au contact de l'épiderme (Figure 4). Ce dernier représente le point d'accroche du champignon à la racine et son futur point de pénétration (Bothe *et al.*, 2010). Dans la cellule épidermique située sous l'hyphopode, un appareil de pré-pénétration (PPA) est mis en place qui correspond à un réarrangement polarisé du cytoplasme et du cytosquelette. Il permet la formation d'un pont apoplasmique endocellulaire à travers duquel le champignon va se développer pour traverser les différentes couches cellulaires jusqu'aux cellules corticales (Genre *et al.*, 2005, 2008).

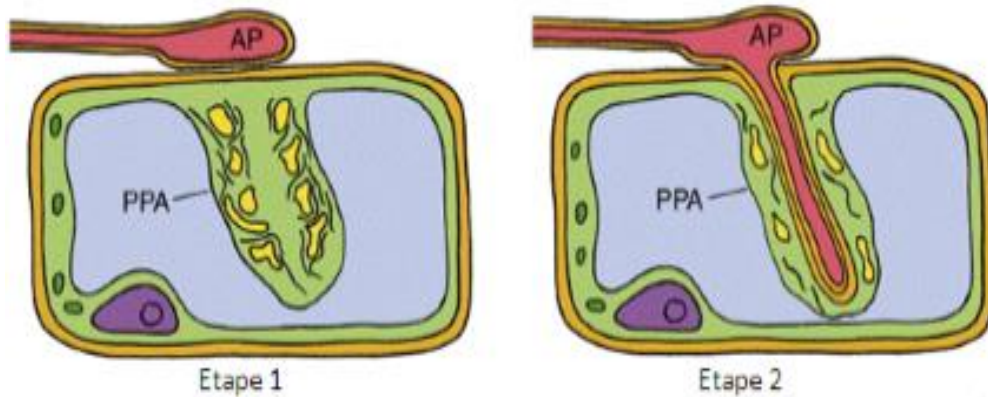


Figure 4 : Formation de l'appressorium (Reinhardt, 2007).

Après avoir atteint le cortex racinaire, les hyphes internes forment des arbuscules au sein des cellules végétales (Drain *et al.*, 2017) (Figure 5). Le développement de ces champignons n'est pas confiné à la seule racine, comme chez les bactériorhizes (*Rhizobium*) et les actinorhizes (*Frankias*). A partir de ce point d'ancrage dans la racine, le champignon mycorhizien arbusculaire développe dans le sol une phase dite extraradicale, qui s'étend en un réseau mycélien et envahit le sol adjacent, dans toutes les directions. Ce mycélium de très fine dimension offre une surface considérable de contact avec le sol (Fortin *et al.*, 2016 ; Bothe *et al.*, 2010). Le sol environnant et d'autres racines potentielles peuvent alors être colonisés, formant un large réseau mycélien (Angelard & Sanders, 2013).

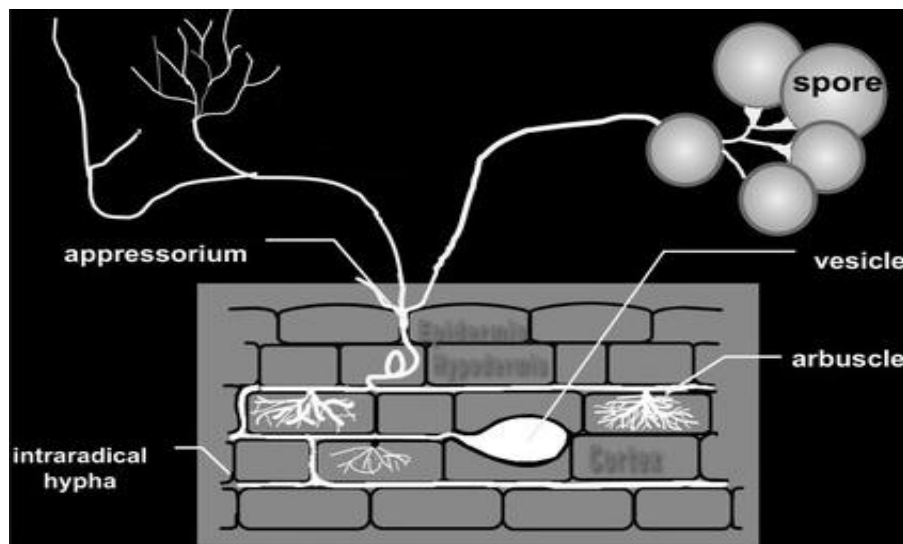


Figure 5 : Schéma de la colonisation par les champignons mycorhiziens à arbuscules (Bothe *et al.*, 2010).

La relation étroite des CMA avec leurs plantes hôtes se reflète par leur statut biotrophe obligatoire. En l'absence d'un hôte, leur croissance est limitée à une durée relativement courte (20 à 30 jours), après quoi de nombreuses modifications de morphologie fongique qui se traduisent par un arrêt de la croissance des hyphes. La présence de la racine permet donc le développement de mycélium végétatif (Rai, 2006).

1.2.3 Classification des Glomeromycètes

Les champignons de ce Phylum sont connus pour former des mycorhizes arbusculaires. Historiquement, la plupart des espèces de ce phylum ont été décrites et nommées à partir de la morphologie de leurs spores. Récemment, des analyses moléculaires ont mené au déplacement des CMA du phylum des Basidiomycètes, au nouvel embranchement qui leur a été créé, les Gloméromycètes (Schüßler & Walker, 2010) (Figure 6).

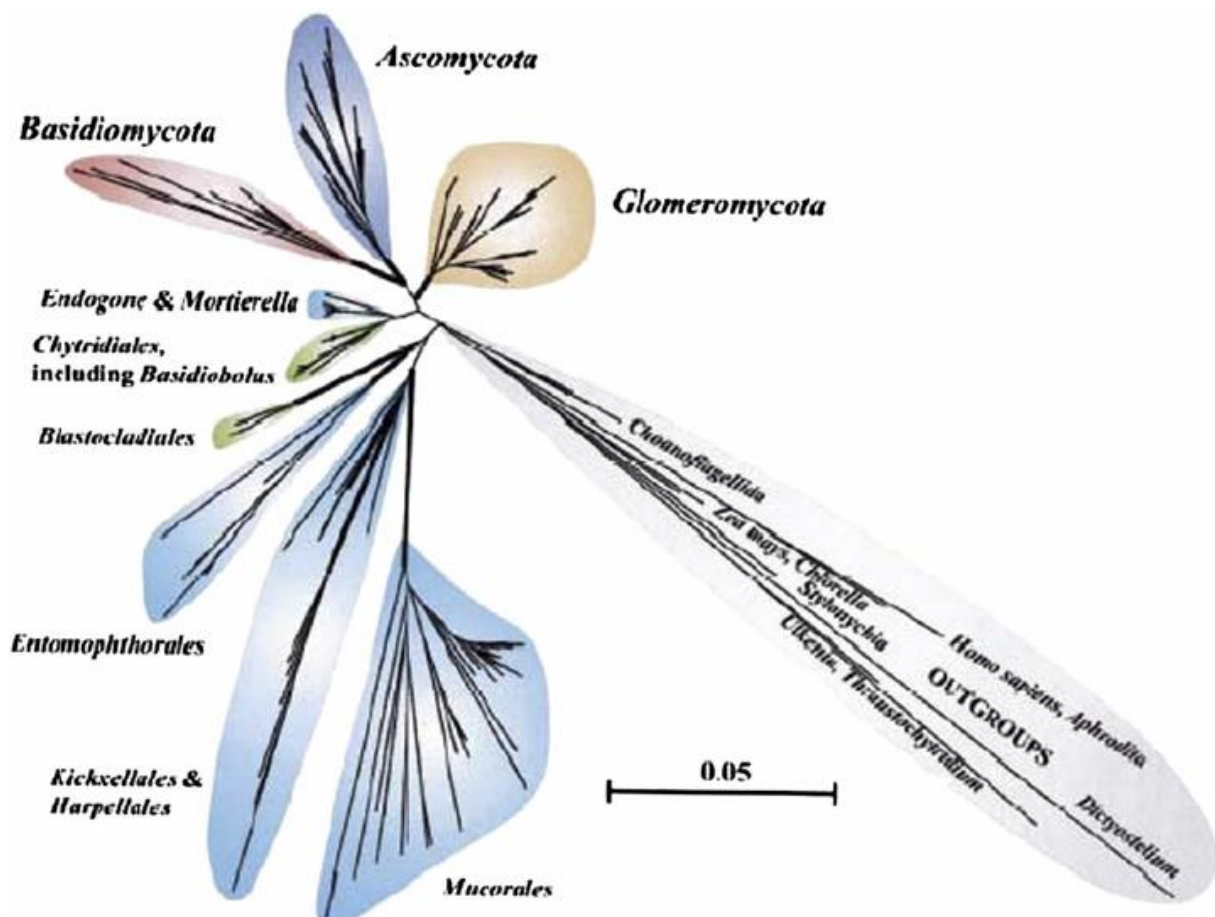


Figure 6 : Phylogénie des *Fungi* (Schüßler *et al.*, 2001).

Des analyses morphologiques et moléculaires ont également mené à des découvertes majeures dans l'organisation taxonomique du Phylum *Glomeromycota* (Oehl *et al.*, 2011) (Figure 7). Ce Phylum comprend les ordres suivants : ***Glomerales***, ***Diversisporales***, ***Paraglomerales***, ***Archaeosporales***, ***Familia incertae sedis***.

Les ***Glomerales*** comprennent les familles ***Glomeraceae*** (*Glomus*, *Funneliformis*, *Sclerocstis*, *Rhizophagus*) et ***Claroideoglomeraceae*** (*Claroideoglomus*).

Les ***Diversisporales*** sont composées des familles ***Gigasporaceae*** (*Gigaspora*, *Scutellospora*, *Racocetra*), ***Acaulosporaceae*** (*Acaulospora*), ***Pacisporaceae*** (*Pacispora*) et ***Diversisporaceae*** (*Diversispora*, *Otospora*, *Redeckera*).

Les ***Paraglomerales*** comprennent les ***Paraglomeraceae*** (*Paraglomus*).

Les ***Archaeosporales*** comprennent les ***Geosiphonaceae*** (*Geosiphon*), ***Ambisporaceae*** (*Ambispora*) et ***Archaeosporaceae*** (*Archaeospora*).

Familia incertae sedis comprend les ***Entrophosporaceae*** (*Entrophospora*). (Redecker & Schüßler, 2014).

Par conséquent, les espèces *Glomus mosseae*, *Glomus constrictum* et *Glomus intraradices* ont été appelées : *Funneliformis mosseae*, *Septoglomus constrictum* et *Rhizophagus irregularis*, respectivement.

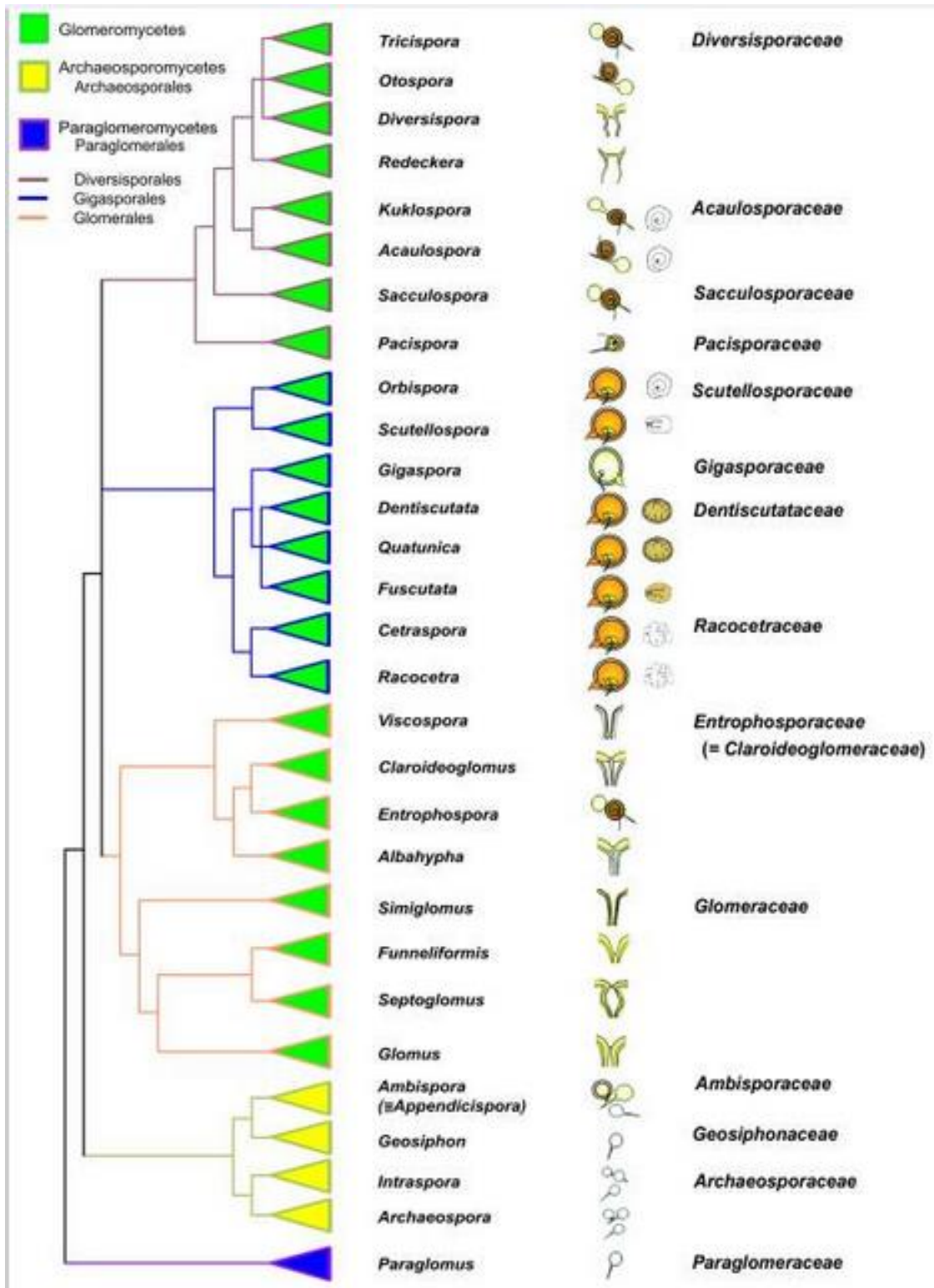


Figure 7 : Arbre phylogénétique des *Glomeromycota* basé sur les analyses moléculaires et morphologiques. (Les dessins dans les colonnes centrales montrent les types de formation de spores des genres et les boucliers de germination typiques chez ces genres) (Oehl *et al.*, 2011).

1.2.4 Importance des CMA

Les CMA jouent un rôle important dans la nutrition minérale et hydrique des plantes, se traduisant par l'augmentation de la croissance, de la résistance et la tolérance aux stress biotiques et abiotiques (Souza, 2015).

L'augmentation de la croissance se produit dans les sols de tous types d'environnements. Les champignons mycorhiziens utilisent divers mécanismes pour promouvoir la croissance et le développement de la plante. Ces mécanismes varient selon les espèces et dépendent des conditions de sols. Certains de ces mécanismes incluent la production de phyto-hormones et métabolites dont les vitamines et les amino acides, la solubilisation des minéraux, la colonisation des racines, production d'osmolites, et amélioration de la structure du sol (Nadeem *et al.*, 2017).

1.2.4.1 Absorption des éléments nutritifs

Grace à sa capacité à améliorer la nutrition des plantes, cette association leur est très utile étant donné qu'elle maintient leur croissance dans un environnement limité en nutriments (Nadeem *et al.*, 2017).

Le phosphore (P) est un macronutriment qui est un composant essentiel des acides nucléiques, phospholipides (Turner *et al.*, 2002). Il aide dans le développement des racines, dans la floraison précoce et dans la maturation. Il est mobile dans les plantes mais pas dans le sol (Gowariker *et al.*, 2009).

Les CMA sont impliqués dans la facilitation de l'absorption du phosphore pour les plantes en augmentant le volume de leur réseau d'hyphes mycéliens, ce qui permet une plus grande exploration du volume du sol. Des transporteurs de phosphate du sol à la plante sont impliqués dans l'association des mycorhizes arbusculaires avec les racines des plantes (Harrison & van Buuren, 1995).

L'azote (N) fait partie intégrante de beaucoup de composés biologiques importants comme les acides aminés, protéines, acides nucléiques, chlorophylle et beaucoup d'autres biomolécules (Larcher, 2003). Étant donné le rôle central de l'azote dans la synthèse des protéines, il est vital que la plante absorbe le plus d'azote possible (Scott, 2013). Dans ce cadre, les CMA permettent une meilleure assimilation de l'azote chez la plante hôte (Javaid, 2009). En plus des transporteurs de phosphate, les transporteurs d'ammonium sont également présents chez les CMA (Nadeem *et al.*, 2017).

Aujourd'hui il est reconnu qu'en plus du P et du N, d'autres macro et microéléments sont également transférés à la plante à travers la symbiose avec les CMA (Siddiqui *et al.*, 2008).

Le potassium (K) est un cation jouant un rôle majeur dans plusieurs fonctions chez les plantes. Ses fonctions dans l'osmorégulation, l'équilibre cation-anion, la stabilisation du pH, et son rôle dans l'activation de beaucoup d'enzymes sont impliqués dans plusieurs étapes clé dans la synthèse de protéines (Hsiao & Lauchli, 1986). Il aide également la plante à absorber l'eau plus efficacement, et joue un rôle dans le processus de la transpiration au niveau des feuilles (Woodford, 2003).

Bien que le rôle des CMA dans la nutrition des plantes en K ait été très peu étudié en comparaison avec le P, il existe des évidences indiquant que les CMA peuvent y jouer un rôle important (Meena *et al.*, 2016). Les transporteurs impliqués dans le transport du K ne sont toujours pas caractérisés (Garcia & Zimmermann, 2014).

Comme l'azote, le soufre est un composant vital des protéines, il entre dans la composition des acides aminés cystéine et méthionine. Ces acides aminés sont eux-mêmes précurseurs d'autres composés essentiels tels que les vitamines (Giovanelli, 1990). Il est essentiel dans la production de chlorophylle, et sa mobilité est grande dans la plante mais limitée dans le sol (Gowariker *et al.*, 2009).

Le calcium (Ca) est un micronutriment essentiel chez les plantes. Il joue des rôles structuraux dans les parois cellulaires et les membranes, et contribue au transport des ions à travers la membrane plasmique. Il est également un messenger intracellulaire intervenant dans plusieurs réponses des plantes aux divers stimuli (Shi, 2007).

Le manganèse (Mn) est un important microélément entrant dans la composition des métalloprotéines impliquées dans la respiration et la photosynthèse. Il est requis dans les activités de nombreuses enzymes et il est nécessaire dans la maintenance des structures des chloroplastes (Sarkar, 2009).

Le cuivre (Cu) est un des composants des protéines et joue un rôle important dans plusieurs réactions redox et le zinc (Zn) est nécessaire dans les activités enzymatiques chez les plantes (Evans *et al.*, 2003).

Les CMA absorbent le zinc et le cuivre afin d'augmenter la croissance des plantes et leur résistance aux pathogènes (Reddy, 2016), et augmentent également l'absorption du calcium, du soufre et du manganèse (Raghothama, 2000).

1.2.4.2 Absorption de l'eau

Les CMA peuvent influencer les relations plante-eau par plusieurs mécanismes. Ces mécanismes incluent l'implication d'hormones, la stimulation d'échanges de gaz, l'augmentation de surfaces de contact entre le champignon mycorhizien et le sol conduisant à une meilleure absorption de l'eau et des éléments minéraux (Augé, 2001).

1.2.4.3 Glomaline et agrégation des sols

Les CMA contribuent à la stabilisation des agrégats des sols par le mycélium extra-racinaire qui colonise le sol (Wright & Upadhyaya, 1998). Le mycélium secrète en abondance une glycoprotéine appelée Glomaline. Du fait de son caractère à la fois hydrophobe, stable, collant et complexant les métaux, la Glomaline joue un rôle essentiel dans la stabilité et la fertilité des sols (Garbaye, 2013), en augmentant l'hydrophobicité et la stabilité des micro-agrégats (Rillig *et al.*, 2010).

1.2.4.4 Protection contre les pathogènes

Il est maintenant reconnu que les CMA peuvent protéger les plantes contre un grand nombre d'agents pathogènes et de parasites, principalement à travers des changements dans la nutrition de la plante hôte et de la résistance systémique induite (Comby *et al.*, 2017). Certains processus biochimiques induits au niveau des racines pourraient être liés au rôle protecteur des CMA. La protection des plantes contre les pathogènes peut également dépendre des effets synergiques des agents pathogènes du sol (Perrow & Davy, 2002).

1.2.4.5 Résistance aux stress environnementaux

Les CMA ont une grande importance dans la résistance des plants contre les différents stress biotiques et abiotiques. Sous le stress de la sécheresse, les CMA stimulent la croissance des plantes et augmentent leur survie (Wu & Zou, 2017). Ils améliorent leur croissance et leur rendement sous stress salin et semblent leur apporter nombreux avantages lorsqu'elles sont soumises au stress osmotique (Augé *et al.*, 2014). Les CMA atténuent également les effets des métaux lourds (Miransari, 2011) et améliorent la tolérance au stress de la température (Zhu *et al.*, 2017).

2 Challenges de l'agriculture moderne

Durant les dernières décennies, la production et les rendements agricoles suivant la croissance de la population ont augmenté de pair avec la consommation globale de fertilisants et pesticides qui ont conduit à de nombreux problèmes environnementaux (Knudsen *et al.*, 2006). Par conséquent, l'agriculture moderne devra faire face à ces problèmes afin d'assurer une production plus durable, ces défis sont :

2.1 Répondre à la demande mondiale en aliments

Selon l'ONU (2015), la population mondiale est estimée à 7,3 milliards et devrait atteindre les 8,5 milliards de personnes d'ici 2030.

Une telle augmentation de la croissance de la population va intensifier la pression sur la base de ressources naturelles du monde (la terre, l'eau et l'air) pour obtenir une plus grande production d'aliments. L'augmentation de la production alimentaire pourrait être atteinte en élargissant les superficies agricoles et en augmentant les rendements par unité de surface grâce à l'agriculture intensive (Baligar, 2001).

Pour répondre à cette demande, la production alimentaire mondiale devra augmenter de 70 % d'ici 2050. Pour atteindre ce but, l'agriculture des pays en voie de développement et des pays développés devra fortement s'intensifier (FAO, 2014).

Dans les pays émergents, en l'occurrence en Afrique du nord, le taux de la demande en N, P, K ne cessera d'augmenter par rapport aux pays développés (FAO, 2015).

2.2 Réduire la dépendance aux engrais

Les engrais sont essentiels pour un rendement optimal des plantes cultivées. Il a été observé que les terres nouvellement défrichées pour l'agriculture exigent également l'application de tous les types d'engrais tels que N, P, K pour améliorer la qualité du sol et le rendement global. Cependant, les effets néfastes sur l'environnement résultant de l'utilisation excessive de ces engrais sont connus, d'où l'intérêt de la recherche biotechnologique sur la réduction de la dépendance des cultures aux engrais chimiques (Bagchi, *et al.*, 2010).

2.2.1 Augmenter l'efficacité dans l'absorption des nutriments

Les estimations de l'efficacité globale des engrais appliqués sont d'environ 50% ou moins pour le N, moins de 10% pour le P, et près de 40% pour le K (Baligar & Bennett, 1986).

Ces faibles efficacités sont dues à des pertes importantes de nutriments par lessivage, ruissellement, émissions gazeuses et par la fixation par le sol. Ces pertes peuvent potentiellement contribuer à la dégradation des sols et de la qualité de l'eau et, éventuellement, conduire à une dégradation environnementale globale. Ce sont des raisons impérieuses de la nécessité d'augmenter l'efficacité de l'absorption des nutriments par les plantes (Baligar, 2001).

2.2.2 Prendre en compte le phosphate comme ressource non renouvelable

Les engrais phosphatés sont fabriqués à partir des roches phosphatées qui sont une ressource non-renouvelable faisant l'objet de préoccupations relatives à la sécurité alimentaire mondiale et la prise de conscience de ce caractère non-renouvelable de la ressource en P (Pellerin *et al.*, 2014). Cordell *et al.*, (2009) estiment que la production des réserves actuelles (les gisements de roches phosphatées qui sont jugées économiquement disponibles pour l'extraction et la transformation) atteindra un pic, à savoir le moment à partir duquel les réserves vont s'épuiser et donc la production va diminuer, ce qui pourrait avoir lieu entre 2030 et 2040. Cependant les experts considèrent de plus en plus souvent que l'étendue de ces réserves est sous-estimée (van Kauwenbergh, 2010). van Vuuren *et al.*, (2010) affirment il n'y a aucun signe d'épuisement à court et moyen terme. Cependant, à plus long terme, l'épuisement des ressources à bas prix et de haute qualité auront des conséquences pour les futures tendances de production. La base totale des ressources serait épuisée au cours du 22ème siècle. Les défenseurs de la théorie du pic du phosphore soutiennent que, même si l'échéance peut varier, le problème fondamental ne changera pas pour autant, à savoir que la disponibilité du phosphore bon marché et facilement accessible n'est pas inépuisable (PNUE, 2011).

3 Impact de l'agriculture moderne sur l'environnement et sur les mycorhizes et pratiques contribuant à leur restauration

3.1 Impacts environnementaux des engrais

L'utilisation excessive d'engrais synthétiques est nocive pour l'environnement, ouvre la voie à la détérioration de la santé du sol et s'en suivent les effets néfastes sur les plantes et l'être humain. La plupart des engrais appliqués dans le sol sont lessivés vers le bas en dessous de la zone des racines ou dans les eaux souterraines, causant leur pollution (Choudhry, 2005).

Les engrais causent l'enrichissement des eaux douces et marines côtières, et représentent la première source d'eutrophisation, principalement l'apport en N et P, qui sont les facteurs de croissance pour les algues. L'eutrophisation des eaux conduit, dans un premier temps, à la prolifération d'un grand nombre d'organismes photosynthétiques (producteurs primaires tels que le phytoplancton), servant de nourriture à de nombreux organismes hétérotrophes, qui consomment l'oxygène nécessaire à une abondante faune aquatique. Il y a déstabilisation de l'écosystème jusqu'à la disparition, souvent temporaire, de la plupart des organismes. La zone est alors dite morte (Dutuit & Gorenflot, 2016).

En Algérie, à l'Ouest, au barrage Hammam Boughrara (Tlemcen), des analyses physico-chimiques ont révélé des concentrations élevées de certaines variables telles que Cl, SO₄, NH₄, NO₂, Na, P, DBO₅ et DCO, ce qui caractérise des eaux fortement minéralisées, polluées et séléniteuses (Bouزيد-Lagha & Djelita, 2011).

Dans le Nord-Est, les engrais ont largement contribué à la pollution des eaux superficielles notamment aux barrages de Mexa et Chefia, situés près d'El Tarf (Harrat & Achour, 2010), du barrage de Hamam Grouz (Boudoukha & Boulaarak, 2013), des rivières de Kébir Est et Bounamoussa (Derrardji *et al.*, 2007) et des oueds Seybouse et Mellah, où des analyses chimiques ont témoigné d'une eutrophisation avancée pour ce dernier (Chaoui *et al.*, 2013).

Outre le problème de l'eutrophisation due à la fuite de l'excès de phosphore dans les cours d'eau, la production d'engrais du phosphate de roche implique d'importantes émissions de carbone, sous-produits radioactifs et des métaux lourds polluants (Cordell *et al.*, 2009).

La libération des gaz à effets de serre, la destruction de la couche d'ozone, le réchauffement climatique et les pluies acides sont signalés comme étant des impacts négatifs de la fertilisation (Adeemoye & Kloepper, 2009).

3.2 Diminution de la biodiversité

Le sol est un écosystème à part entière contenant une quantité et une variété de populations microbiennes dont les membres présentent beaucoup de types physiologiques. Cette communauté microbienne du sol est importante en raison de sa relation à la fertilité du sol et les cycles biogéochimiques des éléments (Germida & Freitas, 2007).

Aujourd'hui on observe une diminution de la quantité et de la diversité des formes de vie dans les sols. Dans les agrosystèmes, le travail du sol et les amendements ont conduit à la limitation de la diversité des conditions physico-chimiques de surface des sols (Citeau *et al.*, 2008).

L'utilisation prolongée des engrais affecte les propriétés structurales et fonctionnelles des communautés microbiennes dans le sol, notamment les populations bactériennes et favorise la dominance de certaines espèces (Prashar & Shah, 2016).

3.3 Impact des pratiques culturales sur les mycorhizes

La gestion des cultures implique une série de pratiques tels que la fertilisation, le travail du sol, les pesticides, la rotation des cultures, qui peuvent avoir un impact direct sur les champignons mycorhiziens à arbuscules, en endommageant ou en tuant cette association, et indirectement, en créant des conditions défavorables à leur développement (Hamel, 1996 ; Gosling *et al.*, 2006).

L'intensité accrue de l'utilisation des terres est corrélée à une diminution de la richesse des espèces des CMA et à une sélection préférentielle des espèces qui colonisent lentement les racines mais qui forment rapidement des spores (Oehl *et al.*, 2003).

3.3.1 La fertilisation

La fertilisation altère les communautés des CMA dans le sol (Qin *et al.*, 2015) et entraîne la dominance de certains taxons de CMA (Schneider *et al.*, 2015). L'application à long terme des engrais minéraux tend également à sélectionner les communautés des CMA qui sont moins bénéfiques pour la plante hôte (Kiers *et al.*, 2002).

L'interaction entre P et N affectent différemment la germination des spores, la croissance des racines et la longueur des racines colonisées (Bressan, 2001). Blanke *et al.*, (2005) ont démontré que l'application de N diminue la colonisation mycorhizienne des racines dans un sol industriellement pollué et très enrichi en P. Bhadalung *et al.*, (2005) ont montré que la fertilisation à base d'azote et de phosphore à long terme cause une diminution dans le nombre total de spores de CMA et que la diversité des espèces de CMA variait selon le temps d'échantillonnage.

Cependant, d'autres études ont affirmé que la fertilisation n'est pas toujours préjudiciable à la biodiversité CMA (Schalamuk *et al.*, 2006).

3.3.2 Les rotations de culture

Les rotations de cultures sont importantes dans le maintien et l'amélioration de la qualité du sol. La densité des spores et des hyphes de CMA et leur capacité à coloniser les racines sont plus importantes dans des sols avec des plantes formant une symbiose avec les CMA par rapport à des sols nus ou avec des plantes non mycorhiziennes (Jansa *et al.*, 2002). La densité des spores

et des hyphes CMA, la colonisation racinaire peuvent varier d'une plante hôte à une autre (Hendrix *et al.*, 1995).

Douds & Millner (1999) ont affirmé que les rotations affectaient la composition des populations de spores de CMA ce qui a pour effet la diminution du taux de colonisation des racines des plants (Castillo *et al.*, 2006). Les changements dans l'efficacité et la composition des communautés CMA par les rotations de cultures peuvent affecter les avantages de la symbiose CMA conférée aux cultures (Jansa *et al.*, 2006).

3.3.3 Le travail du sol

Les pratiques agricoles peuvent influencer directement ou indirectement la biodiversité des CMA (Alguacil *et al.*, 2008). Curaqueo *et al.*, (2010) ont observé des valeurs plus élevées dans la longueur des hyphes de CMA, la teneur en Glomaline et la stabilité des agrégats du sol étaient observées chez les sols non labourés, en comparaison avec les sols labourés.

Dans une expérience à long terme sur terrain en Suisse, Jansa *et al.*, (2002) ont montré que la structure de la communauté CMA était également affectée significativement par le traitement du travail du sol. En effet, le travail du sol a eu une influence significative sur la sporulation de certaines espèces et certaines espèces avaient tendance à être plus abondantes dans le sol non labouré.

3.3.4 Les pesticides

L'effet des biocides, dont les fongicides, sur les CMA est complexe et des études ont montré des impacts sur l'abondance et la fonction des CMA, allant de négatifs à positifs. Cependant, Udaiyan *et al.*, (1999) ont étudié l'impact de 6 pesticides aux doses recommandées sur les mycorhizes de 3 céréales en conditions de champ. Tous les pesticides ont réduit la colonisation par les CMA, mais l'impact de chaque pesticide différait souvent entre chaque plante hôte.

Dans une autre étude menée sur l'effet de pesticides sur les CMA dans la production de la fraise, la fumigation du sol avec le pesticide Dazomet a mené à l'éradication des propagules indigènes des CMA et leurs taux de colonisation n'ont pas réussi à atteindre des taux suffisants même après 1 an (Mark & Cassells, 1999).

3.3.5 La sélection génétique des nouveaux cultivars

Certains cultivars ont «évolué» de dépendants aux CMA, à non dépendants ou facultativement mycotrophiques. De nouvelles variétés sélectionnées dans des conditions d'apport élevé de P se sont avérées être encore plus dépendantes de la symbiose que les variétés plus anciennes, lorsqu'elles sont cultivées dans des sols pauvres en nutriments (Estaún *et al.*, 2010).

3.4 Les CMA solution agro-écologique

De nouvelles mesures visant à assurer la durabilité de l'agriculture et des services des écosystèmes seront cruciales afin de répondre aux exigences de l'amélioration des rendements sans compromettre l'intégrité de l'environnement ou la santé publique (Tilman, 2002). Cela signifie l'intégration du développement de stratégies de gestion des cultures qui optimisent l'impact des microbes bénéfiques, comme les champignons mycorhiziens à arbuscules, dans la production végétale (Gianinazzi *et al.*, 2010).

3.4.1 Les inoculants mycorhiziens commerciaux

L'inoculation permet de fournir un grand nombre de microorganismes viables, efficaces dans la rhizosphère peu après la germination des graines pour optimiser la compétition avec les communautés indigènes moins efficaces, par les microorganismes introduits. La mise au point de technologies d'inoculation adéquates pour appuyer les potentiels des biofertilisants à base de micro-organismes est un défi (Arora *et al.*, 2016).

Le nombre d'entreprises produisant des inocula à base de champignons mycorhiziens a augmenté dans le monde dans la dernière décennie. En Europe, approximativement 15 moyennes / petites entreprises produisent les champignons mycorhiziens (Vosatka *et al.*, 2012). Les inoculants sont généralement fournis sous forme de granulés faits de tourbe, compost, vermiculite, perlite, sable, et/ou de l'argile et contiennent des spores, des racines colonisées, des segments d'hyphes, ou le mélange des trois. Il existe également des formulations liquides, contenant seulement des spores. Les espèces CMA les plus utilisées dans les inocula commerciaux sont *Rhizophagus sp.* (Anciennement *Glomus intraradices*) et d'autres espèces *Glomus* (Arora *et al.*, 2016).

3.4.2 Défi futur de l'utilisation des CMA dans la production agricole

Le défi futur de l'utilisation des champignons mycorhiziens dans la production agricole sera d'optimiser les combinaisons entre les cultures et les inocula à base de champignons

mycorhiziens, méthodes d'inoculation et les propriétés du sol ou des substrats pour l'établissement des mycorhizes et leur utilisation (Ortas *et al.*, 2017).

La dépendance mycorhizienne des plants à cultiver devrait être évaluée dans des conditions réelles de champs, et l'utilisation des inocula sélectionnés doivent être étudiés et évalués par rapport à des plants non-mycorhizés mais également par rapport à des plants cultivés avec une colonisation mycorhizienne indigène (Estaun *et al.*, 2002).

Si la recherche démontre la capacité des CMA à atteindre une production optimale tout en utilisant moins de ressources externes dépendantes d'énergie, ils seraient alors considérés comme des éléments significatifs dans les systèmes agricoles éco-efficaces (Atkinson, 2009).

4 Application des CMA en Algérie

En Algérie, l'application des CMA en agriculture est inexistante et peu connue. Elle se limite à peu d'études ayant montré le potentiel bénéfique de l'inoculation chez certaines cultures.

4.1 Etudes menées sur l'application des CMA en agriculture en Algérie

L'olivier (*Olea europea* L.) a fait l'objet d'inoculation dans deux études où l'efficacité de CMA natifs a été remarquable dans l'augmentation de la croissance des plantules d'olivier et leur résistance au stress de la transplantation (Meddad-Hamza *et al.*, 2010 ; Sidhoum & Fortas, 2013).

Des travaux non-publiés ont également montré l'effet positif en situation de production agricole des CMA, notamment sur la croissance du blé dur et tendre (Belabed communication personnelle), le rendement du haricot nain (Amrani communication personnelle), la croissance et le rendement de la pastèque (Hamza communication personnelle) et de la pomme de terre (Ksentini communication personnelle). Cependant, aucune étude n'a été faite sur l'application des CMA dans la culture de la tomate en Algérie.

4.2 L'agriculture biologique en Algérie

En Algérie, ce secteur reste marginalisé et dépourvu d'organisation et l'information reste très fragmentée (Abdellaoui, communication personnelle). La durabilité, la rentabilité de cette agriculture et la proximité des marchés en croissance (Europe) sont des facteurs favorables à l'épanouissement de ce modèle agricole en Algérie. Cependant, une très faible surface en Algérie s'est convertie depuis les années 2000 dans le secteur phonicole (Hadjou *et al.*, 2013).

Dans une logique proche, plusieurs initiatives sont prises en Algérie en faveur d'une agriculture « raisonnée ». Ainsi, l'agriculture de conservation s'est rapidement développée ces dernières années, elle est pratiquée à travers 20 wilayas céréalières du pays sur une superficie qui ne cesse de s'étendre (Hadjou *et al.*, 2013).

L'inoculation mycorhizienne pour une agriculture raisonnée permettrait non seulement d'augmenter la productivité, mais aussi de diminuer les quantités d'engrais chimiques appliqués, en particulier la culture de la tomate industrielle, qui est principalement cultivée au Nord-Est du pays : les wilayas El Tarf, Annaba, Guelma, Skikda représentent à elles seules 90% de la superficie totale consacrée à cette culture en Algérie (Bouزيد & Bedrani, 2013).

5 Généralités sur la tomate industrielle en Algérie

5.1 Tomate industrielle et transformation

Apparue en Algérie dans les années 20, la production et la transformation de la tomate d'industrie destinée à la fabrication de concentré et de produits dérivés sont devenues un ensemble d'activités interdépendantes, stratégiques de par leurs dimensions économiques, sociales et environnementales (Lenne & Branthome, 2006).

La filière tomate industrielle en Algérie mérite une attention particulière. Le concentré de tomate est un composant essentiel dans la cuisine algérienne en particulier, maghrébine et méditerranéenne de façon plus large. De plus, cette filière est la principale dans le domaine agroalimentaire, car les unités de transformation de tomate en Algérie dominent l'activité de transformation de fruits et légumes (Boukella, 1996).

5.2 Superficies

Les superficies consacrées à la production ont augmenté régulièrement jusqu'à la fin des années 1990 : de 5 400 ha dans les années 1971 à 11 750 ha en 1980 pour atteindre le maximum de 35 960 ha en 1999 ; puis elles ont régressé pour se situer aux environs de 12 000 ha en 2009 (Bouزيد & Bedrani, 2013).

Cependant, les pouvoirs publics algériens ont eu la claire volonté d'aider, par des mesures concrètes, les producteurs de tomate industrielle à travers le pays à développer leurs activités ; en octroyant des aides financières, visant à « l'acquisition de nouvelles techniques (de production) plus modernes à même d'intensifier les rendements ». Cette aide a porté ses fruits puisqu'à travers le territoire national, les surfaces dédiées à la culture de la tomate industrielle

ont été largement étendues allant jusqu'à 23 000 ha en 2015, avec une augmentation sensible de la production (Site net 1).

5.3 Rendements

Le rendement a toujours connu une nette amélioration. Durant la période 1971-2009, le rendement est passé de 8 tonnes/ha en 1990 à 32 tonnes/ha en 2009, 40 tonnes/ha en 2011, (Bouزيد & Bedrani, 2013), puis 32 tonnes/ha en 2012 et 48 tonnes/ha en 2015. Cette production a permis de couvrir 80% des besoins (en la matière) du marché national (Site net 1).

L'utilisation d'inoculum CMA permettrait probablement des augmentations de rendements en tomate et l'extension des surfaces qui sont consacrées à cette culture en Algérie. Selon Hamel & Planchette (2007), cela a déjà été possible dans certains pays en voie de développement comme Cuba, où des inoculants mycorhiziens ont été développés en sélectionnant et en testant des souches CMA adaptés à chaque culture et aux types de sols, et en Inde, où un inoculant adapté à la majorité des cultures du pays a été produit, et qui a permis d'augmenter les rendements et de réduire jusqu'à 50% des engrais phosphatés.

5.4 La plante

5.4.1 Description et origine

La tomate est une plante herbacée annuelle sarmenteuse appartenant à la famille *Solanaceae* et est originaire de l'Amérique du sud (Nyabyenda, 2007). Elle est, après la pomme de terre, le légume le plus consommé dans le monde, soit frais soit après transformation. Elle est cultivée sous toutes les latitudes dans des conditions très variées de climat ou de mode de production, ce qui démontre une grande plasticité originelle. La consommation par individu, que ce soit en tomates fraîches ou transformées, ne cesse d'augmenter à l'échelle mondiale (Blancard *et al.*, 2009).

5.4.2 Taxonomie

La taxonomie de la tomate est présentée dans le tableau 1. Bien que les taxonomistes aient récemment réintroduit son nom original, *Solanum lycopersicon*, le nom communément accepté et toujours valide est *Lycopersicon esculentum* Mill. (Heuvelink, 2005) et sera utilisé dans cette thèse.

Tableau 1 : Taxonomie de la tomate établie par Cronquist (1981)

Espèce végétale	: La tomate
Règne	: <i>Plantae</i>
Sous-règne	: <i>Tracheobionta</i>
Division	: <i>Magnoliophyta</i>
Classe	: <i>Magnoliopsida</i>
Sous-classe	: <i>Asteridae</i>
Ordre	: <i>Solanales</i>
Famille	: <i>Solanaceae</i>
Genre	: <i>Lycopersicon</i>
Espèce	: <i>Lycopersicon esculentum</i> Mill., 1763

5.4.3 Exigences

La plante s'est adaptée à une grande diversité de conditions climatiques, allant du climat tempéré vers le climat tropical chaud et humide. La tomate pousse bien sur la plupart des sols minéraux qui ont une bonne capacité de rétention de l'eau et une bonne aération (Naika *et al.*, 2005).

Selon l'institut technique des cultures maraichères et industrielles en Algérie (ITCMI, 2010), cette culture préfère les terres argilo-siliceuses profondes, perméables, riches en humus et une humidité optimale du sol allant de 75 à 80%. Elle pousse le mieux dans des sols où la valeur du pH varie entre 5,5 et 6,8 et où l'approvisionnement en éléments nutritifs est adéquat et suffisant. Elle exige beaucoup de lumière et une température optimale allant de 18 à 25 °C le jour, et de 15 à 16 °C la nuit, en dessous de 15 °C il y a arrêt de la floraison.

5.4.4 Variétés hybrides

Depuis plusieurs décennies, la sélection variétale s'est focalisée sur la création de cultivars hybrides dits F1. Il s'agit d'une variété issue d'un croisement entre deux lignées pures (Polese, 2007). Les variétés de tomates hybrides ont de nombreux avantages par rapport aux variétés résultant de la pollinisation libre. En général, elles donnent un rendement plus élevé et arrivent à maturité plus rapidement et plus uniformément. De nombreux hybrides ont des fruits de meilleure qualité et résistent mieux aux maladies. Avec tous ces avantages, de nombreux agriculteurs préfèrent semer des graines hybrides malgré leur prix plus élevé (Naika *et al.*, 2005), c'est pour cette raison que nous avons travaillé sur des F1.

Les CMA varient dans l'interaction avec leurs hôtes, et cette variation peut être observée même au niveau des variétés (Estaún *et al.*, 2010). Cependant, les variétés hybrides de tomate (F1) répondent positivement à l'inoculation par les CMA, que ce soit dans la croissance et le rendement (Huang *et al.*, 2013) ou la qualité (Ulrichs *et al.*, 2008).

L'inoculation à base de CMA peut montrer ses avantages autant dans l'amélioration des productions que dans le respect de l'environnement en réduisant les taux d'engrais appliqués, comme cela a été possible dans certains pays en développement. Le progrès dans cette biotechnologie en Algérie serait intéressant pour favoriser une agriculture plus raisonnée. Cela est-il réalisable dans la culture de la tomate industrielle dans le Nord-Est de l'Algérie ? Le deuxième chapitre de cette thèse tentera de répondre à cette question.

Chapitre II
Matériel et méthodes

CHAPITRE II MATERIEL ET METHODES

1 Impact des pratiques culturelles sur les communautés CMA dans les champs de tomate au Nord-Est de l'Algérie

1.1 Présentation des sites d'étude

La diversité des CMA et de leur abondance ont été évaluées dans huit stations cultivées par la tomate au Nord-Est de l'Algérie.

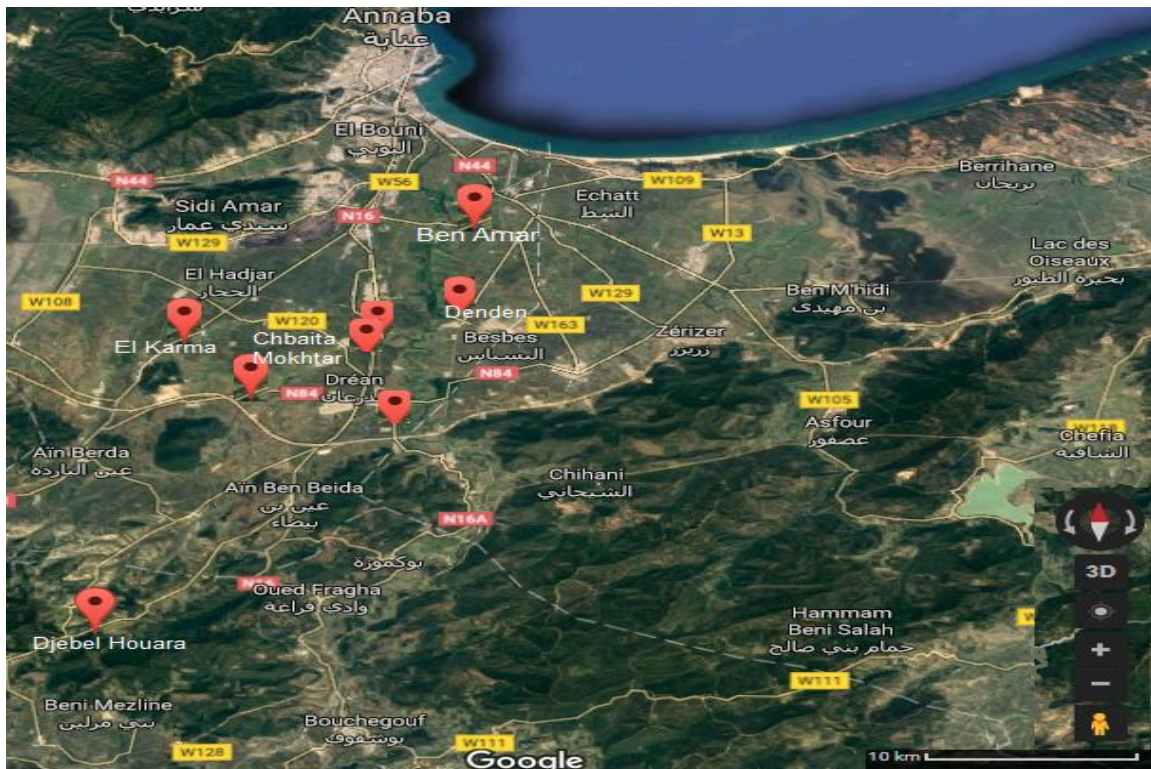


Figure 8 : Localisations des sites d'étude (El Karma, Ben Amar, Chbaïta Mokhtar, Drean, Denden et Djebel Houara) (Image satellite Google maps 2017).

Il s'agit d'un champ situé dans la localité d'El Karma (wilaya d'Annaba), un champ à Ben Amar, trois à Chbaïta Mokhtar, un à Drean et un à Denden (wilaya d'El Tarf), et enfin un à proximité de Djebel Houara (wilaya de Guelma) (Figure 8). Les spores des champignons mycorhiziens sont souvent libres dans le sol et peuvent donc être séparées des fines particules de sol par tamisage humide.

1.1.1 Site d'El Karma

El Karma se situe dans la plaine de Seybouse, dans la commune d'El Hadjar, wilaya d'Annaba (36° 44' 35''N ; 7° 39' 59''E).

Un climat tempéré chaud y est présent. La pluie tombe surtout en hiver, avec relativement peu de pluie en été. El Karma affiche 18.2 °C de température en moyenne sur toute l'année. Les précipitations annuelles moyennes sont de 699 mm. Avec une température moyenne de 25.7 °C, le mois d'aout est le plus chaud de l'année et janvier est le plus froid, avec 11.4 °C. (Données moyennes sur 10 ans, Site net 2)

1.1.2 Site de Ben Amar

Ben Amar se situe dans la commune d'El Chatt, wilaya d'El Tarf (36° 46' 55''N ; 7° 48' 35''E). Cette région se caractérise par un climat tempéré chaud. Les précipitations sont plus importantes en hiver qu'en été. Ben Amar affiche 18 °C de température en moyenne sur toute l'année. Chaque année, les précipitations sont en moyenne de 690 mm. Le mois le plus chaud est aout avec une température moyenne de 25.7 °C et janvier est le plus froid de l'année avec 11.2 °C (Site net 2).

1.1.3 Sites de Chbaïta Mokhtar

Les trois champs agricoles se trouvent dans la localité de Chbaïta Mokhtar, commune de Drean, wilaya d'El Tarf, se localisent comme suit : Chbaïta mokhtar 1, 36° 77' 09''N ; 7° 78' 03''E ; Chbaïta mokhtar 2, 36° 75' 24''N ; 7° 72' 97''E ; et Chbaïta mokhtar 3, 36° 75' 26''N ; 7° 72' 99''E.

Le climat y est tempéré chaud. Chbaïta Mokhtar affiche 18.1 °C de température en moyenne sur toute l'année. Il tombe en moyenne 705 mm de pluie par an. Le mois le plus chaud est celui d'août avec une température moyenne de 25.5 °C et janvier est le plus froid avec 11.4 °C (Site net 2).

1.1.4 Site de Denden

Denden se situe dans la commune de Besbes, wilaya d'El Tarf, à une latitude de 36° 73' 15'' N et une longitude de 7° 78' 38''E. Le climat y est chaud et tempéré. Denden affiche 18 °C de température en moyenne sur toute l'année. Le mois d'août est le plus chaud avec une température moyenne de 25.6 °C et janvier est le plus froid avec 11.1 °C. Les précipitations sont en moyenne de 692 mm par an (Site net 2).

1.1.5 Site de Drean

Le champ agricole se situe à Drean (wilaya d'El Tarf) à une latitude de 36° 69' 49''N et une longitude de 7° 73' 63''E.

Le climat à Drean est tempéré chaud. La moyenne des précipitations annuelles atteint 684 mm. Août est le mois le plus chaud avec une température moyenne de 25.7 °C et janvier est le plus froid de l'année avec 11.1 °C (Site net 2).

1.1.6 Site de Djebel Houara

Le champ agricole se situe à proximité de Djebel Houara, wilaya de Guelma, à une latitude de 36° 59' 20''N et une longitude de 7° 61' 82''E.

La région de Guelma bénéficie d'un climat tempéré chaud. Sur l'année, la précipitation moyenne est de 557 mm. En moyenne la température à Guelma est de 17.2 °C. Le mois le plus chaud est août, avec une température moyenne de 26.7 °C et le mois de janvier est le plus froid avec 8.39°C (Site net 2).

1.2 Isolement et observation des spores CMA

1.2.1 Prélèvement des échantillons de sols

Dans chaque site, des échantillons de sols ont été prélevés au mois de juillet 2017 pour l'évaluation de la biodiversité et de l'abondance des CMA. Des prélèvements rhizosphériques chez des plants de tomate ont été effectués dans les 30 premiers centimètres du sol, à partir de trois emplacements différents au niveau de chaque champ, puis les trois échantillons ont été homogénéisés pour donner un seul échantillon typique.

Des échantillons de sols au niveau des parcelles témoins non cultivées de chaque champ ont été également prélevés.

1.2.2 Isolement des spores

Les spores ont été séparées des particules de sols par tamisage humide selon les méthodes de Gerdemann & Nicolson (1963) et Daniels & Skipper (1982), en déposant 100 g de sol sur le haut d'une série de tamis superposés de haut en bas selon la valeur décroissante de leur ouverture de maille (300, 250, 200, 150, 100 et 50µm). Le sol est alors abondamment arrosé d'un jet d'eau et lavé jusqu'à ce que l'eau s'écoulant devienne claire.

Chaque fraction de sol retenue dans chaque tamis est récupérée dans une boîte de Pétri et observée à la loupe binoculaire. Les spores détectées sont récoltées au moyen d'une

micropipette et sont conservées à 4 °C dans des tubes Eppendorf contenant de l'eau distillée stérile, puis leur morphologie décrite par observation sous microscope.

1.2.3 Observation microscopique

Les spores de chaque morphotype sont isolées puis montées entre lames et lamelles dans une goutte des réactifs biochimiques: le polyvinyl alcool acide lactique glycerol (PVLG) ou un mélange de PVLG et du réactif de Melzer (1:1 V/V). Pour chaque observation, une petite pression est appliquée sur la lamelle afin d'écraser délicatement les spores et faire rompre leur paroi, ce qui permet de mettre en évidence au mieux leur structure. L'observation se fait au microscope photonique (G 100 x).

1.2.4 Identification et description des spores

L'identification des spores, basée sur leur taille, leur pigmentation, l'ornementation et les caractéristiques de leur paroi et de leur hyphes suspenseur, est réalisée à l'aide de comparaison avec les spécimens types décrits dans le site de la collection de culture internationale des champignons mycorhiziens à arbuscules (Janusz Blaszowski) sur INVAM (<http://invam.caf.wvu.edu/>).

1.2.5 Abondance des spores

L'abondance des spores de chaque site a été estimée par le comptage par fraction dans chaque tamis du nombre total des spores pour les 100 g de sol sous binoculaire, puis triées selon que les spores soient vivantes ou mortes (dépourvues de tout contenu, ont des taches, leur surface ou leur contenu est noir).

1.3 Estimation des niveaux de colonisation racinaire des plants de tomate

1.3.1 Prélèvement des échantillons de racines

Parallèlement aux prélèvements de sols, les racines de tomate ont également été prélevées pour l'estimation des niveaux de colonisation par les CMA. Pour cela, cinq plants ont été choisis au hasard. Les racines fines ont été récoltées dans les 30 premiers centimètres du sol. Chaque plant a fait l'objet de prélèvements en trois points au minimum qui ont été par la suite mélangés pour ne former qu'un seul échantillon représentatif du plant.

1.3.2 Estimation des niveaux de colonisation racinaire

Les racines sont colorées selon la technique de Phillips & Hayman (1970) en utilisant l'acide lactique. Les racines sont débarrassées des particules de terre au moyen d'un rinçage abondant, ensuite, seules les petites racines relativement claires et peu sclérifiées sont sélectionnées.

Elles sont placées dans des tubes à essais contenant une solution de KOH à 10%, dans un bain marie à 90° C pendant 30 mn. Les racines sont ensuite abondamment rincées à l'eau courante et égouttées. Enfin, elles sont recouvertes avec une solution de bleu trypan (0.05%) au bain marie pendant 20 mn puis rincées à l'eau distillée.

Les observations ont été effectuées sur 5 répétitions de 30 fragments racinaires de 1 cm, placés entre lame et lamelle dans une goutte de glycérol. La mycorhization s'observe au microscope photonique (G 40 x) par une coloration bleue foncée des structures fongiques au niveau des racines. Cela permet de les annoter selon un barème de classe (Annexe 3) et d'estimer ainsi le degré de colonisation mycorhizienne de chaque fragment au moyen de six classes notées de 0 à 5 (Figure 9) et la richesse arbusculaire par quatre classes notées A0, A1, A2 et A3 (Figure 10) selon la méthode décrite par Trouvelot *et al.*, (1986), en utilisant le logiciel MYCOCALC (www.dijon.inra.fr/mychintec/Mycocalc-prg/download.html).

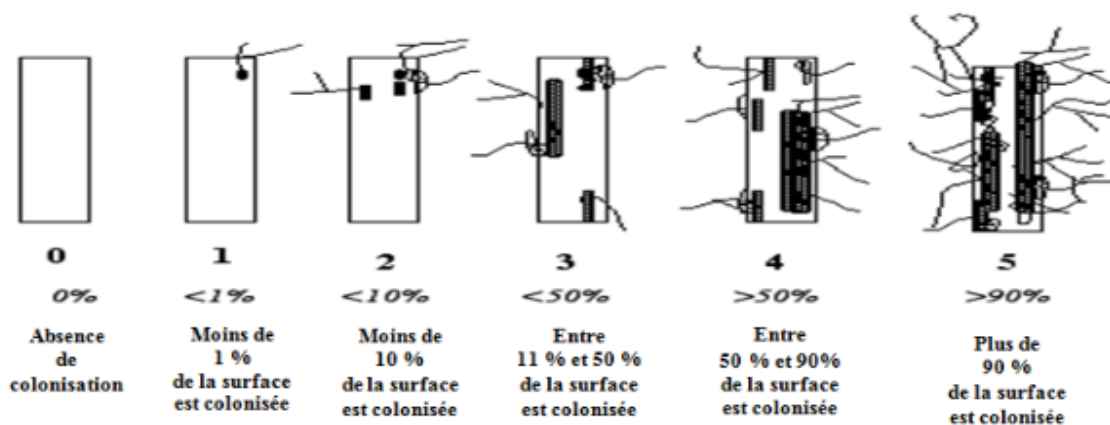


Figure 9 : Echelle d'évaluation de la présence des arbuscules.

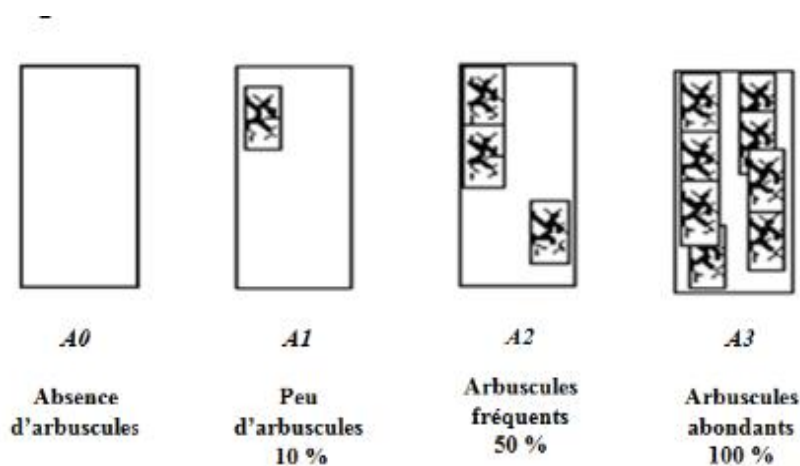


Figure 10 : Echelle d'intensité de colonisation du cortex racinaire.

Cette méthode calcule cinq paramètres de colonisation :

F %: Fréquence de la colonisation mycorhizienne (% du nombre de fragments racinaires mycorhizés), elle reflète l'importance des points de pénétration de la colonisation du système racinaire.

M %: Intensité de la colonisation du cortex racinaire (proportion du cortex colonisé estimée par rapport au système racinaire entier et exprimée en %), elle reflète l'importance de la colonisation du système racinaire.

m %: Intensité de la colonisation développée dans la partie mycorhizée du système racinaire (proportion du cortex colonisé dans la partie mycorhizée du système racinaire exprimé en %).

A %: Teneur arbusculaire de la colonisation ramené au système racinaire entier (proportion du système racinaire renfermant des arbuscules, exprimée en %).

a %: Teneur arbusculaire de la colonisation dans la partie mycorhizée du système racinaire (proportion colonisée renfermant des arbuscules, %).

2 Evaluation de l'effet des champignons mycorhiziens à arbuscules indigènes et commerciaux sur la croissance de la tomate industrielle sous serre

2.1 Choix de la serre

Afin d'évaluer l'effet des CMA extraits d'un sol algérien ou d'un inoculum commercial, une expérience a été conduite dans la serre de l'université Badji Mokhtar (Figure 11), située dans la commune de Sidi Amar, wilaya d'Annaba (36° 81' 58'' N ; 7° 71' 36''E), où le climat est chaud et tempéré.



Figure 11 : Serre de l'université Badji Mokhtar, Sidi Amar, Annaba.

Sidi Amar affiche 18.8 °C de température en moyenne sur toute l'année. Sur l'année, la précipitation moyenne est de 619 mm. Le mois d'août est le plus chaud avec une température moyenne de 27.6 °C et le plus froid est janvier avec de 11.4 °C (données sur 10 ans, Site net 2). La serre expérimentale est exposée à une lumière naturelle quotidienne de 14 heures, une température moyenne quotidienne de 20-25 °C et une humidité relative de 60-70%.

2.2 Choix du substrat de culture

Un sol argileux a été prélevé dans un champ agricole destiné à la production de tomate industrielle, se situant dans la localité d'El Kerma cité précédemment.

Les propriétés physico-chimiques du sol ont été déterminées dans le laboratoire agronomique de la société FERTIAL (Annaba, Algérie) et ce sol est caractérisé par un pH alcalin (7.85), une faible teneur en phosphore disponible (20.66 ppm), et en matière organique (1.33%) (Tableau 2).

Une partie de l'échantillon de sol a été stérilisée (SS) deux fois dans un autoclave, 20 minutes à 120 °C avec 24 heures entre chaque autoclavage, et le reste du sol n'a pas été stérilisé (NS).

Tableau 2 : Propriétés physico-chimiques du substrat de culture (El Karma).

Paramètres	Résultat
Sable (%)	28
Limon (%)	28
Argile (%)	44
pH (H ₂ O)	7.85
P ₂ O ₅ (ppm)	20.60
total C (%)	0.78
K (meq/100g)	0.58
Ca (meq/100g)	41.77
Mg (meq/100g)	5.35
Na (meq/100g)	0.50
MO (%)	1.33

2.3 Production du matériel végétal

Les plants de tomate sont d'une variété commerciale (*Lycopersicon esculentum* Mill. cv. Isma F1). Ils ont été produits dans une pépinière privée, située à Ben Amar, commune d'El Chatt, wilaya d'El Tarf, Algérie. Les graines ont été germées dans des plaques à microalvéoles remplies de tourbe, arrosées d'eau stérile et placées dans une chambre de germination pendant 72 heures, puis dans une serre d'élevage pendant 15 à 18 jours et finalement transférées dans une salle d'acclimatation pendant 10 à 15 jours. Les plants étaient arrosés tous les 3 jours. Cette variété de tomates a un cycle de 120 jours et produit des fruits de couleur rouge très intense, de forme allongée, de bon calibre, d'une teneur en sucre brix de 6 %, pH de 4,3 et un poids moyen de 100 g.

2.4 Matériel fongique

L'inoculum commercial utilisé, Symbivit® (INOCULUM *plus*, France), est sous forme granulaire, composé d'un support à base d'argile naturelle et de propagules de 6 espèces de CMA (*Claroideoglobus etunicatum*, *Claroideoglobus claroideum*, *Glomus microaggregatum*, *Rhizophagus intraradices*, *Funneliformis mosseae*, *Funneliformis geosporum*).

Les isolats fongiques natifs utilisés sont composés des spores CMA des deux espèces *Funneliformis mosseae* et *Septoglobus constrictum*, extraites d'un sol cultivé d'olivier (*Olea europaea* L.), situé dans la commune de Bekkouche Lakhdar (36 ° 42' 23 "N ; 7 ° 17' 49" E), wilaya de Skikda, Algérie (Meddad-Hamza *et al.*, 2010).

Les spores recueillies ont été multipliées sur des plants de trèfle (*Trifolium pretense* L.) cultivé dans un sol stérilisé provenant du champ expérimental du Technopôle Agroenvironnement, Agronov, 2110 Bretenièrre, France. Les spores nouvellement formées ont été isolées par tamisage humide selon le procédé de Gerdemann & Nicolson (1963) et utilisées comme inoculum.

La classification des CMA des isolats fongiques natifs selon Schüßler & Walker (2010) et Oehl *et al.*, (2011) est la suivante :

Rang de classification	Isolat 1	Isolat 2
Règne	<i>Fungi</i>	/
Division	<i>Glomeromycota</i>	/
Classe	<i>Glomeromycetes</i>	/
Ordre	<i>Glomerales</i>	/
Famille	<i>Glomeraceae</i>	/
Genre	<i>Funneliformis</i>	<i>Septoglobus</i>
Espèce	<i>Funneliformis mosseae</i>	<i>Septoglobus constrictum</i>

La classification selon Schüßler & Walker (2010) des CMA de l'inoculum commercial utilisé est la suivante :

Rang de classification	Souche 1	Souche 2	Souche 3	Souche 4	Souche 5	Souche 6
Règne	<i>Fungi</i>	/	/	/	/	/
Division	<i>Glomeromycota</i>	/	/	/	/	/
Classe	<i>Glomeromycetes</i>	/	/	/	/	/
Ordre	<i>Glomerales</i>	/	/	/	/	/
Famille	<i>Claroideoglomeraceae</i>	/	<i>Glomeraceae</i>	/	/	/
Genre	<i>Claroideoglomerus</i>	/	<i>Glomus</i>	<i>Rhizophagus</i>	<i>Funneliformis</i>	/
Espèce	<i>Claroideoglomerus etunicatum</i>	<i>Claroideoglomerus claroideum</i>	<i>Glomus microaggregatum</i>	<i>Rhizophagus intraradices</i>	<i>Funneliformis mosseae</i>	<i>Funneliformis geosporum</i>

2.5 Schéma expérimental et traitements

Le dispositif expérimental a été une randomisation simple de 6 traitements répétés 7 fois pour un total de 42 plants.

L'inoculation a été effectuée au moment de la transplantation des semis de tomate âgés de trois semaines, dans des sacs contenant 3 kg de sol : 10 g (soit 200 propagules) par plant d'inoculum commercial (IC), ou 120 spores par plant (soit 60 spores par espèce) des isolats fongiques indigènes (IF) ont été déposés près des racines dans les sols stérilisés (SS) et non stérilisés (NS). Des témoins non inoculés sur SS et NS ont également été établis. Les plantes ont été maintenues en serre pendant une période de 2 mois et arrosées quotidiennement à l'eau stérile.

2.6 Paramètres mesurés

L'étude du potentiel mycorrhizogène du sol avant le lancement de l'expérience a été effectué. Ensuite, après deux mois de croissance, le niveau de colonisation des racines par les CMA, la hauteur, les poids frais et sec des parties aérienne et racinaire (après séchage à 70° C pendant trois jours) des plants de tomate ont été mesurés.

2.6.1 Etude du potentiel mycorhizogène du sol

La richesse naturelle du sol du champ en propagules de CMA indigènes a été évaluée en utilisant la méthode du nombre le plus probable (MPN) (Porter, 1979) de l'anglais 'Most Probable Number', qui consiste à effectuer une série de dilutions successives du sol et à déterminer la dilution limite au niveau de laquelle aucune propagule de CMA ne peut être détectée.

- Préparation du dispositif d'évaluation

Le sol recueilli a été mélangé avec le même sol stérilisé pour faire cinq dilutions en série (1/10) et cinq répétitions par niveau de dilution dans des pots de 50 ml ; les témoins contiennent du sol stérile. Les dilutions ont été préparées comme suit :

-Dilution 10^{-1} : 30g de sol non stérile + 270 g de sol stérile = 300g (1).

A partir de ces 300g de mélange, 250g ont été répartis dans les cinq répétitions à raison de 50 g par pot. Des 50 g restants, 30 g ont servis d'inoculum pour la dilution qui suit (10^{-2}).

-Dilution 10^{-2} : 30 g (1) + 270 g de sol stérile = 300 g (2).

-Dilution 10^{-3} : 30 g (2) + 270 g de sol stérile = 300 g (3).

-Dilution 10^{-4} : 30 g (3) + 270 g de sol stérile = 300 g (4).

-Dilution 10^{-5} : 30 g (4) + 270 g de sol stérile = 300 g (5).

Une graine de trèfle pré-germée axéniquement a été plantée dans chaque sac. Elle a été préalablement désinfectée par immersion dans de l'eau oxygénée pendant 2 minutes puis rincée abondamment. Les plantes ont été cultivées en serre (température moyenne de 18-22 °C, humidité relative de 60-70%, lumière du jour de 14 heures) et arrosées avec de l'eau distillée tous les 3 jours.

Après six semaines, le système racinaire entier par plante a été récolté et coloré selon la méthode de Philips & Hayman (1970). Des racines mycorhizées ou non mycorhizées ont été enregistrées pour les 5 répétitions à chaque niveau de dilution et le MPN des propagules par 50 g de sol a été estimé selon Cochran (1950). La lecture de la table se fait en définissant la dernière dilution (P1) pour laquelle la mycorhization est observée dans les cinq répétitions. Si ce cas ne se présente pas, la dernière dilution dans laquelle il y a le maximum de plants mycorhizés est

prise. Le nombre de racines colonisées dans les deux dilutions successives représente donc le P2 et le P3. Les trois valeurs P1, P2, P3 sont reportées sur la table de Cochran (Annexe 2) pour en déduire un nombre qui servira à la détermination du MPN pour 50 g de sol initial. Le nombre de propagules par kilogramme de sol est alors calculé en multipliant ce nombre par le facteur de dilution de P2.

2.6.2 Estimation des niveaux de colonisation des racines de la tomate

Pour estimer les niveaux de colonisation mycorhizienne, des échantillons de racines de sept plants par traitement prélevés au hasard et colorées selon le procédé décrit précédemment (voir paragraphe 1.3.2 p.33)

3 Effets des champignons mycorhiziens à arbuscules et des niveaux de fertilisation sur le développement de la tomate industrielle en conditions de champ

3.1 Présentation des sites expérimentaux

L'évaluation en conditions réelles de culture en plein champ de l'effet des CMA combinés à la fertilisation chimique sur la tomate industrielle a été effectuée. Pour cela, deux champs agricoles situés au Nord-Est de l'Algérie, contrastés par la culture de la tomate industrielle, ont été choisis.

Une première expérience a été lancée dans la localité de Ben Amar, wilaya d'El Tarf en 2012 et une seconde expérience dans la localité d'El Karma, wilaya d'Annaba en 2013.

3.1.1 Présentation du site expérimental de Ben Amar

La première expérience a été conduite dans un champ agricole situé dans la localité de Ben Amar, cité précédemment, du 21 mai 2012 jusqu'au 30 août 2012. Pendant la période culturale (mai, juin, juillet et août 2012), la température moyenne était de 28.5 °C et les précipitations totales étaient de 38.6 mm (données climatiques d'El Tarf, station lac des oiseaux, 2012). Les propriétés physico-chimiques du sol ont été déterminées dans le laboratoire agronomique de la société FERTIAL (Annaba, Algérie). Il s'agit d'un sol limoneux caractérisé par un pH très alcalin (8.68), une teneur en phosphore disponible extrêmement faible (9.20 ppm) ainsi qu'en matière organique (1.43%) (Tableau 3).

Tableau 3 : Propriétés physico-chimiques du sol de Ben Amar.

Paramètres	Résultats
Sable (%)	36
Limon (%)	60
Argile (%)	4
pH (H ₂ O)	8.68
P ₂ O ₅ (ppm)	9.20
C total (%)	25.84
C Actif (%)	12.25
K (meq/100g)	1.08
Ca (meq/100g)	33.47
Mg (meq/100g)	4.46
Na (meq/100g)	1.16
M.O (%)	1.43

3.1.2 Présentation du site expérimental à El Karma

La deuxième expérience a été menée dans le champ agricole à El Karma cité précédemment, du 26 mars 2013 au 30 juillet 2013. Pendant la période de culture (mars, avril, mai, juin et juillet 2013), les températures moyennes minimale et maximale étaient de 12,4 °C et 23,8 °C, respectivement ; le total des précipitations était de 266 mm (Site net 2).

Les propriétés physico-chimiques du sol ont été décrites précédemment (paragraphe 2.2 p.35).

3.2 Matériel végétal

Deux variétés industrielles (Fahla F1 et Isma F1) de la tomate *Lycopersicon esculentum* Mill. ont été utilisées à Ben Amar et El Karma, respectivement. Les plants ont été produits dans la pépinière privée citée auparavant (paragraphe 2.3 p.36) (figure 12).



Figure 12 : Plants de tomate industrielle produits en pépinière.

3.3 Matériel fongique

Pour les deux expériences en champ, les CMA appliqués proviennent du même inoculum CMA commercial utilisé dans l'expérience en serre (paragraphe 2.4 p.37).

3.4 Fertilisation dans les sites expérimentaux

3.4.1 Fertilisation à Ben Amar

Les engrais chimiques apportés pour assurer de bons rendements en tomates sur ce site sont présentés dans le tableau 4. La fertilisation de fond a été faite avant la transplantation avec l'application de l'Ammonitrate. L'NPK (azote, phosphore, potassium) a ensuite été mis immédiatement après la transplantation aux doses de 0, 50 et 100% de la dose recommandée. Le sulfate de potasse a enfin été appliqué comme fertilisant d'entretien à la suite de l'apparition des fruits.

Tableau 4 : Fertilisants chimiques appliqués au site de Ben Amar.

Fertilisants chimiques	Composition	Doses appliquées (kg ha ⁻¹)
Ammonitrate	32% N	150
NPK (10.42.10)	10% NH ₄ , 42% P ₂ O ₅ , 10% K ₂ O	100
Sulfate de Potasse	50% K ₂ O, 44% SO ₃	50

3.4.2 Fertilisation à El Karma

A El Karma, la fertilisation de fond a été faite en appliquant le mono-ammonium phosphate (MAP) et le sulfate d'ammonium. L’NPK a été apporté à la suite de la transplantation. Tous les fertilisants ont été utilisés aux doses de 0, 50 et 100% des doses recommandées (Tableau 5).

Tableau 5 : Fertilisants chimiques appliqués au site d’El Karma.

Fertilisants chimiques	Composition	Doses appliquées (kg ha ⁻¹)
Mono-ammonium Phosphate (MAP)	12 % NH ₄ , 52% P ₂ O ₅	200
Sulfate d'Ammonium	21% NH ₄ , 60% SO ₄	200
NPK (8.10.30 + 35)	8% NH ₄ , 10% P ₂ O ₅ , 30% K ₂ O, 35% SO ₄	600

3.5 Inoculation CMA dans les sites expérimentaux

3.5.1 Inoculation à Ben Amar

Une pré-inoculation a été faite pendant la mise en germination des graines de tomates dans les plaques microalvéolées, en mélangeant 1 g d’inoculum avec la tourbe dans chaque microalvéole semée d’une graine de tomate. Ensuite, les 9 g d’inoculum ont été complétés pour chaque plant lors de la transplantation au champ sur les racines immédiatement recouvertes.

3.5.2 Inoculation à El Karma

Les plants de tomates âgés de trois semaines ont été inoculés au moment de la transplantation en plein champ en plaçant sur les racines les 10 g d’inoculum pour chaque plant.

3.6 Schéma expérimental et traitements

Les deux expériences ont été réalisées en blocs aléatoires complets représentant trois répétitions, chacun subdivisé en six parcelles, pour un total de 18 parcelles. Chaque bloc contient tous les traitements et la distribution des traitements dans le même bloc a été faite au hasard. Chaque parcelle consistait en 4 lignes espacées de 1,20 m et six rangées avec un espacement de 30 cm entre les plants. Une bordure de 2 m autour de chaque parcelle a été prévue. Chaque parcelle avait une superficie de 41,8 m² (7,6 m de largeur et 5,5 m de long).

La moitié des parcelles a reçu l'inoculum mycorhizien commercial (I) et l'autre moitié représentait les témoins (NI). Dans le champ de Ben Amar, L'NPK a été appliqué aux trois doses de 0, 50 et 100% de la dose recommandée ; et dans le champ d'El Karma, tous les engrais chimiques ont été appliqués à ces trois doses. Ceci a donné les traitements expérimentaux suivants :

Champ de Ben Amar : Non inoculé (NI) + 0% NPK, Inoculé (I) + 0% NPK, NI + 50% NPK, I + 50% NPK, NI+ 100% NPK et I + 100% NPK.

Champ d'El Karma : NI + 0% fertilisants chimiques (FC), I + 0% FC, NI + 50% FC, I + 50% FC, NI+ 100% FC et I + 100% FC.

3.7 Paramètres mesurés

3.7.1 Paramètres mesurés dans le site de Ben Amar

A la floraison, 7 plants de chaque parcelle ont été sélectionnés au hasard pour estimer le nombre de fleurs. Au stade maturité des fruits, les niveaux de colonisation des racines mycorhizées, la hauteur des plants, les poids secs des parties aériennes et racinaires et les taux de chlorophylle contenus dans les feuilles des plants de tomate ont été déterminés.

A la récolte, le nombre moyen de fruits par plant et le rendement global en fruits ($t\ ha^{-1}$) ont été déterminés, puis les analyses qualitatives des fruits ont été effectuées au niveau d'un laboratoire privé de contrôle de qualité (commune d'El Hadjar, wilaya d'Annaba) pour le taux d'acidité titrable, la matière sèche soluble (Brix) et le pH.

3.7.1.1 Mesure des concentrations en chlorophylle *a* et *b* par méthode spectroscopique

La méthode a été établie par Mackiney (1941) et améliorée par Holden (1975) et consiste en une macération du végétal dans de l'acétone.

-Extraction

Les feuilles des plants de tomate (1g / traitement) sont coupées de façon grossière avec une paire de ciseaux ensuite placées dans un mortier avec un peu de sable (qui facilite le broyage) et 25 ml d'acétone (80%) sont rajoutés, puis les feuilles sont broyées jusqu'à ce que le solvant ait pris une teinte verte marquée. Le broyat est filtré sur papier filtre avec une fiole à vide. Le filtrat obtenu doit être d'un vert limpide.

-Mesure des absorbances par méthode monochromatique

Après avoir transféré assez de volume du filtrat dans la cuve du spectrophotomètre, les abondances brutes de l'extrait non acidifié sont mesurées aux longueurs d'ondes de 645 et 663 nm.

-Calculs des concentrations

[Chl *a*] µg/g de matière fraîche = 12.7 DO (663 nm) – 2.69 DO (645 nm)

[Chl *b*] µg/g de matière fraîche = 22.9 DO (645 nm) – 4.68 DO (663 nm)

[Chl (*a+b*)] µg/g de matière fraîche = 8.02 DO (663 nm) + 20.20 DO (645 nm)

3.7.1.2 Détermination du taux d'acidité titrable

C'est une méthode dont le principe est le titrage de l'acidité avec une solution de NaOH en présence de phénolphthaléine comme indicateur.

La formule utilisée est :

$$\text{Acidité} = \frac{\alpha \times 0,07 \times 200 \times 100}{10 \times 50 \times P} = \frac{V \times 1400}{\text{Brix} \times 50}$$

Où :

α : ml de NaOH N/10 versés pour obtenir le virage

P : poids de la prise d'essai (g).

L'acidité titrable est exprimée en acide citrique monohydraté par 100 g de produit. Il est noté que 1 ml NaOH N/10 = 0,07 g d'acide citrique hydraté. L'acide prédominant dans la tomate est considéré comme étant l'acide citrique monohydraté (Règlement CEE n 1764/86).

3.7.1.3 Détermination de la matière sèche soluble (Méthode réfractométrique)

La matière sèche soluble (ou Brix) est la concentration en saccharose d'une solution aqueuse ayant le même indice de réfraction que le produit analysé, dans des conditions déterminées de préparation et de température. Cette concentration est exprimée en pourcentage en masse.

La purée de tomate est mise dans un linge puis pressée. Les deux premières gouttes sont inutilisées, celles qui les suivent sont déposées sur le réfractomètre. L'indice de réfraction est mesuré puis converti en matière sèche soluble (exprimé en saccharose). Pour l'échelle indiquant l'indice de réfraction, il est appliqué la formule suivante :

$$n^{20}D = n^tD + 0.00013 (t-20)$$

Où :

t : température de mesurage, en degrés Celsius (27°).

Il est lu sur la table le pourcentage en masse de saccharose correspondant à la valeur lue et corrigée, si nécessaire. La matière sèche soluble est égale au nombre trouvé.

3.7.1.4 Détermination du potentiel Hydrogène (pH)

La détermination du pH des tomates s'effectue à l'aide d'un pH-mètre (NF V08-406). La mesure est effectuée par immersion directe de la sonde dans la purée de tomate.

3.7.2 Paramètres mesurés dans le site d'El Karma

Après trois mois de culture, au stade maturité, les taux de colonisation des racines par les mycorhizes, la hauteur des plants, et les poids secs des parties aériennes et racinaires ont été mesurés. A la récolte, le nombre moyen de fruits par plant, le rendement global en fruits (t ha⁻¹) ont été estimés, ainsi que les caractéristiques qualitatives des fruits ont été déterminés au niveau du laboratoire de contrôle de qualité CACQE-Annaba (Centre Algérien de Contrôle de Qualité et de l'Emballage-Annaba) pour la détermination du taux d'acidité titrable, de la matière sèche soluble (Brix) et du pH.

3.8 Calcul de l'efficacité sur la croissance et le rendement

L'efficacité des CMA sur la croissance et le rendement en pourcentage ont été calculées en utilisant la formule suivante (Plenchette *et al.*, 1983) :

% augmentation de croissance = ((croissance des plants inoculés – croissance des plants non inoculés) / croissance des plants inoculés) x 100.

% augmentation du rendement = ((rendement des plants inoculés – rendement des plants non inoculés) / rendement des plants inoculés) x 100.

4 Analyses statistiques

Pour les niveaux de colonisation racinaire dans l'étude de la biodiversité des CMA, une ANOVA à un seul facteur a été effectuée. Pour les paramètres mesurés dans les expériences en serre et en champs, une analyse de variance (ANOVA) avec modèle linéaire général (GLM) a été utilisée pour déterminer l'effet des facteurs. Les comparaisons entre les moyennes ont été effectuées avec le test Tukey Honestly Significant Difference (HSD) au niveau de signification $P < 0,05$. Le logiciel utilisé pour les analyses statistiques des résultats est le Minitab 16.

Chapitre III
Résultats et discussion

CHAPITRE III RESULTATS ET DISCUSSION

1 Impact des pratiques culturelles sur les communautés CMA dans les champs de tomate au Nord-Est de l'Algérie

L'objectif de cette partie du travail est d'évaluer l'impact des pratiques culturelles conventionnelles sur l'abondance et la diversité des spores CMA indigènes dans huit sols agricoles cultivés de tomate dans la région Nord-Est de l'Algérie. Les spores ont été isolées, quantifiées et identifiées morphologiquement, et les niveaux de colonisation racinaire de la tomate ont été estimés.

1.1 Abondance et biodiversité des CMA

Dans l'ensemble, au niveau des 8 champs de tomate, 6 morphotypes de CMA ont été identifiés selon leurs particularités morphologiques. Ils appartiennent aux genres *Entrophospora*, *Funneliformis*, *Glomus*, *Rhizophagus*, *Septoglomus*, et à deux familles (*Entrophosporaceae* et *Glomeraceae*) (Tableau 6).

Cependant, neuf morphotypes appartenant au genre *Glomus* n'ont pas pu être identifiés, ayant les descriptions suivantes :

- Glomus sp. 1* : De couleur miel, à bord régulier.
- Glomus sp. 2* : De couleur marron foncé, à paroi foncée et régulière.
- Glomus sp. 3* : De couleur dorée, à paroi régulière.
- Glomus sp. 4* : De couleur miel, à paroi foncée et régulière.
- Glomus sp. 5* : De couleur marron caramel, à paroi régulière.
- Glomus sp. 6* : De couleur noire, forme ovale.
- Glomus sp. 7* : De couleur jaune, grand diamètre.
- Glomus sp. 8* : De couleur transparente, lisse, petit diamètre.
- Glomus sp. 9* : De couleur noire, forme régulière.

Dans les parcelles cultivées (PC) et témoins non cultivées (PT), au niveau des 8 champs de tomate, le nombre de spores (spores 100 g⁻¹) va de 305 à 616 et de 461 à 1129, respectivement (Tableau 6).

Dans PC au site Chbaïta Mokhtar 1, il y a eu le moins de spores (305 spores 100 g⁻¹) et les morphotypes présents sont : *Funneliformis mosseae*, *Glomus badium*, *Glomus sp. 2*, *Glomus*

sp. 8, *Rhizophagus irregularis* et *Septoglomus constrictum*, appartenant à la famille *Glomeraceae*. Cependant, dans PT, il y a 520 spores soit + 70.49% par rapport à PC.

Chbaïta Mokhtar 1 est suivi de Denden (351 spore 100 g⁻¹ dans PC), avec *Entrophospora infrequens*, *Funneliformis mosseae*, *Glomus sp. 1, 2, 8 et 9*, *Rhizophagus irregularis* et *Septoglomus constrictum* appartenant aux familles *Acaulosporaceae* et *Glomeraceae*. 461 spores ont été dénombrées dans PT, soit +31.33% par rapport à PC.

Chbaïta Mokhtar 3 compte 407 spores dans PC et les espèces présentes sont : *Funneliformis mosseae*, *Glomus badium*, *Glomus sp. 1, 2, 4, 5, 7 et 8*, *Rhizophagus irregularis* et *Septoglomus constrictum*. PT a +142.26%, avec 986 spores.

A El Karma, PC compte 410 spores, dont *Funneliformis mosseae*, *Glomus badium*, *Glomus macrocarpum*, *Glomus sp. 1*, *Glomus sp. 2*, *Rhizophagus irregularis* et *Septoglomus constrictum*. PT en compte +59.75%, avec 655 spores.

A Ben Amar 480 spores ont été dénombrées dans PC, dont les espèces *Entrophospora infrequens*, *Funneliformis mosseae*, *Glomus badium*, *Glomus macrocarpum*, *Glomus sp. 1, 2, 7, 8, 9*, *Rhizophagus irregularis* et *Septoglomus constrictum*. Dans PT, 592 spores ont été comptées, soit +23.33% en comparaison avec PC.

Dans PC de Djebel Houara, parmi les 482 spores dénombrées, il y a les espèces *Funneliformis mosseae*, *Glomus macrocarpum*, *Glomus sp. 1, 2 et 8*, *Rhizophagus irregularis* et *Septoglomus constrictum*. 746 spores ont été comptées dans PT, soit + 35.38%.

A Chbaïta Mokhtar 2 il y a 599 spores dans PC, dont *Funneliformis mosseae*, *Glomus badium*, *Glomus sp. 1, 2, 3, 4, 5, 6 et 8*, *Rhizophagus irregularis* et *Septoglomus constrictum*. PT de Chbaïta Mokhtar 2 en a + 88.48% par rapport à PC, avec le nombre le plus grand en spores (1129).

Enfin, le champ de Drean comptait le plus de spores au niveau de PC (616), dont *Entrophospora infrequens*, *Funneliformis mosseae*, *Glomus sp. 1, 3, 5, 8, et 9*, *Rhizophagus irregularis* et *Septoglomus constrictum*. 956 spores étaient présentes dans PT, soit +55.19% en comparaison avec PC.

Les espèces CMA dans PT ne diffèrent pas de celles présentes dans PC, sauf à Chbaita Mokhtar 2 et 3, où l'espèce *Entrophospora infrequens* est absente de PC ; à Drean, l'espèce *Glomus sp. 1* est absente de PT et *Glomus sp. 2* est absente de PC et enfin, à Djebel Houara, *Glomus badium* est absente de PC.

Les espèces CMA les plus dominantes au niveau des huit champs de tomate sont *Funneliformis mosseae*, *Rhizophagus irregularis* et *Septoglomus constrictum*, avec des

proportions de 12%, 9.45% et 14.65% dans PC, et de 9.59%, 8.18% et 12.78% dans PT, respectivement.

Tableau 6 : Abondance des espèces de champignons mycorhiziens à arbuscules par le nombre de spores (spores 100 g⁻¹) dans 8 champs de tomate au Nord-Est de l'Algérie (El Karma, Ben Amar, Chbaïta Mokhtar 1, 2 et 3, Drean, Denden et Djebel Houara).

Sites d'étude Espèces CMA	El Karma		Ben Amar		Chbaïta Mokhtar 1		Chbaïta Mokhtar 2		Chbaïta Mokhtar 3		Drean		Denden		Djebel Houara	
	PC	PT	PC	PT	PC	PT	PC	PT	PC	PT	PC	PT	PC	PT	PC	PT
<i>Entrophospora infrequens</i>	/	/	8	11	/	/	/	26	/	22	16	29	10	29	/	/
<i>Funneliformis mosseae</i>	37	50	30	42	25	47	82	95	58	81	83	109	65	102	82	54
<i>Glomus badium</i>	15	28	18	23	18	22	8	14	6	12	/	/	/	/	/	5
<i>Glomus macrocarpum</i>	30	62	20	26	/	/	/	/	/	/	/	/	7	11	8	12
<i>Glomus sp. 1</i>	19	16	11	19	/	/	14	21	27	34	15	/	20	31	18	27
<i>Glomus sp. 2</i>	27	26	10	22	16	27	22	30	6	16	/	9	8	13	30	46
<i>Glomus sp. 3</i>	/	/	5	14	/	/	7	12	/	/	10	21	/	/	/	/
<i>Glomus sp. 4</i>	/	/	/	/	/	/	6	14	4	9	/	/	/	/	/	/
<i>Glomus sp. 5</i>	/	/	/	/	/	/	11	24	9	18	7	16	/	/	/	/
<i>Glomus sp. 6</i>	/	/	/	/	/	/	8	15	/	/	/	/	/	/	/	/
<i>Glomus sp. 7</i>	/	/	12	24	/	/	/	/	9	16	/	/	/	/	/	/
<i>Glomus sp. 8</i>	/	/	17	36	14	21	17	24	19	27	16	22	14	22	18	29
<i>Glomus sp. 9</i>	/	/	7	13	/	/	/	/	/	/	5	9	7	11	/	/
<i>Rhizophagus irregularis</i>	33	55	20	38	22	35	68	86	66	84	44	65	47	62	45	70
<i>Septoglomus constrictum</i>	84	102	75	98	52	83	65	88	72	100	63	96	62	98	62	108
Nombre total des spores dans 100g de sol	410	655	480	592	305	520	599	1129	407	986	616	956	351	461	482	746

Les proportions des spores vivantes au niveau des parcelles cultivées et témoins ont été comparées (Figure 13). Dans les PC de tous les champs, les proportions des spores vivantes sont moins élevées que celles des spores mortes. Denden a le moins de spores vivantes dans PC, avec 16.23%, El Karma a le plus de spores vivantes dans PC, avec 37.80%. Dans les PT, la proportion des spores saines est plus élevée par rapport à PC dans 7 des 8 champs. Chbaïta Mokhtar 3 a la plus grande proportion en spores vivantes avec 68.47%. A Djebel Houara, les spores vivantes sont moins nombreuses que celles mortes, avec 40.21%.

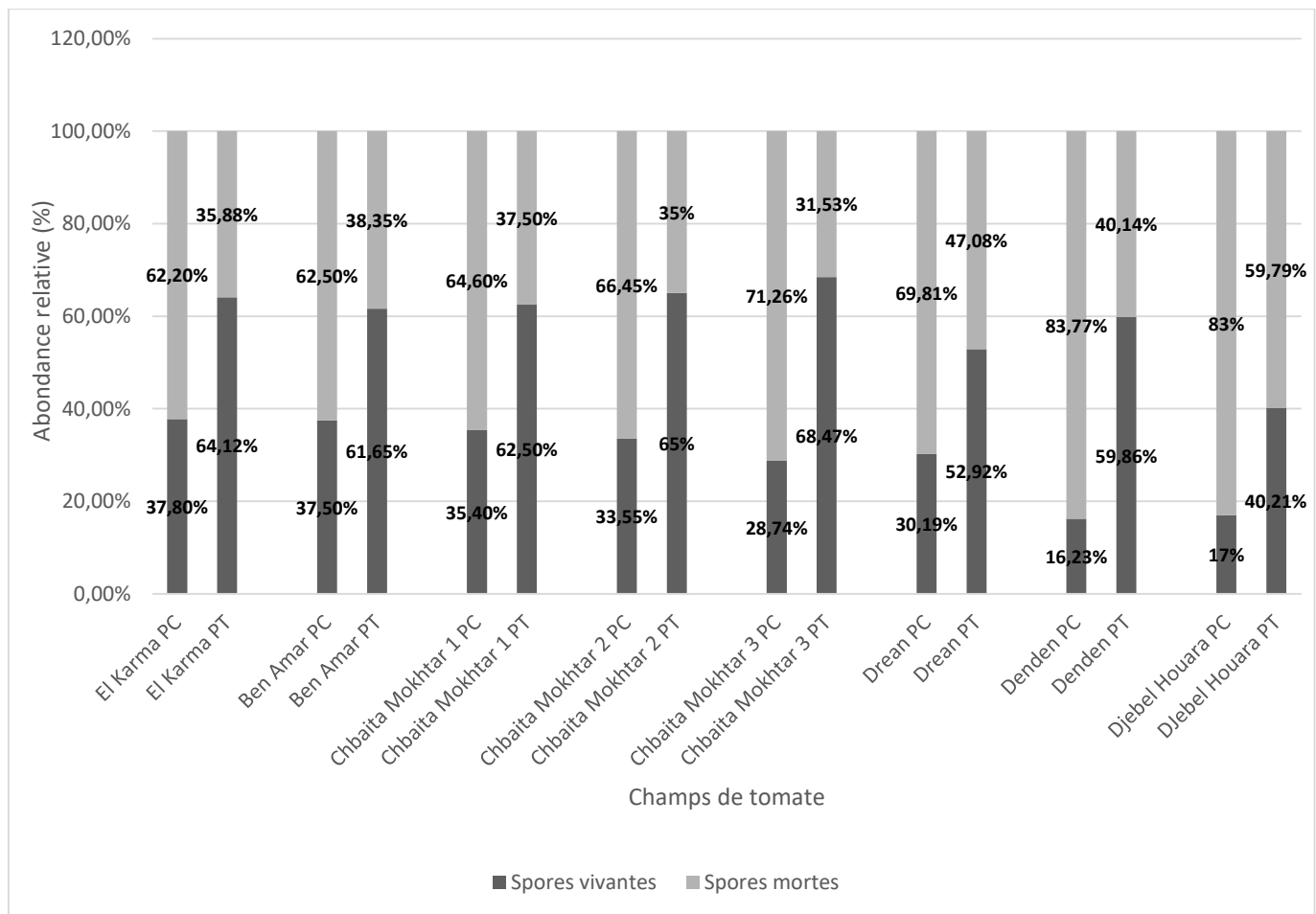


Figure 13 : Proportion des spores CMA vivantes et mortes dans les parcelles cultivées (PC) et non cultivées (PT) dans huit champs de tomate au Nord-Est de l’Algérie (El Karma, Ben Amar, Chbaïta Mokhtar 1, 2 et 3, Drean, Denden et Djebel Houara).

Au niveau de chaque champ, la densité des spores vivantes était moins élevée dans les PC en comparaison avec les PT. En effet, il y avait +171% de spores vivantes à El Karma, +102.7% à Ben Amar, +200% à Chbaïta Mokhtar 1, +265% à Chbaïta Mokhtar 2, +477% à Chbaïta Mokhtar 3, +172% à Drean, +384% à Denden et +265.8% à Djebel Houara (Figure 14).

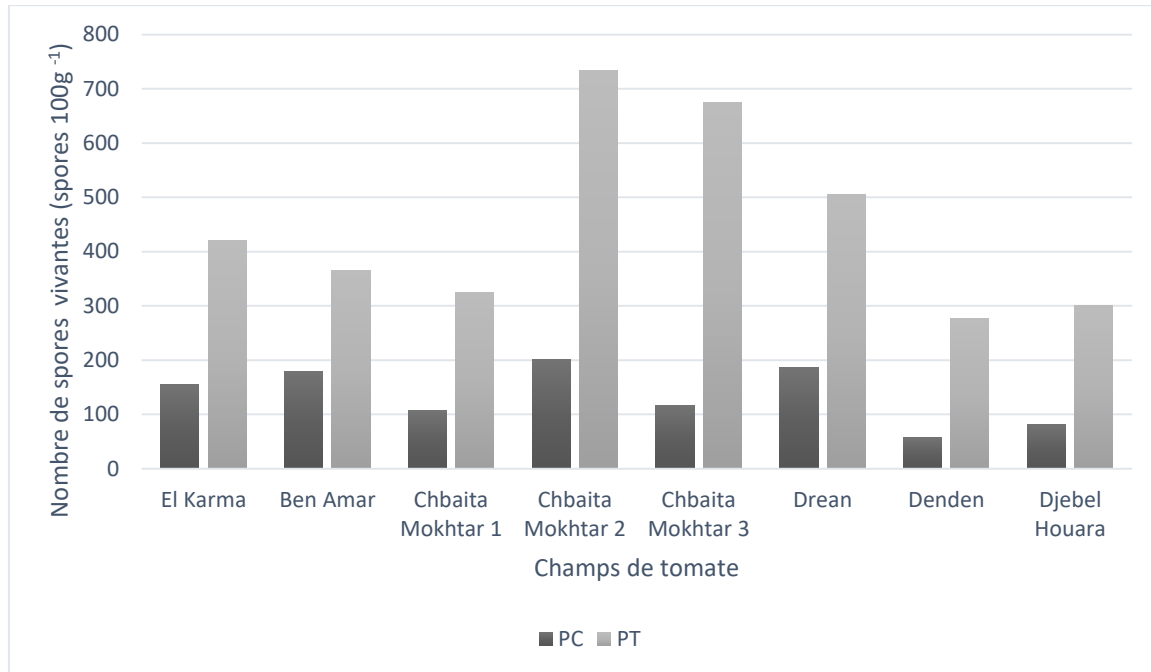


Figure 14 : Abondance des spores vivantes dans les parcelles cultivées (PC) et non cultivées (PT) dans huit champs de tomate au Nord-Est de l'Algérie (El Karma, Ben Amar, Chbaïta Mokhtar 1, 2 et 3, Drean, Denden et Djebel Houara).

Dans cette étude, la biodiversité des communautés CMA a été étudiée par le dénombrement et l'identification des spores présentes directement dans les sols pendant la récolte de tomate, représentant un sous-ensemble de la diversité entière des CMA.

Le nombre d'espèces CMA détectées dans les parcelles cultivées est cohérent avec ceux précédemment trouvés dans les agroécosystèmes méditerranéens (Bedini *et al.*, 2013 ; Turrini *et al.*, 2016).

Les parcelles témoins non cultivées ont eu un nombre plus élevé en spores par rapport aux parcelles cultivées, témoignant de l'impact négatif des pratiques culturales conventionnelles sur l'abondance des CMA (Oehl, 2004). Il y a eu également un grand nombre de spores mortes dans les parcelles cultivées. Leurs proportions dépassaient les 62.20% pour chaque site. Ceci peut être expliqué par l'effet néfaste des rotations de cultures (Mathimaran *et al.*, 2007), de la fertilisation et des niveaux de P (Cibichakravarthy *et al.*, 2014 ; Kumar *et al.*, 2016) du travail de sol (Jansa *et al.*, 2002) et de l'application de pesticides (Rivera-Beveril *et al.*, 2017).

Certaines espèces ont été enregistrées en faible nombre ; leur rareté peut refléter leur faible adaptabilité par rapport à plusieurs espèces de *Glomeraceae*, qui se sont révélées plus adaptables (Castillo *et al.*, 2006). *F. mosseae* a été l'une des espèces prédominantes dans les sols cultivés. Avio *et al.*, (2013), dans une étude sur les communautés CMA dans un agroécosystème méditerranéen, ont démontré que le travail de sol favorise la prédominance de *F. mosseae*. Rivera-Beverril *et al.*, (2017) a montré que *F. mosseae* était le taxon le plus tolérant à l'exposition aux pesticides.

S. constrictum a été également l'une des espèces les plus dominantes. Ce résultat corrobore celui de Wang *et al.*, (2008), qui ont démontré que cette espèce est fréquente dans les sols agricoles cultivés intensivement en Chine, avec *F. mosseae* et *Glomus caledonium*. *R. irregularis* prévalait également dans les micro-agrosystèmes étudiés. Doude & Schenck (1990) ont rapporté que cette espèce est moins sensible à la fertilisation P et N, suggérant que sa sporulation peut réduire le chemin du flux de carbone et contribuer à l'insensibilité relative de cette espèce à la fertilisation.

1.2 Niveaux de colonisation racinaire des plants de tomate

L'estimation des niveaux de colonisation racinaires des plants de tomate dans les PC au niveau des huit champs a été effectuée (Tableau 7). L'observation microscopique a révélé la présence des CMA dans les racines des tomates et leur colonisation a été mesurée à travers 5 paramètres.

La fréquence de la colonisation mycorhizienne (F%) a été relativement élevée et allait de 85.08% à 98.82% dans les champs de tomate. L'intensité de la colonisation du cortex racinaire (M%) allait de 10.74% à 23.33% à Denden, Ben Amar, El Karma et Chbaita Mokhtar 1, et de 30.99% à 49.25% à Drean, Djebel Houara, Chbaita Mokhtar 2 et 3. L'intensité de la colonisation développée dans la partie mycorhizée du système racinaire (m%) à Denden, Ben Amar et El Karma a été de 10,97%, 15,91% et 18.33%, respectivement, à Chbaita Mokhtar 1, Drean et Djebel Houara de 25,02%, 32,86 à 41.52%, respectivement, et les plus élevées ont été notées à Chbaita Mokhtar 1 et 2, avec 48.25 et 49.25%, respectivement. La teneur arbusculaire de la colonisation dans la partie mycorhizée du système racinaire (a%) a été relativement basse et allait de 8.07% à 19.85%. La teneur arbusculaire de la colonisation ramené au système racinaire entier (A%) a été très basse et allait de 1.54% à 9.49%.

Tableau 7 : Niveaux de colonisation mycorhizienne racinaire (F%, M%, m%, a%, et A%) des plants de tomate cultivés dans huit champs de tomate au Nord-Est de l’Algérie (El Karma, Ben Amar, Chbaïta Mokhtar 1, 2 et 3, Drean, Denden et Djebel Houara).

Sites d'étude Paramètres de colonisation racinaire	El Karma	Ben Amar	Chbaïta mokhtar 1	Chbaïta mokhtar 2	Chbaïta mokhtar 3	Drean	Denden	Djebel Houara
F%	94.89 ± 5.29 ab	96.47 ± 4.89 ab	95.71 ± 4.92 ab	98.82 ± 2.63 a	97.49 ± 3.45 ab	98.57 ± 3.19 a	85.08 ± 14.60 b	98.75 ± 2.80 a
M%	17.98 ± 2.95 cd	15.53 ± 5.29 d	23.33 ± 4.71 cd	48.25 ± 6.10 a	49.25 ± 6.93 a	30.99 ± 8.97 bc	10.74± 8.98 d	41.25 ± 11.17 ab
m%	18.33 ± 3.16 de	15.91 ± 6.50 de	25.02 ± 4.17 cd	48.69 ± 5.63 a	49.25 ± 7.46 a	32.86 ± 9.44 bc	10.97± 8.42e	41.52 ± 10.69 ab
a%	8.91 ± 5.51a	8.75 ± 4.97 a	12.67 ± 4.61 a	19.85 ± 12.31 a	9.56 ± 3.29 a	8.34± 6.14 a	8.07 ± 11.38 a	14.57 ± 12.66 a
A%	2.85 ± 3.03 ab	1.63 ± 1.75 b	3.63 ± 2.52 ab	9.49 ± 6.29 a	4.59 ± 2.18 ab	2.91 ± 2.06 ab	1.54 ± 3.17 b	5.92 ± 5.67 ab

Les lettres différentes dans chaque ligne indiquent des différences significatives dans chaque paramètre des niveaux de colonisation selon le test HSD de Tukey ($p < 0.05$).

Dans les huit champs de tomate, les niveaux d’intensités de la colonisation racinaire M% et m% sont faibles, ce qui est plus élevé par rapport aux résultats obtenus par Cavagnaro *et al.*, (2010) sur la tomate industrielle dans 26 micro-agrosystèmes dont les racines de tomate sont colonisées à moins de 15% et la colonisation est complètement absente dans plus de 40% des sols.

Comme pour l’abondance des spores, ces bas niveaux de colonisation mycorhizienne peuvent être dus à l’effet des fertilisants chimiques et le travail du sol, qui réduisent la croissance des CMA et la colonisation racinaire, comme cela a été rapporté par Gryndler *et al.*, (2006) et Kabir *et al.*, (1997).

Par ailleurs, ces deux sols étant pauvres en phosphore, les plants inoculés ont répondu positivement aux applications croissantes de fertilisants, les rendements les plus élevés étant obtenus avec les plus fortes doses. L'absorption du phosphore dans de nombreuses cultures est améliorée par les CMA, en particulier dans les sols pauvres en phosphore (Grant *et al.*, 2005).

2 Evaluation de l'effet des champignons mycorhiziens à arbuscules indigènes et commerciaux sur la croissance de la tomate industrielle sous serre

Dans ce travail, des champignons mycorhiziens à arbuscules natifs sélectionnés (mélange de *Funneliformis mosseae* et *Septoglomus constrictum*) et exotiques d'un inoculum commercial ont été testés pour leur effet sur la croissance des plants de tomate industrielle dans un sol agricole stérile (SS) et non stérile (NS) prévu pour cette culture. Ainsi, le potentiel mycorhizogène du sol avant le lancement de l'expérience a été évalué selon la méthode MPN. Ensuite, les niveaux de colonisation mycorhizienne des racines, la hauteur, le poids frais et sec des parties aériennes et racinaires ont été mesurés après deux mois de croissance dans des conditions contrôlées de serre, aussi bien chez des plantes inoculées ou non avec des champignons indigènes ou commerciaux.

2.1 Potentiel mycorhizogène du sol et niveaux de colonisation des racines mycorhizées

Le nombre de propagules de CMA indigènes aptes à générer une colonisation dans le sol du champ (MPN) avant le début de l'expérience a été de 45 ± 0.41 par 50 g de sol (soit 900 propagules par kg de sol).

Les plants de tomate cultivés dans le sol non stérile (NS) ont eu un niveau de colonisation mycorhizienne significativement plus élevée par rapport aux plants cultivés dans le sol stérile (SS). Les traitements inoculum commercial (IC) ou isolat fongique natif (IF) ont eu un effet important sur la colonisation mycorhizienne des racines de cette plante (Figure 15). Les plants inoculés par IC ont présenté un niveau de colonisation significativement plus élevé (51,7%) que ceux inoculés par IF (44,5%).

Dans cette étude sur la production de tomate industrielle dans le sol provenant d'un champ algérien, la croissance des plants de tomate a été plus prononcée dans le sol non stérile (NS), qui a également présenté les plus hauts niveaux de colonisation des racines par les CMA. Ceux-ci ont augmenté avec l'inoculum CMA commercial et les isolats fongiques natifs, ce qui reflète probablement un important réseau d'hyphes dans la mycorrhizosphère des plants inoculés. Les résultats sont en accord avec ceux de Zhong-Qun *et al.*, (2007) et Tahat *et al.*, (2008) qui ont montré que les niveaux de colonisation des racines sont positivement corrélés avec la croissance de la tomate.

De plus, l'inoculation par les différents CMA a probablement augmenté le nombre d'espèces dans le sol non stérile. La richesse en espèces de CMA et leur interaction sont connus pour leur

impact positif sur la croissance (Pellegrino *et al.*, 2011 ; Ortas, 2014). Une complémentarité fonctionnelle a été suggérée entre les espèces au sein d'une communauté de CMA colonisant un même système racinaire (Jansa *et al.*, 2008). D'après l'estimation du potentiel mycorhizogène du sol, le sol utilisé dans cet essai est modérément pauvre en propagules aptes à générer une mycorhization (900 par kg de sol) en comparaison avec les résultats de Maiti *et al.*, (2011), qui ont obtenu entre 4900 et 5800 propagule par kg de sol. Le sol d'El Karma convient donc pour l'enrichissement par l'apport d'inoculum exogène afin de promouvoir la colonisation racinaire par les CMA.

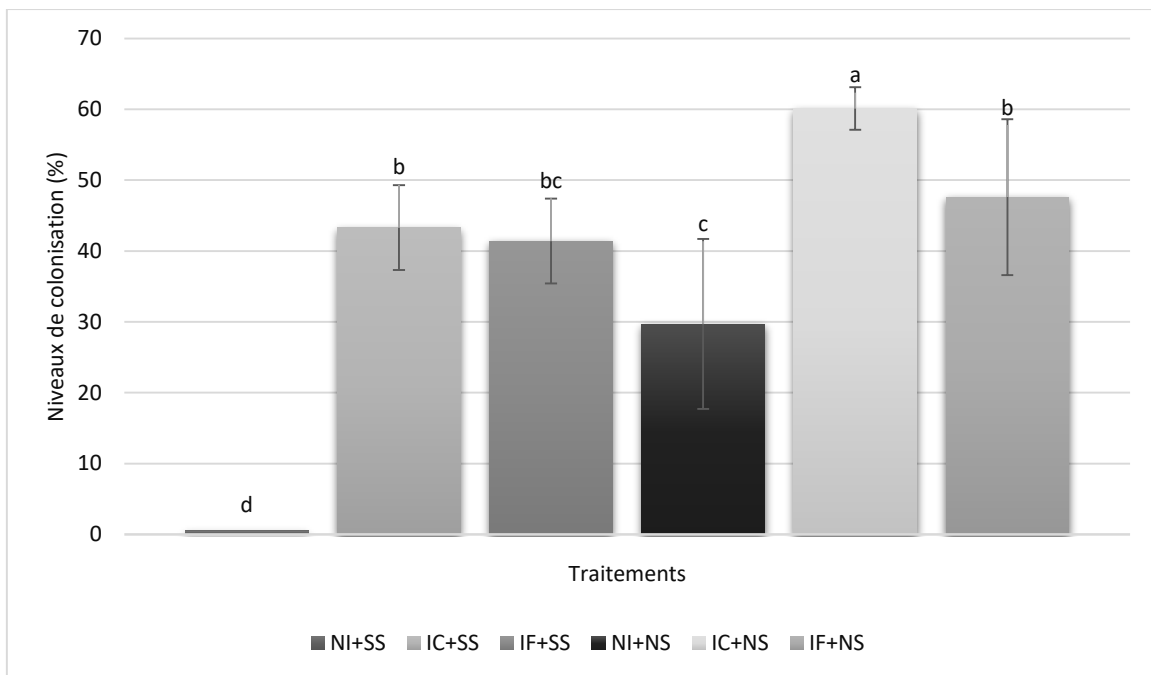


Figure 15 : Effet d'un inoculum CMA commercial (IC) et d'isolats fongiques natifs (IF) sur les niveaux de colonisation mycorhizienne racinaire des plants de tomate cultivés en serre dans du sol stérilisé (SS) et non stérilisé (NS) comparés aux témoins (NI).

Les lettres différentes entre les colonnes indiquent des différences significatives dans les niveaux de colonisation selon le test HSD de Tukey ($p < 0.05$).

2.2 Croissance

L'inoculation par IC et IF a eu un impact significatif sur la plupart des paramètres de croissance des plants de tomate (Tableau 8). Dans l'ensemble, les plantes inoculées ont eu une meilleure croissance par rapport aux non inoculées : + 22% pour la hauteur, + 23% pour le poids frais des parties aériennes, + 16% pour le poids frais des racines, et + 15% pour le poids sec des parties aériennes. Aucune différence significative n'a été observée entre les traitements IC et IF pour chacun des paramètres mesurés.

Les plantes cultivées en sol non stérile (NS) sont significativement plus hautes (+ 21%), ont eu un plus grand poids frais de parties aériennes et racinaires (+21% et +10%, respectivement) et un plus grand poids sec des parties aériennes (+ 10%) par rapport à celles cultivées dans le sol stérile (SS). L'interaction «inoculation x traitement du sol» est significative (Tableau 8).

Les isolats fongiques natifs et l'inoculum CMA commercial ne sont pas significativement différents dans la stimulation de la croissance des plants de tomate. Ortas *et al.*, (2014) ont également montré que l'inoculation de *Citrus aurantium* L. par des spores indigènes a eu le même effet qu'un inoculum commercial. Pellegrino *et al.*, (2011) ont rapporté qu'un inoculum mycorhizien natif a été aussi efficace sur *Trifolium alexandrinum* L., sinon plus que des isolats fongiques exotiques, alors que Schreiner (2007) a montré que les isolats CMA natifs ne sont pas nécessairement mieux adaptés à des sols spécifiques dans l'amélioration de la croissance et l'absorption des nutriments.

L'effet de l'inoculation est plus grand dans le sol NS en comparaison à SS, probablement dû à la synergie entre les CMA introduits et les microorganismes du sol déjà présents, dont la population mycorhizienne indigène : le résultat a été un effet remarquable sur la croissance, comme cela a été rapporté par Edathil *et al.*, (1996).

Les plants du traitement NI+SS ont eu une croissance significativement la moins élevée par rapport au reste des traitements. Declerck *et al.*, (2002) ont obtenu des résultats similaires dans une étude sur le bananier en conditions de serre, où la croissance a été la moins élevée dans le traitement des plants non-inoculés cultivés dans un sol pasteurisé. Ceci indique l'importance de la mycorhization pour assurer la croissance des plants ainsi que la présence d'autres microorganismes bénéfiques du sol.

Tableau 8 : Hauteur, poids frais et sec des parties aériennes et racinaires des plants de tomate inoculés par un inoculum CMA commercial (IC) ou par des isolats fongiques natifs (IF) et cultivés en serre.

Paramètres de croissance	Traitements							Signifiante 'Inoculation x Traitement de sol'
	Inoculation				Traitement sol			
	IC	IF	NI	Signifiante	SS	NS	Signifiante	
Hauteur moyenne (cm plant ⁻¹)	39.9 a	40.2 a	31.2 b	P<0.05	32.6 b	41.5 a	P<0.05	P=0.118
Poids frais moyen des parties aériennes (g plant ⁻¹)	21.3 a	20.9 a	16.1 b	P<0.05	17.1 b	21.7 a	P<0.05	P<0.05
Poids frais moyen des parties racinaires (g plant ⁻¹)	5.8 a	5.7 a	4.8 b	P<0.05	5.1 b	5.7 a	P<0.05	P=0.151
Poids sec moyen des parties aériennes (g plant ⁻¹)	8.7 a	8.5 a	7.3 b	P<0.05	7.7 b	8.6 a	P<0.05	P=0.938
Poids sec moyen des parties racinaires (g plant ⁻¹)	1.4 a	1.4 a	1.3 a	P=0.105	1.3 a	1.4 a	P=0.072	P=0.997

Les moyennes dans les lignes suivies par des lettres différentes sont significativement différentes (P <0,05) selon le test HSD de Tukey.



Figure 16 : Plants de tomate au stade premières feuilles dans les plaques micro-alvéolées en pépinière.



Figure 17 : Croissance des plants de tomate inoculés avec un inoculum CMA commercial (IC) ou avec un isolat fongique natif (IF) et cultivés dans un sol stérile (SS) et non-stérile (NS) en serre.

En conditions de serre, l'efficacité d'espèces de CMA natives sélectionnées et commerciales sur la croissance de la tomate dans un sol agricole stérile et non stérile a été évaluée. Les résultats montrent que les plants de tomate cultivés dans le sol non stérile ont une colonisation mycorhizienne plus élevée que celle des plants cultivés dans le sol stérile, allant de pair avec la croissance. Il n'y a pas de différence significative entre l'isolat fongique natif et l'inoculum commercial dans l'amélioration de la croissance. La colonisation par les CMA a donc une importante implication dans le développement de la tomate et les espèces de CMA natives sont aussi efficaces que celles d'un inoculum commercial.

3 Effets des champignons mycorhiziens à arbuscules et des niveaux de fertilisation sur le développement de la tomate industrielle en conditions de champ

Dans ces deux expériences, l'objectif est d'évaluer le potentiel des CMA dans le maintien de la croissance, de la productivité et de la qualité de la tomate industrielle tout en réduisant la quantité de fertilisants chimiques, au niveau des deux champs agricoles cités précédemment (Ben Amar et El Karma), caractérisés par une population de CMA indigènes diminuée par les pratiques culturales. Pour cela, l'application d'inoculum CMA commercial avec 0, 50 et 100% des doses recommandées de fertilisants chimiques (NPK à Ben Amar, mono-ammonium phosphate, sulfate d'ammonium et NPK à El Karma) a été testée. Ainsi, l'étude du potentiel mycorhizogène du sol avant le lancement des expériences, les niveaux de colonisation mycorhizienne des racines, la hauteur, le poids sec des parties aériennes et racinaires, le rendement total et le nombre de fruits et les paramètres de qualité des fruits ont été mesurés dans les deux expériences. A Ben Amar, le taux de chlorophylle et le nombre de fleurs ont également été mesurés.

3.1 Site de Ben Amar

3.1.1 Potentiel mycorhizogène du sol et colonisation mycorhizienne des racines

L'étude du potentiel mycorhizogène du sol (MPN) avant le lancement de l'expérience a révélé que le sol contient 733 propagules de CMA indigènes par kilogramme de sol aptes à générer une mycorhization.

Dans cet essai en plein champ, tous les plants de tomate ont été colonisés par les CMA, quel que soit le traitement d'inoculation ou les doses d'NPK appliquées (Figure 18). Les plants inoculés ont été significativement plus colonisés par les CMA (17.7%) par rapport aux plants non inoculés (12%), et le plus grand taux de mycorhization a été observé dans le traitement I + 0% NPK, avec 22.7%. La fertilisation a eu un impact négatif sur le niveau de colonisation des racines, qui a diminué significativement avec l'augmentation de la dose de fertilisants. Le plus bas niveau de colonisation (6,7%) a été observé dans le traitement NI + 100% NPK.

Ces résultats montrent donc que l'inoculation par les CMA a eu un effet positif sur les niveaux de colonisation des racines de tomate, cependant, la plus haute dose de fertilisation a significativement réduit cette colonisation racinaire, en comparaison avec les plus faibles doses.

Ces résultats corroborent ceux de Maaitah *et al.*, (2014). Ils confirment donc que les niveaux de colonisation des racines de tomate par les CMA diminuent avec l'augmentation de la fertilisation, spécialement par la P fertilisation.

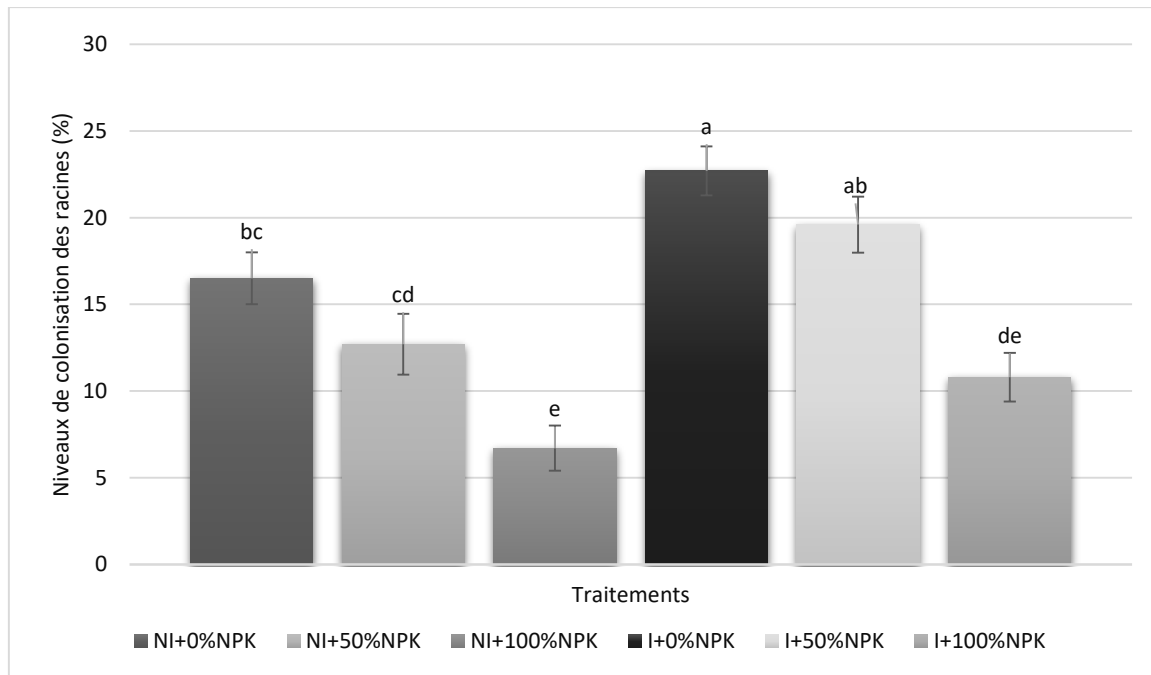


Figure 18 : Effet de la fertilisation par NPK sur les niveaux de colonisation mycorhizienne des racines de tomate inoculée (I) et non-inoculée (NI) par un inoculum de CMA commercial. Les lettres différentes entre les colonnes indiquent des différences significatives dans les niveaux de colonisation selon le test HSD de Tukey ($p < 0.05$).

3.1.2 Croissance des plants

Indépendamment de la dose de fertilisants attribuée, les plants de tomate inoculés ont une hauteur moyenne de 58.1 cm, significativement plus élevée par rapport aux plants non-inoculés qui ont mesuré en moyenne 53.4 cm. La plus forte dose de fertilisants a également augmenté significativement la hauteur moyenne des plants qui est de 63.2 cm. Elle a permis un gain de 22% par rapport au traitement 0% NPK (Tableau 9).

L'inoculation a induit une production d'une biomasse sèche aérienne significativement plus élevée, par rapport aux plants non-inoculés, avec une moyenne de 131.7 g. La fertilisation a significativement augmenté la biomasse sèche aérienne, avec un gain de 41.52% entre les traitements 0% NPK et 100% NPK.

L'application des CMA a également permis la production d'une plus grande biomasse sèche racinaire avec une moyenne de 12.1 g. Les niveaux de fertilisation ont augmenté le poids sec racinaire, avec un gain de 26% entre les traitements 0% NPK et 100% NPK.

L'inoculation par les CMA a amélioré de manière significative la hauteur de la plante et augmenté le poids sec des parties aériennes et racinaires. Ceci est en accord avec les résultats de Chen *et al.*, (2013) sur le concombre, de Baslam *et al.*, (2013b) sur la laitue, de Kaya *et al.*, (2009) sur le poivron et de Copetta *et al.*, (2011) sur la tomate. Cette amélioration de la croissance des plants de tomate peut être due à l'inoculation précoce, dont les bénéfices pour la plante sont connus. Ces bénéfices ont été mis en évidence par Al-Karaki (2006) et Nzanza *et al.*, (2011), qui ont démontré que les CMA et la pré-inoculation ont un impact positif dans l'amélioration de la croissance et le développement des plantules de tomate.

Tableau 9 : Croissance des plants de tomate inoculés par un inoculum CMA commercial et cultivés en champs avec trois doses d'NPK (0, 50 and 100% de la dose recommandée).

Paramètres de croissance	Traitements							Signifiante 'Inoculation x NPK'
	Inoculation			NPK				
	I	NI	Signifiante	0%	50%	100%	Signifiante	
Hauteur moyenne (cm plant ⁻¹)	58,1 a	53,4 b	P<0.05	49,3 b	54,8 b	63,2 a	P<0.05	P=0,855
Poids sec moyen des parties aériennes (g plant ⁻¹)	131,7 a	108,4 b	P<0.05	87,3 b	123,5 a	149,3 a	P<0.05	P=0,812
Poids sec moyen des parties racinaires (g plant ⁻¹)	12,1 a	9,0 b	P<0.05	8,8 b	10,9 ab	11,9 a	P<0.05	P=0,624

Les moyennes dans les lignes suivies par des lettres différentes sont significativement différentes (P <0,05) selon le test HSD de Tukey.

3.1.3 Taux de chlorophylle

-Chlorophylle a

Le taux de chlorophylle (a) a été significativement supérieur chez les plants inoculés (9,6 µg/g) par rapport aux plants non inoculés (7,1 µg/g) dans tous les traitements, avec des augmentations de 27%, 30,90% et 17,80% entre les plants inoculés et non inoculés des traitements à 0, 50 et 100% NPK, respectivement.

La fertilisation a également eu un impact sur le taux de chlorophylle (*a*), qui a augmenté significativement entre 0% et 100% de NPK avec une moyenne de 7.9 et 8.7 $\mu\text{g/g}$, respectivement (Figure 19).

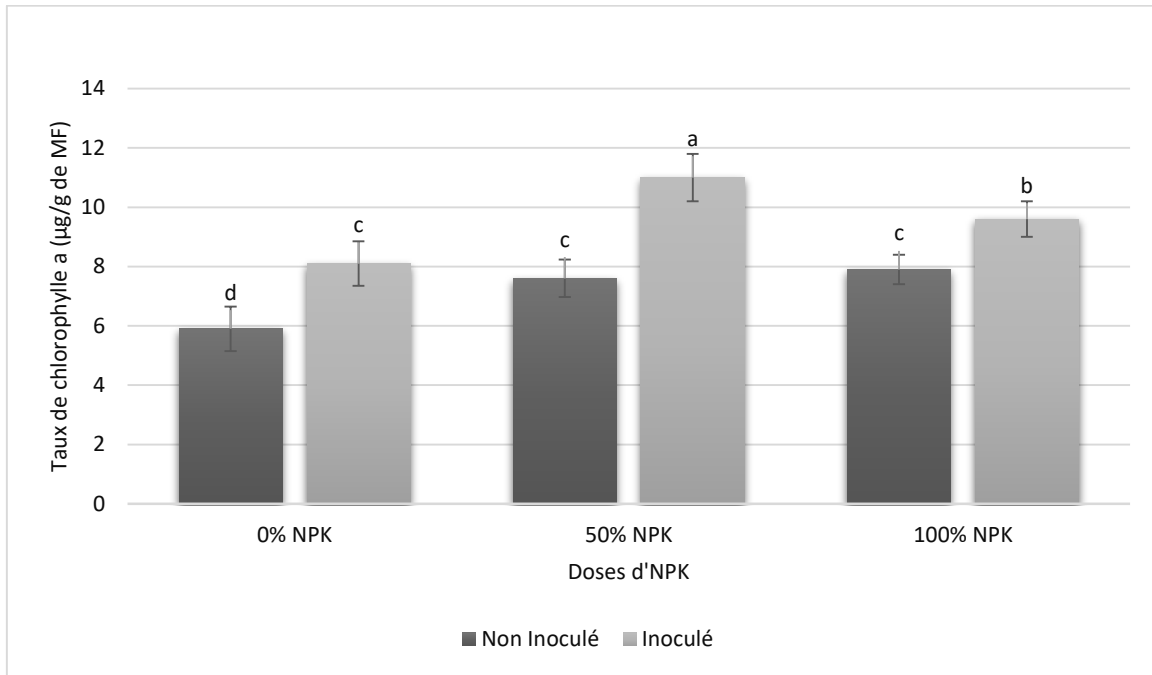


Figure 19 : Taux de concentration en chlorophylle *a* des plants de tomate inoculés (I) et non-inoculés (NI) par un inoculum CMA commercial et cultivés en champ avec trois doses d’NPK (0, 50 et 100% des doses recommandées).

Les lettres différentes entre les colonnes indiquent des différences significatives dans les niveaux de colonisation selon le test HSD de Tukey ($p < 0.05$).

-Chlorophylle *b*

L’inoculation par les CMA et la fertilisation n’ont pas eu d’effet sur le taux de chlorophylle (*b*), qui variait entre 2,3 et 3,4 $\mu\text{g/g}$ (Figure 20).

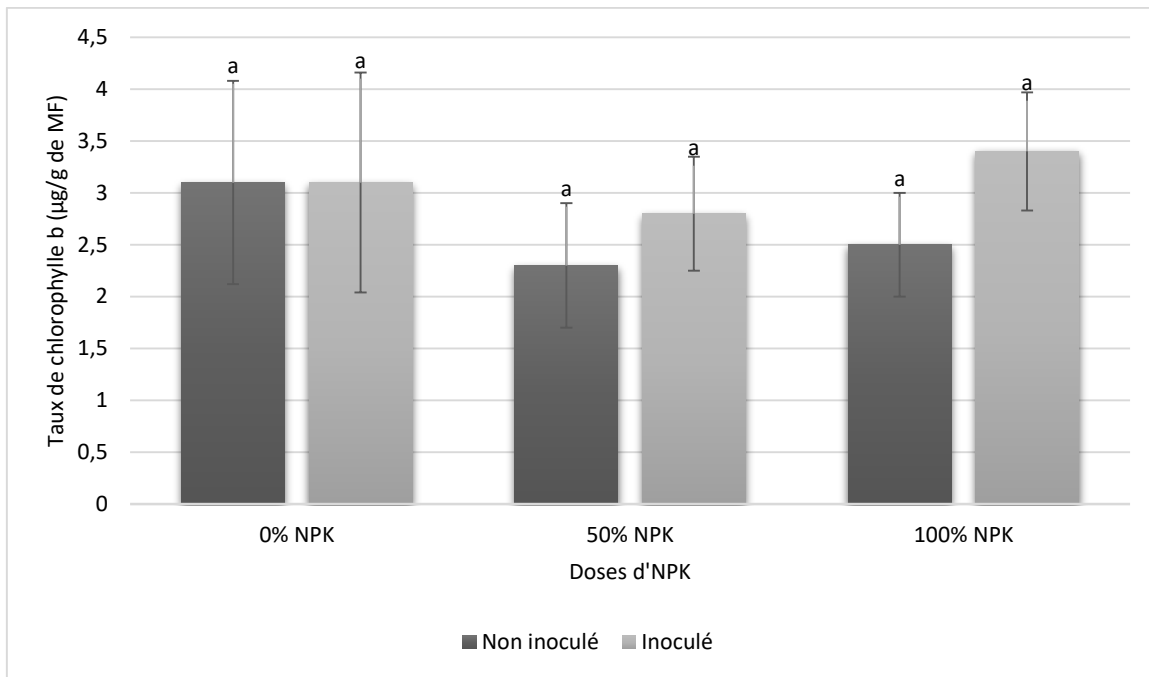


Figure 20 : Taux de concentration en chlorophylle *b* des plants de tomate inoculés (I) et non-inoculés (NI) par un inoculum CMA commercial et cultivés en champ avec trois doses d’NPK (0, 50 et 100% des doses recommandées).

Les lettres différentes entre les colonnes indiquent des différences significatives dans les niveaux de colonisation selon le test HSD de Tukey ($p < 0.05$).

-Chlorophylle (*a+b*)

Indépendamment de la fertilisation, l’inoculation par les CMA a eu un impact significatif sur le taux de chlorophylle (*a+b*), avec une moyenne de 23,3 µg/g chez les plants inoculés et 20,3 µg/g chez les plants non inoculés. Le plus haut taux de chlorophylle (*a+b*) a été obtenu dans le traitement I+50% NPK avec 24,7 µg/g.

La fertilisation NPK n’a pas eu d’impact sur le taux de chlorophylle (*a+b*) (Figure 21).

Certaines études ont démontré l’effet positif des CMA sur le taux de chlorophylle. *Glomus fasciculatum* et un inoculum de CMA commercial ont augmenté la concentration en chlorophylles *a* et *b* chez *Lactuca sativa* L., mais également les taux de caroténoïdes et de tocophérols (Baslam *et al.*, 2013a).

Beltrano *et al.*, (2013), ont observé que les CMA améliorent le taux de chlorophylle chez *Capsicum annuum* L. en conditions de stress de salinité, cependant l’effet des CMA et de l’addition de P n’a pas été remarqué en absence de stress. L’augmentation du taux de chlorophylle total par l’inoculation mycorhizienne serait à l’origine de l’augmentation de la photosynthèse chez les plants inoculés, et serait également attribué à l’augmentation de

l'absorption par les racines mycorhizées de Mg et Fe, qui sont essentiels à la biosynthèse de la chlorophylle (Krishna *et al.*, 2005).

Cette étude a montré que l'NPK n'a pas eu d'effet sur le taux de chlorophylle, ce résultat s'oppose à celui d'Amaya-Caprio *et al.*, (2009), où la fertilisation a augmenté de manière significative le taux de chlorophylle chez *Ipomoea carnea*.

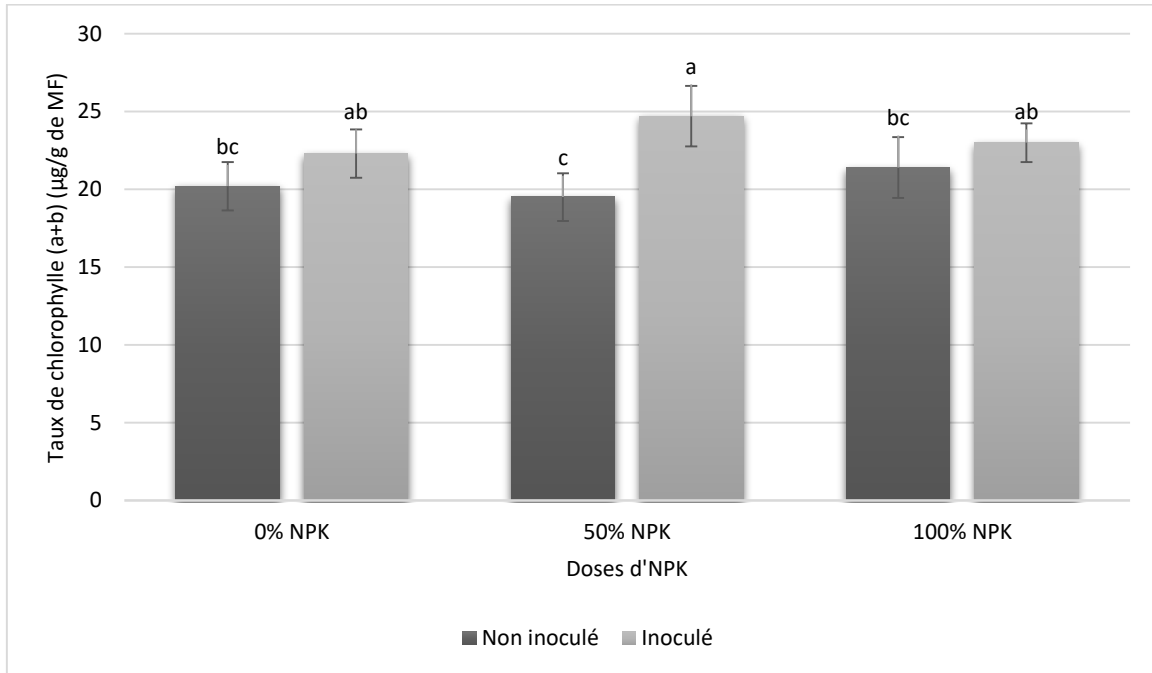


Figure 21 : Taux de concentration en chlorophylle (*a+b*) des plants de tomate inoculés (I) et non-inoculés (NI) par un inoculum CMA commercial et cultivés en champ avec trois doses d'NPK (0, 50 et 100% des doses recommandées).

Les lettres différentes entre les colonnes indiquent des différences significatives dans les niveaux de colonisation selon le test HSD de Tukey ($p < 0.05$).

3.1.4 Nombre de fleurs

L'inoculation a augmenté significativement le nombre de fleurs chez les plants inoculés en comparaison aux plants non-inoculés, avec une moyenne de 47.8 et 43.9 fleurs, respectivement. La fertilisation a également eu un impact positif sur la floraison, qui augmentait avec l'augmentation de la dose d'NPK. Cependant, les différences ne sont pas significatives entre les plants inoculés et non-inoculés (Figure 22).

Le nombre de fleurs a été significativement plus élevé chez les plants inoculés par rapport aux plants non-inoculés, ce qui est en accord avec les résultats de Mujica Pérez & Fuentes Martinez (2012) et ceux d'Osillos & Nagpala (2015), qui ont attribué cela au fait que la floraison

des plants de tomate est plus avancée chez les plants inoculés en comparaison aux plants non-inoculés.

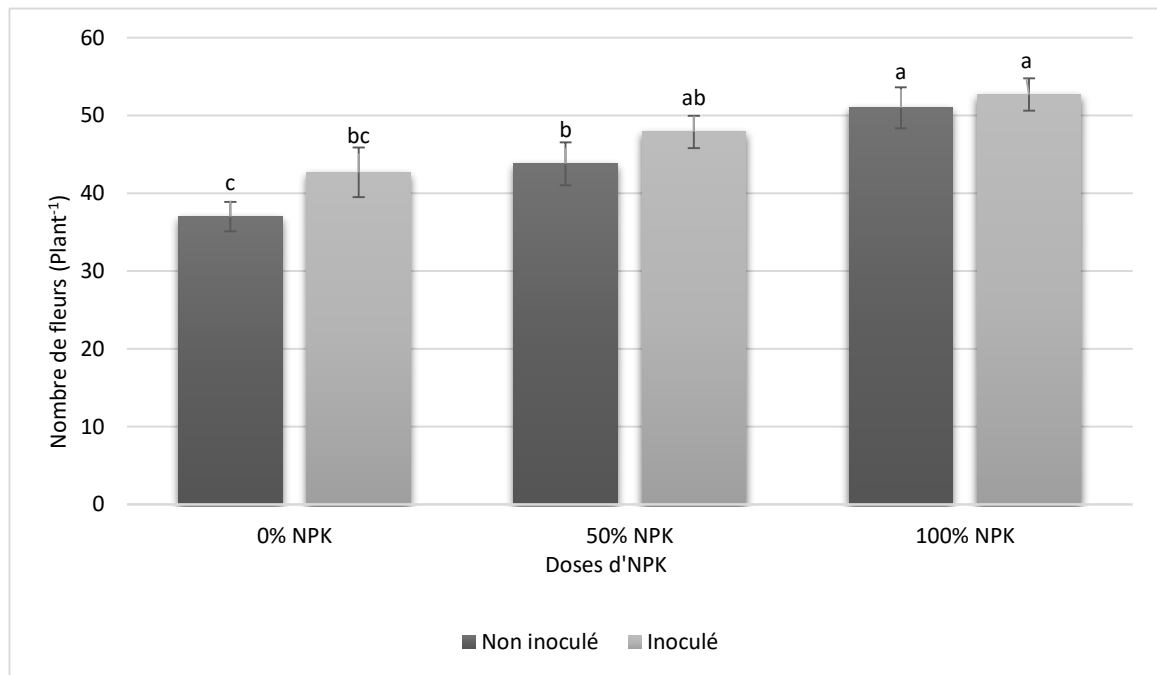


Figure 22 : Nombre de fleurs des plants de tomate inoculés (I) et non-inoculés (NI) par un inoculum CMA commercial et cultivés en champ avec trois doses d’NPK (0, 50 et 100% des doses recommandées).

Les lettres différentes entre les colonnes indiquent des différences significatives dans les niveaux de colonisation selon le test HSD de Tukey ($p < 0.05$).

3.1.5 Rendement et nombre de fruits

Indépendamment de l’apport en NPK, le rendement en tomates a été significativement plus élevé chez les plants inoculés ($17,4 \text{ t ha}^{-1}$) en comparaison aux plants non-inoculés ($16,1 \text{ t ha}^{-1}$). L’apport en NPK a également eu un impact significatif sur le rendement des tomates qui augmentait avec l’augmentation de la dose et les plus hauts rendements ont été obtenus avec le traitement 100% NPK.

Des hausses intéressantes de rendement entre plants inoculés et non-inoculés ont été notées, de 7%, 8.7% et 7.65% dans les traitements 0, 50 et 100% NPK, respectivement (Figure 23). Ce résultat rejoint plusieurs études qui ont montré le potentiel des CMA dans l’accroissement des rendements de la tomate (Al-Karaki, 2006 ; Mujica Pérez & Fuentes Martinez, 2012).

Les analyses physico-chimiques ont indiqué que le sol de Ben Amar était pauvre en P. Ceci peut justifier le fait que les plus bas rendements soient obtenus avec les traitements 0%

NPK, bien que ces derniers ont eu les plus hauts niveaux de colonisation racinaire par les CMA. Vosatka (1995) a affirmé que lorsque les plants ne sont pas fertilisés le P en particulier, devient un facteur limitant de croissance.

Les plus hauts rendements ont été obtenus avec les traitements à 100% de NPK, en dépit de leurs niveaux de colonisation racinaire par les CMA qui étaient les plus bas. Une observation similaire a été mentionnée par Mohammad *et al.*, (2004) sur *Triticum aestivum*. Xavier & Germida (1997) ont noté l'effet de l'inoculation par les CMA ayant une augmentation de 20% dans le rendement en grains du blé Neepawa lorsque 20 kg P ha⁻¹ ont été appliqués. L'addition de P peut être bénéfique dans l'amélioration de la croissance du champignon mycorhizien et des plantes hôtes lorsque le sol est très pauvre en P (Grant *et al.*, 2005).

Le potentiel mycorhizien de ce sol a été moyennement faible en propagules de CMA (733 propagules par kg de sol) par rapport au résultat obtenu par Lehman *et al.*, (2012), et l'addition d'inoculum CMA s'est avérée appropriée dans ce sol, pour augmenter son potentiel mycorhizien d'autant plus que ce sol est pauvre en P.

L'application des CMA a permis une augmentation significative du nombre de fruits chez les plants inoculés, par rapport aux plants non inoculés, avec une moyenne de 22.5 et 18.9 fruits, respectivement. L'apport d'NPK a eu un impact significatif entre 100% NPK et 0% NPK, avec un gain de 22.41%. Cependant, il n'y a pas de différences significatives entre les plants inoculés et non-inoculés de chaque traitement NPK (Figure 24).

Une étude sur la production de la tomate avec combinaison d'inoculation mycorhizienne et fertilisation chimique a montré l'effet positif des CMA sur le rendement, résultant principalement de l'augmentation du nombre de fruits (Candido *et al.*, 2013). Osillos & Nagpala (2015) ont montré que l'émergence des fruits des plants de tomate était plus précoce chez les plants inoculés par rapport aux plants non-inoculés, ce qui était également le cas dans cette expérience.

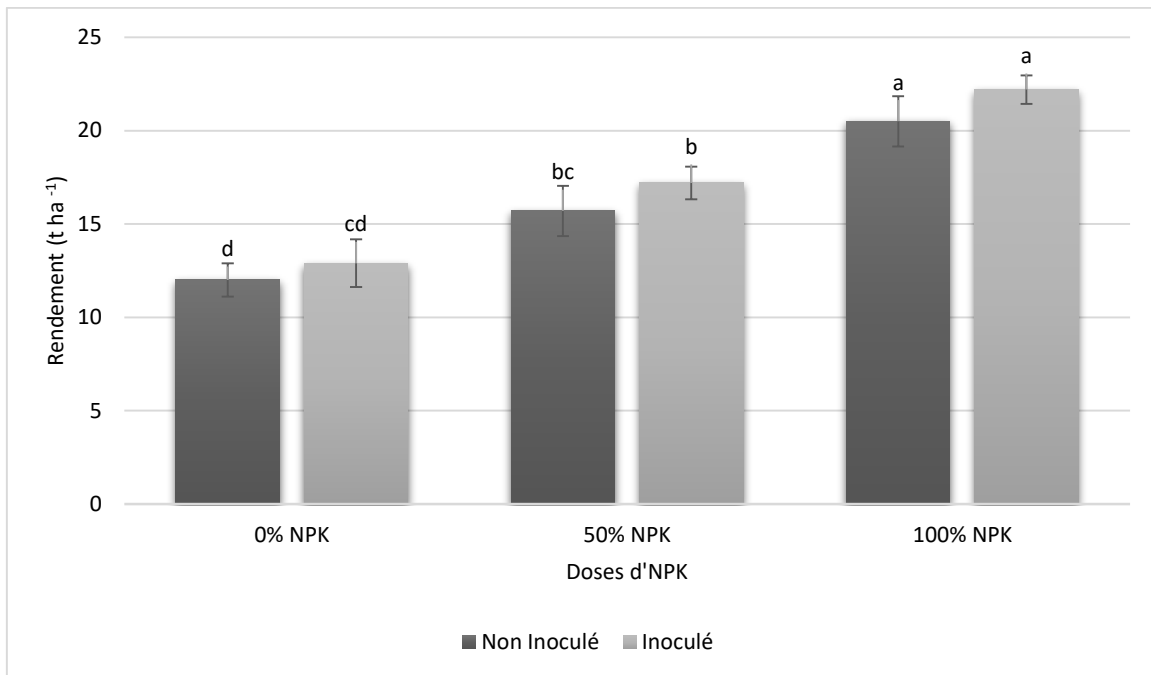


Figure 23 : Rendement des plants de tomate inoculés (I) et non-inoculés (NI) par un inoculum CMA commercial et cultivés en champ avec trois doses d’NPK (0, 50 et 100% des doses recommandées). Les lettres différentes entre les colonnes indiquent des différences significatives dans les niveaux de colonisation selon le test HSD de Tukey ($p < 0.05$).

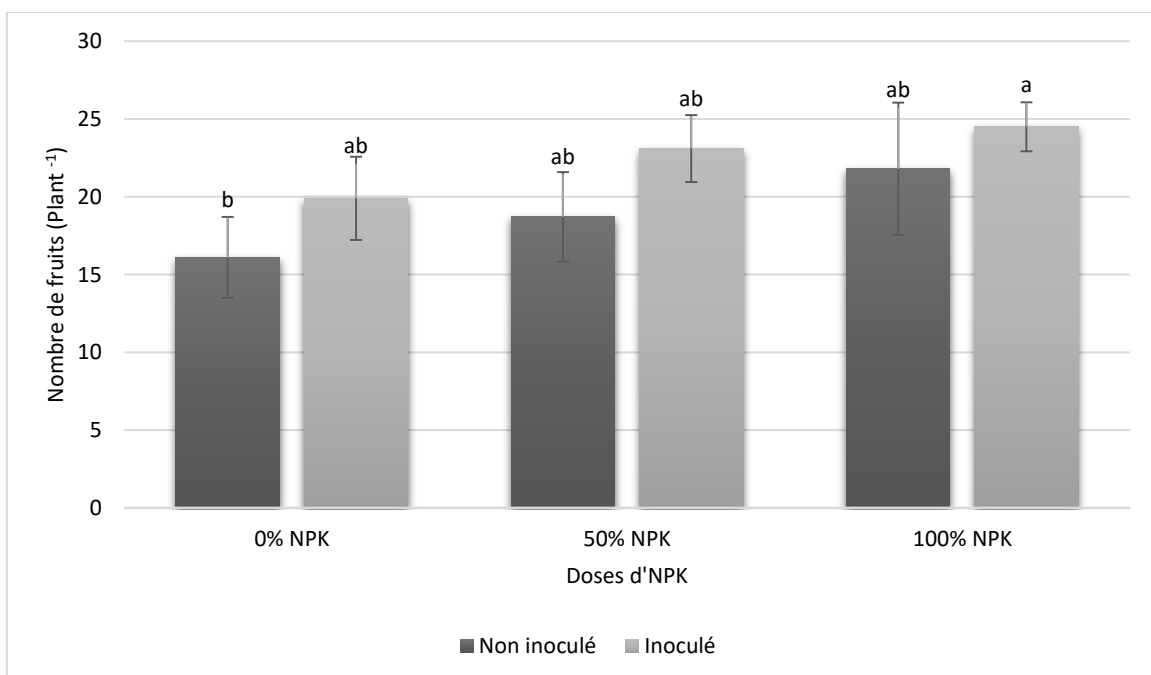


Figure 24 : Nombre de fruits des plants de tomate inoculés (I) et non-inoculés (NI) par un inoculum CMA commercial et cultivés en champ avec trois doses d’NPK (0, 50 et 100% des doses recommandées). Les lettres différentes entre les colonnes indiquent des différences significatives dans les niveaux de colonisation selon le test HSD de Tukey ($p < 0.05$).

3.1.6 Paramètres de qualité des fruits

L'inoculation et la fertilisation n'ont pas eu d'impact sur le taux d'acidité des fruits et la matière sèche soluble, qui variaient entre 6 et 6.5 % et entre 5.9 et 6%, respectivement. En dehors de l'inoculation, l'NPK (100%) a eu un effet significatif sur le pH, avec une moyenne de 5.2. Le pH le plus bas a été observé dans le traitement I+0% NPK avec 4.2 (Tableau 10).

Tableau 10 : Taux d'acidité, matière sèche soluble et pH des fruits de tomate inoculés (I) et non-inoculés (NI) par un inoculum CMA commercial et cultivés avec trois doses d'NPK (0, 50 et 100% de la dose recommandée).

Paramètres Traitements	Taux d'acidité (%)	Matière sèche soluble (%)	pH
NI + 0% NPK	6.2 ± 0.44 a	5.9 ± 0.11 a	4.6 ± 0.24 abc
NI + 50% NPK	6.4 ± 0.5 a	6 ± 0.17 a	4.6 ± 0.29 abc
NI + 100% NPK	6 ± 0.55 a	6 ± 0.26 a	5.2 ± 0.46 a
I + 0% NPK	6.2 ± 1.1 a	6 ± 0.36 a	4.2 ± 0.14 c
I + 50% NPK	6.5 ± 0.75 a	6 ± 0.25 a	4.3 ± 0.26 bc
I + 100% NPK	6.3 ± 0.6 a	6 ± 0.15 a	5.1 ± 0.13 ab

Les lettres différentes dans chaque colonne indiquent des différences significatives selon le test HSD de Tukey ($p < 0.05$).

Dans cette expérience, l'inoculation par les CMA n'a pas eu d'effet significatif sur les paramètres de qualité des fruits de tomate. Giovanetti *et al.*, (2012) ont affirmé que les paramètres de qualité des fruits des plants de tomate tels que la matière sèche, pH, extrait sec soluble et acidité ne sont pas significativement affectés par l'inoculation mycorhizienne par *Glomus intraradices*.

La fertilisation n'a pas eu d'effet sur l'acidité titrable et le taux de matière sèche soluble, cependant la plus haute dose d'NPK a eu un effet significatif sur le pH, corroborant les résultats de Hernández *et al.*, (2014), qui ont montré que la fertilisation à base d'NPK permet d'augmenter le pH des tomates.

3.2 Site d'El Karma

3.2.1 Colonisation mycorhizienne des racines

La colonisation mycorhizienne a été observée chez tous les plants, qu'ils soient inoculés ou non par l'inoculum CMA commercial, quelle que soit la dose de fertilisation chimique (FC) (Figure 25). Cependant, le pourcentage du niveau de colonisation a été significativement plus élevé chez les plants inoculés (40%) en comparaison aux plants non inoculés (27%), spécialement dans le traitement I + 0% FC (44.1%).

La fertilisation a eu un impact significativement négatif sur la colonisation des racines des plants non inoculés et le plus bas niveau a été observé dans 100% FC (26%), en même temps, l'effet de la fertilisation n'a pas été significatif chez les plants inoculés.

Les racines de tomate ont été colonisées par les CMA dans tous les traitements dans cette expérience en plein champ. Cependant, la colonisation chez les plants inoculés a été significativement plus élevée que celle des plants non inoculés. Ceci peut résulter du fait que les CMA introduits soient plus efficaces dans la colonisation des racines que les CMA indigènes seuls, corroborant les résultats de Tawaraya *et al.*, (2012) sur *Allium fistulosum* L. Ceci peut être aussi directement lié à l'inoculum introduit qui a enrichi le potentiel mycorhizien du sol. La colonisation mycorhizienne des racines des plants non inoculés a diminué avec l'augmentation des niveaux de fertilisation chimique, alors que les niveaux de colonisation des plants inoculés n'ont pas changé significativement.

Malgré le fait qu'il soit bien connu que les augmentations de la P fertilisation dans le sol peuvent réduire les taux de colonisation par les CMA et la densité des spores (Al-Karaki, 2013), Ortas (2012) a suggéré que les taux de P utilisés peuvent ne pas être assez élevés pour inhiber la colonisation racinaire par certaines espèces de CMA, ce qui peut être le cas avec l'inoculum commercial utilisé dans nos expériences.

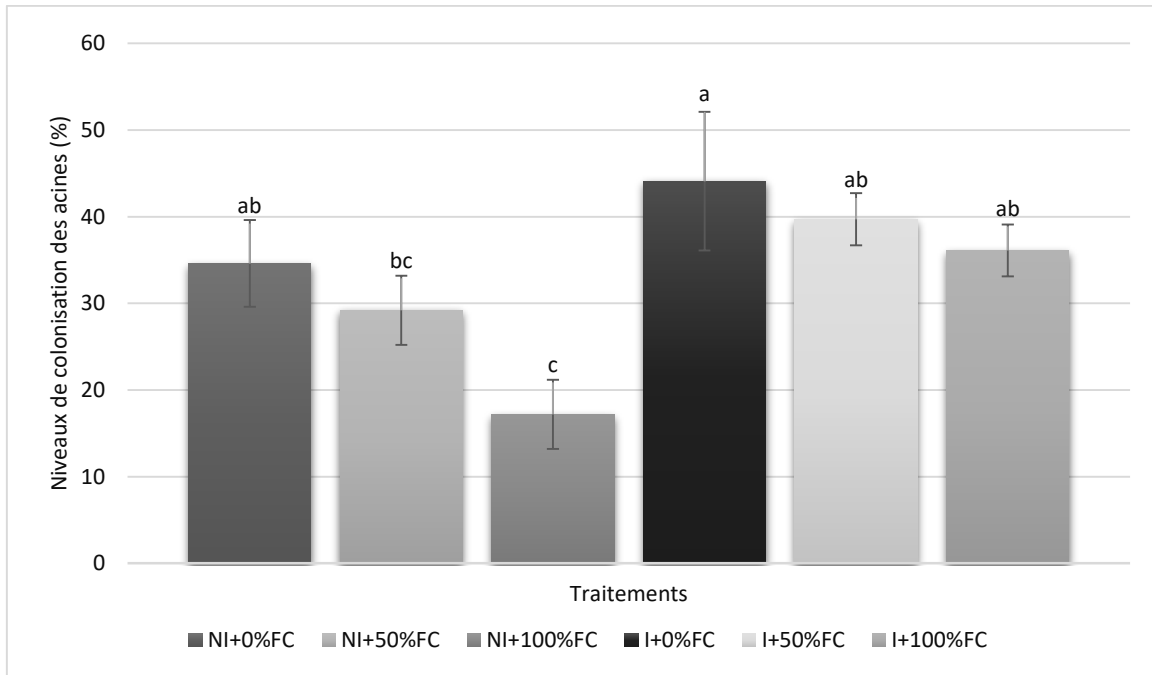


Figure 25 : Effet des fertilisants chimiques (FC) sur les niveaux de colonisation mycorhizienne des racines des plants de tomate inoculés (I) et non-inoculés (NI) par un inoculum CMA commercial.

Les lettres différentes entre les colonnes indiquent des différences significatives dans les niveaux de colonisation selon le test HSD de Tukey ($p < 0.05$).

3.2.2 Croissance des plants de tomate

Les résultats sont présentés dans le tableau 11. En dehors du niveau de la fertilisation chimique appliqué, la hauteur totale des plants de tomate inoculés par un inoculum CMA commercial est significativement plus grande ($48.4 \text{ cm plant}^{-1}$) par rapport aux plants non inoculés ($39.7 \text{ cm plant}^{-1}$), représentant un gain de 18%. La fertilisation a augmenté la hauteur des plants qui sont plus grands de 15% avec la dose 100% FC en comparaison avec 0% FC.

Les poids secs des parties aériennes et racinaires sont également plus élevés chez les plants inoculés par rapport aux plants non inoculés (+42% et +19%, respectivement). Ici également, la fertilisation a eu un impact significatif sur le poids sec des parties aériennes, avec une augmentation de 22% entre les doses 100% et 0% FC, et a résulté en une augmentation significative du poids sec racinaire (+32%) entre les doses 50% et 0% FC. L'interaction 'inoculation x fertilisation' est significative pour les poids secs des parties aériennes et racinaires.

L'inoculation par les CMA dans le champ a eu un effet positif pour tous les paramètres de croissance de la tomate comparé aux plants non inoculés, suggérant que les CMA introduits

sont plus efficaces que les CMA indigènes, comme cela a déjà été observé par Ortas (2015) sous des conditions de champ en long terme. Etant donné que l'étude du potentiel mycorhizogène du sol a révélé que le sol est modérément pauvre en propagules aptes à générer une mycorhization, les espèces indigènes peuvent être soit rares soit inefficaces à cause des perturbations du sol causées par les pratiques culturales qui tendent à être nocives pour les populations de CMA (Hamel, 1996 ; Gosling *et al.*, 2006).

La croissance de la tomate au champ a été très influencée par la FC. En effet, un minimum de 50% FC est suffisant pour obtenir le poids sec maximal des parties aériennes. En absence de fertilisants (0% FC), la croissance a été très faible malgré le haut niveau de colonisation mycorhizienne racinaire. Ceci peut être expliqué par la déficience du sol en P et en matière organique (paragraphe 2.2, p. 35).

Teste *et al.*, (2016) ont rapporté que malgré une forte colonisation racinaire par les CMA et une grande abondance et diversité des plantes hôtes potentielles, les sols déficients en P induisent les plus faibles biomasses d'hyphes extra racinaires qui permettent une plus grande acquisition en P et, donc une meilleure croissance. Ceci peut expliquer pourquoi les plants de tomate ont répondu positivement à l'inoculation et à la fertilisation pour arriver à une bonne croissance dans le sol de cette présente étude.

Subhashini (2016) a montré que dans un sol pauvre en nutriments, l'addition d'NPK et de CMA a mené vers des augmentations significatives des biomasses de la plante *Nicotiana tabacum* L. D'autre part, Schreiner (2007) a rapporté que les vignes cultivées dans des sols déficients en P sont hautement dépendantes des CMA pour acquérir le P nécessaire pour leur croissance et l'acquisition d'autres nutriments, alors que les vignes cultivées dans des sols plus fertiles sont moins dépendantes des CMA bien qu'ils bénéficient toujours d'une plus grande absorption en P.

Tableau 11 : Croissance des plants de tomate inoculés (I) et non-inoculés (NI) par un inoculum CMA commercial et cultivés en champs avec trois doses de fertilisants chimiques (0, 50 et 100% des doses recommandées).

Paramètres de croissance	Traitements							Signifiante 'Inoculation x Fertilisation'
	Inoculation			Fertilisation chimique				
	I	NI	Signifiante	0%	50%	100%	Signifiante	
Hauteur moyenne (cm plant ⁻¹)	48.4 a	39.7 b	P<0.05	40.9 c	43.2 b	48.1 a	P<0.05	P=0.115
Poids sec moyen des parties aériennes (g plant ⁻¹)	89.8 a	51.7 b	P<0.05	59.6 b	75.4 A	77.0 a	P<0.05	P<0.05
Poids sec moyen des parties racinaires (g plant ⁻¹)	9.7 a	7.8 b	P<0.05	7.2 c	10.6 a	8.5 b	P<0.05	P<0.05

Les moyennes dans les lignes suivies par des lettres différentes sont significativement différentes (P <0,05) selon le test HSD de Tukey

3.2.3 Rendement et nombre de fruits

L'inoculation mycorhizienne a eu un effet significatif sur le rendement total des plants de tomate, qui est plus élevé chez les plants inoculés (57.1 t ha⁻¹) par rapport aux plants non inoculés (43.93 t ha⁻¹) (+23%) (Figure 26). Les doses croissantes de fertilisants chimiques ont également augmenté significativement le rendement en fruits, et un gain en poids total de 21%, 24% et 22% a été enregistré avec l'inoculation CMA dans les traitements 0, 50 et 100% FC, respectivement. Il est à noter qu'aucune différence significative n'a été observée entre le rendement obtenu chez les plants inoculés ayant reçu 50% FC et les plants non inoculés ayant reçu 100% FC (Figure 26).

Pour le nombre de fruits, des augmentations de 41%, 25% et 37% ont été observées entre les plants inoculés et non inoculés des traitements 0, 50 et 100% FC, respectivement (Figure 27).

Les plus hauts rendements en tomate ont été obtenus en champ avec l'inoculum commercial plus 100% de FC, ce qui est en accord avec l'observation de Mujica Pérez *et al.*, (2010) selon laquelle les rendements en tomates augmentent après que l'application des CMA soit combinée avec une dose complète de fertilisant phosphaté. Hu *et al.*, (2010) ont également rapporté que le rendement et l'acquisition en P des plants de blé cultivés avec une application à long terme

d’NPK ont été clairement limités mais qu’ils pouvaient être significativement améliorés par l’inoculation avec le CMA *Glomus caledonium*.

Cette étude au champ montre également qu’en présence de l’inoculum CMA commercial, une application de 50% de la dose recommandée de fertilisants chimiques induit le même rendement en fruits de tomate que la dose complète de fertilisants en absence inoculation ; ce traitement représente la meilleure combinaison pour un rendement optimal. Un résultat similaire a été obtenu dans la culture de pastèque dans le Nord-Est de l’Algérie, où le même inoculum commercial a été utilisé (Hamza, communication personnelle).

Ces études et d’autres (Poulton *et al.*, 2002 ; Tawaraya *et al.*, 2012 ; Zhang *et al.*, 2015) consolident l’idée que l’application de l’inoculation par les CMA a le potentiel de réduire l’utilisation des fertilisants chimiques en larges quantités.

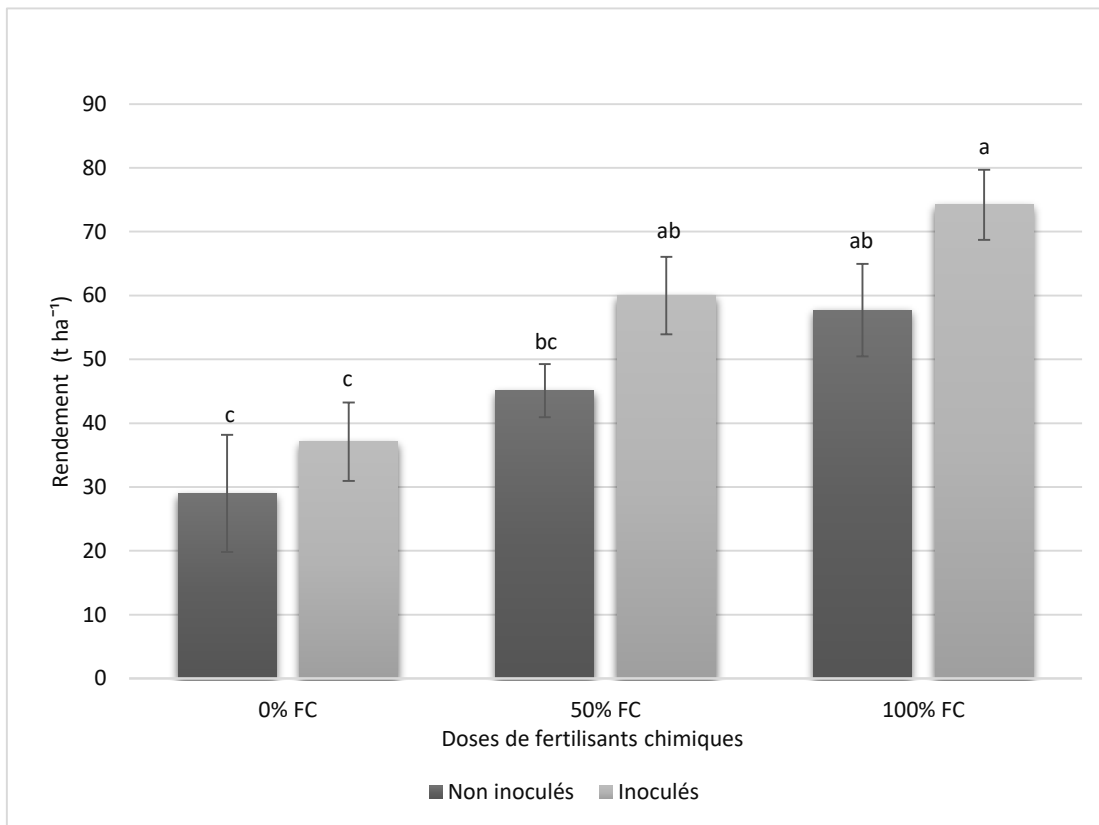


Figure 26 : Rendement des plants de tomate inoculés par un inoculum CMA commercial et cultivés en champ avec trois doses de fertilisants chimiques (0, 50 et 100% des doses recommandés). Les lettres différentes entre les colonnes indiquent des différences significatives dans les niveaux de colonisation selon le test HSD de Tukey ($p < 0.05$).

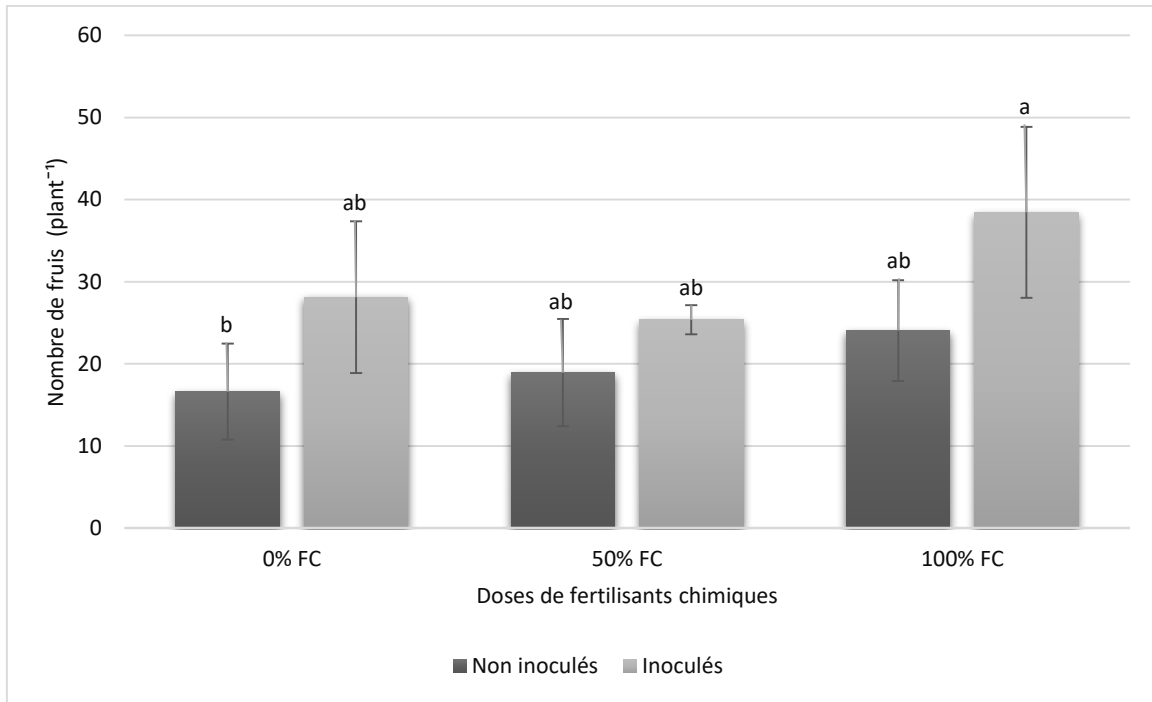


Figure 27 : Nombre de fruits des plants de tomate inoculés avec un inoculum CMA commercial et cultivés en champ avec trois doses de fertilisants chimiques (0, 50 and 100% des doses recommandées).

Les lettres différentes entre les colonnes indiquent des différences significatives dans les niveaux de colonisation selon le test HSD de Tukey ($p < 0.05$).

3.2.4 Paramètres de qualité des fruits

L'inoculation CMA et la fertilisation n'ont pas eu d'effet sur les paramètres de qualité des fruits de la tomate. Cependant, la fertilisation a eu un effet significatif sur la matière sèche soluble, les plus hauts taux étaient obtenus chez les traitements 100% FC avec 7% (Tableau 12).

Tableau 12 : Taux d'acidité, matière sèche soluble et pH des fruits des plants de tomate inoculés (I) et non-inoculés (NI) avec un inoculum CMA commercial et cultivés en champ avec trois doses de fertilisants chimiques(FC) (0, 50 et 100% des doses recommandées).

Paramètres Traitements	Taux d'acidité (%)	Matière sèche soluble (%)	pH
NI + 0% FC	11 ± 1.4 a	6 ± 0.17 b	5.7 ± 0.15 a
NI + 50% FC	9.7 ± 1.17 ab	6 ± 0.42 b	5.8 ± 0.25 a
NI + 100% FC	8 ± 1.55 bc	7 ± 0.3 a	6 ± 0.42 a
I + 0% FC	7 ± 0.83 c	5.9 ± 0.56 b	5.8 ± 0.51 a
I + 50% FC	10.9 ± 0.9 a	6 ± 0.36 b	5.8 ± 0.2 a
I + 100% FC	11.1 ± 1.6 a	7 ± 0.26 a	6.1 ± 0.47 a

Les lettres différentes dans chaque colonne indiquent des différences significatives selon le test HSD de Tukey ($p < 0.05$).

L'inoculation n'a pas eu d'effet sur l'acidité, la matière sèche et le pH des fruits de tomate. Candido *et al.*, (2013) ont affirmé que l'extrait sec soluble des fruits de la tomate mycorhizée n'est pas affecté par un inoculum commercial à base de *Glomus mosseae*, *G. viscosum*, *G. intraradices*, ainsi que des PGPR comme *Pseudomonas sp.*, *P. fluorescens*, *Bacillus subtilis*, *Streptomyces sp.*, et le champignon saprophyte *Trichoderma viride*. Les résultats obtenus vont à l'encontre de l'étude de Subramanian *et al.*, (2006) selon laquelle l'inoculation par les CMA améliore la qualité des fruits de tomate en réduisant l'acidité.

La fertilisation n'a eu d'effet que sur le taux de matière sèche, qui est la plus élevée avec la fertilisation à 100% FC. Peet *et al.*, (2004) ont montré que de fortes doses de fertilisants permettent d'augmenter significativement le Brix des tomates.



Figure 28 : Plants de tomate non inoculés (gauche) et inoculés par un inoculum CMA commercial (droite) et fertilisés 2 semaines après la transplantation au site d'El Karma.



Figure 29 : Plant de tomate non inoculé (à gauche) et inoculé par un inoculum CMA commercial (à droite) cultivés avec 50% FC.



Figure 30 : Récolte des fruits des plants de tomate inoculés par un inoculum CMA commercial (à gauche) et non inoculés (à droite) et cultivés avec trois doses de fertilisants chimiques.

Les résultats relatifs aux deux expériences sur les effets des champignons mycorhiziens à arbuscules et des niveaux de fertilisation sur la tomate industrielle en conditions de champ de Ben Amar et El Karma sont récapitulés dans les tableaux 13 et 14, respectivement.

Tableau 13 : Niveaux de colonisation racinaire, croissance, rendement et qualité de la tomate industrielle inoculés (I) et non-inoculés (NI) par un inoculum CMA commercial et fertilisés avec trois doses d’NPK (0, 50 et 100% de la dose recommandée) dans le site de Ben Amar.

Traitements Paramètres	NI + 0% NPK	NI + 50% NPK	NI +100% NPK	I + 0% NPK	I + 50% NPK	I + 100% NPK
Niveaux de colonisation mycorhizienne (%)	16.5 ± 1.5 bc	12.7 ± 1.75 cd	6.7 ± 1.3 e	22.7 ± 1.42 a	19.6 ± 1.62 ab	10.8 ± 1.4 de
Hauteur (cm plant ⁻¹)	47.3 ± 3.5 c	51.7 ± 4.3 bc	61.3 ± 4.8 ab	51.3 ± 3.81 bc	58 ± 5.77 abc	65 ± 6.6 a
Poids sec aérien (g plant ⁻¹)	71 ± 4.34 b	115 ± 4.9 ab	139.3 ± 5.45 a	103.7 ± 6.3 ab	132 ± 4.2 a	159.3 ± 6.68 a
Poids sec racinaire (g plant ⁻¹)	7.8 ± 0.92 c	9.3 ± 0.8 bc	10 ± 2.14 abc	9.8 ± 2.4 abc	12.6 ± 1.7 ab	13.9 ± 1.1 a
Taux de chlorophylle a (µg/g de MF)	5.9 ± 0.75 d	7.6 ± 0.63 c	7.9 ± 0.5 c	8.1 ± 0.75 c	11 ± 0.8 a	9.6 ± 0.6 b
Taux de chlorophylle b (µg/g de MF)	3.1 ± 0.98 a	2.5 ± 0.6 a	2.5 ± 0.5 a	3.1 ± 0.6 a	2.8 ± 0.55 a	3.4 ± 0.57 a
Taux de chlorophylle (a+b) (µg/g de MF)	20.2 ± 1.56 bc	19.5 ± 1.53 c	21.4 ± 1.96 bc	22.3 ± 1.56 ab	24.7 ± 1.94 a	23 ± 1.24 ab
Nombre de fleurs (plant ⁻¹)	37 ± 1.9 c	43.8 ± 2.75 b	51 ± 2.64 a	42.7 ± 3.2 bc	47.9 ± 2.11 ab	52.7 ± 2.2 a
Rendement (t ha ⁻¹)	12 ± 0.89 d	15.7 ± 1.35 bc	20.5 ± 1.35 a	12.9 ± 1.28 cd	17.2 ± 0.87 b	22.2 ± 0.76 a
Nombre de fruits (plant ⁻¹)	16.1 ± 2.6 b	18.7 ± 2.9 ab	21.8 ± 4.25 ab	19.9 ± 2.7 ab	23.1 ± 2.15 ab	24.5 ± 1.58 a
Taux d’acidité (%)	6.2 ± 0.44 a	6.4 ± 0.5 a	6 ± 0.55 a	6.2 ± 1.1 a	6.5 ± 0.75 a	6.3 ± 0.6 a
Matière sèche soluble (%)	5.9 ± 0.11 a	6 ± 0.17 a	6 ± 0.26 a	6 ± 0.36 a	6 ± 0.25 a	6 ± 0.15 a
Ph	4.6 ± 0.24 abc	4.6 ± 0.29 abc	5.2 ± 0.46 a	4.2 ± 0.14 c	4.3 ± 0.26 bc	5.1 ± 0.13 ab

Les moyennes dans les lignes suivies par des lettres différentes sont significativement différentes (P <0,05) selon le test HSD de Tukey.

Tableau 14 : Niveaux de colonisation racinaire, croissance, rendement et qualité de la tomate industrielle inoculés (I) et non-inoculés (NI) par un inoculum CMA commercial et fertilisés avec trois doses de fertilisants chimiques (FC) (0, 50 et 100% de la dose recommandée) dans le site d'El Karma.

Traitements Paramètres	NI + 0% FC	NI + 50% FC	NI +100% FC	I + 0% FC	I + 50% FC	I + 100% FC
Niveaux de colonisation mycorhizienne (%)	34.6 ± 4.8 ab	29.2 ± 4.6 bc	17.2 ± 4.2 c	44.1 ± 8.2 a	39.7 ± 3.1 ab	36.1 ± 3.3 ab
Hauteur (cm plant ⁻¹)	37.16 ± 4.05 e	39.33 ± 3.30 de	42.7 ± 2.98 cd	44.66 ± 1.52 bc	47.1 ± 5.4 b	53.43 ± 3.8 a
Poids sec aérien (g plant ⁻¹)	54.66 ± 8.1 e	57.26 ± 5.53 de	67.83 ± 4.05 c	64.6 ± 5.6 cd	93.6 ± 3.92 b	111.26 ± 4.7 a
Poids sec racinaire (g plant ⁻¹)	5.6 ± 0.88 c	9.6 ± 1.25 ab	8.26 ± 1.33 b	8.8 ± 1.92 b	11.63 ± 1.52 a	8.8 ± 2.78 b
Rendement (t ha ⁻¹)	29 ± 9.2 c	45.1 ± 4.8 bc	57.7 ± 8.4 ab	37.1 ± 6.1 c	60 ± 7.6 ab	74.2 ± 6.8 a
Nombre de fruits (plant ⁻¹)	16.6 ± 5.2 b	18.93 ± 7.3 ab	24.06 ± 6.4 ab	28.1 ± 9.7 ab	25.36 ± 2.2 ab	38.46 ± 10.1 a
Taux d'acidité (%)	11 ± 1.4 a	9.7 ± 1.17 ab	8 ± 1.55 bc	7 ± 0.83 c	10.9 ± 0.9 a	11.1 ± 1.6 a
Matière sèche soluble (%)	6 ± 0.17 b	6 ± 0.42 b	7 ± 0.3 a	5.9 ± 0.56 b	6 ± 0.36 b	7 ± 0.26 a
pH	5.7 ± 0.15 a	5.8 ± 0.25 a	6 ± 0.42 a	5.8 ± 0.51 a	5.8 ± 0.2 a	6.1 ± 0.47 a

Les moyennes dans les lignes suivies par des lettres différentes sont significativement différentes (P <0,05) selon le test HSD de Tukey.

La tomate industrielle répond positivement à l'application des CMA en plein champ. En effet, l'inoculation permet une augmentation significative de la croissance, du taux de chlorophylle, du nombre de fleurs, du rendement et du nombre de fruits. Ces résultats sont dus au fait que ces deux sols ont une population réduite en CMA indigènes. Ces sols sont également pauvres en phosphore. Or, dans le cas où les sols sont très riches en phosphore, la réponse à l'inoculation peut varier, car l'excès en phosphore peut diminuer les effets bénéfiques potentiels des CMA et leur application peut ne pas en stimuler l'absorption (Hamel & Strullu, 2006). La sécheresse de la période de culture peut être également un facteur ayant favorisé la réponse des plants à l'inoculation, étant donné que les CMA sont connus pour induire la résistance aux stress hydriques (Farahani et al., 2013). Dans ces conditions, les avantages de l'inoculation par les CMA peuvent être affirmés et leur application dans ces sols est primordiale.

Conclusion et perspectives

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'un des challenges que l'Algérie et le reste du monde devront relever est de rehausser les rendements agricoles afin de satisfaire la demande alimentaire toujours grandissante de la population, tout en abaissant la dépendance aux fertilisants chimiques. Ces fertilisants stimulent certes rapidement la croissance des plantes en leur apportant certains éléments nutritifs, mais ne nourrissent pas les organismes du sol. Ils risquent même, souvent, de leur porter atteinte. Un fertilisant azoté, par exemple, peut favoriser les espèces d'organismes aimant l'azote et défavoriser les autres, ce qui conduit à un déséquilibre. À terme, l'efficacité de la compensation des faiblesses fonctionnelles du sol par la fertilisation chimique cessera d'augmenter et un cercle vicieux peut s'installer. Les fertilisants sont également en baisse de disponibilité car ils émanent de ressources épuisables, d'où la nécessité de trouver des solutions pour un mode de production agricole qui ne nuit ni à l'environnement ni à la santé. Cela signifie produire mieux, en réalisant des rendements suffisants pour nourrir tous les humains, allant de pair avec la réduction de l'impact des pratiques agricoles sur la santé et l'environnement.

L'impact des pratiques culturales suivies dans les agroécosystèmes sur les communautés CMA indigènes en Algérie ont été peu étudiées. De même, peu d'études ont été menées sur le potentiel de la réduction des quantités de fertilisants chimiques par l'usage des champignons mycorhiziens à arbuscules dans le monde et en Algérie en particulier.

Ainsi, cette étude a fourni en premier lieu des informations sur l'état de l'abondance et la diversité des CMA et la colonisation des racines de tomate au niveau de 8 champs agricoles au Nord-Est Algérien. Dans cette région, la culture de la tomate était associée avec les CMA. Toutefois, les densités des spores CMA étaient relativement faibles sur la majorité des sites et on a noté une faible variabilité des espèces. Les espèces *Funneliformis mosseae*, *Septoglomus constrictum* et *Rhizophagus irregularis* étaient les plus dominantes tandis que *Entrophospora infrequens*, *Glomus badium*, *Glomus macrocarpum* et d'autres espèces non identifiées étaient en minorité.

Les proportions des spores vivantes au niveau des parcelles cultivées étaient peu élevées et variaient d'un site à un autre. De plus, elles étaient inférieures à celles présentes dans les parcelles témoins. Également, le niveau de colonisation des racines des tomates était relativement moyen. Ces résultats pris ensemble prouvent que la fertilisation, l'application de pesticides, le travail du sol et les rotations appliquées dans ces champs peuvent nuire aux

communautés CMA. Par conséquent, les avantages potentiels attribués aux CMA ne sont probablement plus complètement utilisés et ces sols nécessitent donc des apports exogènes de CMA.

Par la suite, nous avons montré que l'apport de CMA sur des cultures de tomate industrielle aussi bien dans des conditions de serre et de champ pouvait représenter une solution intéressante. En serre, les CMA exotiques d'un inoculum commercial et CMA natifs extraits d'un sol algérien ont montré leur capacité à améliorer la croissance des plants de tomate dans un sol stérile ou non stérile. Les deux inoculants ont eu un effet remarquable sur la croissance dans le sol non stérile. Les CMA natifs ont été aussi efficaces que l'inoculum commercial exotique, et pourraient donc représenter de bons candidats pour la production d'inoculum local.

En champ, les deux essais conduits sur des plants de tomates inoculés par l'inoculum commercial, et cultivés avec trois doses de différents régimes de fertilisants chimiques, ont montré que l'apport des CMA a induit une croissance et des rendements accrus des plants de tomate. Ces effets ont été plus marqués lorsque l'apport de CMA était accompagné par l'addition de fertilisants au sol. Les sols étaient pauvres en nutriments et moyennement pauvre en propagules CMA et où les plants de tomate ont eu besoin à la fois d'une inoculation CMA exogène et de la fertilisation pour maximiser à la fois leur croissance et leur rendement. Il est donc nécessaire, là où le potentiel mycorhizien est faible, de consolider les populations mycorhiziennes naturelles présentes dans les sols agricoles par des apports de CMA exogène.

Le fait que le rendement en tomate à El Karma ait été maintenu en combinant l'inoculation par les CMA, avec une réduction de 50% de la dose d'engrais chimique recommandée, par rapport à la dose complète sans inoculation, confirme que l'application des CMA peut être exploitée en tant que biotechnologie respectueuse de l'environnement dans un système agricole plus durable et à faible apport chimique.

Les expériences menées ont permis de mettre en avant le potentiel avantageux de l'utilisation d'inoculum CMA, bien que variable dans sa capacité à permettre une réduction des fertilisants chimiques dans la culture de la tomate industrielle. Le besoin considérable en engrais chimiques de ces cultures pourrait être dû aux cultivars utilisés, les teneurs des sols en éléments nutritifs, les facteurs édaphiques, les types de sols et leur santé qui varient d'un site à un autre.

Les perspectives de travaux qui permettraient d'approfondir cette étude sont les suivantes :

- Le développement d'une technologie pour la production d'inoculum à base de CMA natifs pour une exploitation industrielle.
- La réalisation d'une fertilisation raisonnée à plus grande échelle dans cette région agricole associée à une stratégie d'inoculation de CMA en fonction des caractéristiques agrologiques, physico-chimiques et biologiques des sols et du rendement potentiel. Les taux de fertilisants seraient déterminés pour chaque site en utilisant un modèle d'équilibre entre la demande en éléments nutritifs par culture, et l'ajustement de la dose d'inoculation CMA. Dans le cas des sols très perturbés et pauvre en éléments nutritifs, cela se ferait par l'application des doses habituelles de fertilisants dans un premier temps avec la restauration la microflore de ce sol de manière progressive, pour arriver à la diminution équilibrée de fertilisants.
- Un approfondissement de l'évaluation de la dynamique des populations de CMA et du rôle fonctionnel spécifique joué par ces organismes bénéfiques dans les sols agricoles. Il serait également intéressant d'identifier les CMA présents dans ces sols par une approche moléculaire et d'étudier ainsi les impacts des pratiques culturales sur ces populations microbiennes du sol.

*Références
bibliographiques*

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Adesemoye, A.O., Torbert H.A., & Kloepper J.W. (2008). Enhanced plant nutrient use efficiency with PGPR and AMF in an integrated nutrient management system. *Canadian Journal of Microbiology*, 54: 876–886.
2. Adesemoye, A.O., & Kloepper, J.W. (2009). Plant–microbes interactions in enhanced fertilizer-use efficiency. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85:1–12.
3. Allen, M.F., Allen, E.B., Dahm, C.N., & Edwards, F.S. (1993). Preservation of biological diversity in mycorrhizal fungi: importance and human impacts. In: International symposium on human impacts on self-recruiting populations, pp : 81–108. G., Sundnes (eds.). The Royal Norwegian Academy of Sciences, Trondheim, Norvège.
4. Al-Karaki, G.N. (2000). Growth of mycorrhizal tomato and mineral acquisition under salt stress. *Mycorrhiza*, 10: 51–54.
5. Al-Karaki, G.N. (2006). Nursery inoculation of tomato with arbuscular mycorrhizal fungi and subsequent performance under irrigation with saline water. *Scientia Horticulturae*, 109 : 1–7.
6. Al-Karaki, G.N. (2013). The effect of arbuscular mycorrhiza fungi on the establishment of sour orange (*Citrus aurantium*) under different levels of phosphorus. *Acta Horticulturae*, 984: 103–108.
7. Amaya-Caprio, L., Davies Jr., F.T., Fox, T., & He, C. (2009). Arbuscular mycorrhizal fungi and organic fertilizer influence photosynthesis, root phosphatase activity, nutrition, and growth of *Ipomoea carnea* ssp. *fistulosa*. *Photosynthetica*, 47: 1–10.
8. Angelard, C., & Sanders, I.R. (2013). Consequences of segregation and genetic exchange on adaptability in arbuscular mycorrhizal fungi (AMF). In: *Evolutionary Biology: Exobiology and Evolutionary Mechanisms*, pp : 231–244. P., Pontarotti (eds.). Springer Science & Business Media.
9. Arora, N.K., Mehnaz, S., & Balestrini, R. (2016). *Bioformulations: for Sustainable Agriculture*. Springer.
10. Atkinson, D. (2009). Soil microbial resources and agricultural policies. In: *Mycorrhizas - Functional Processes and Ecological Impact*, pp : 1–17. C., Azcón-Aguilar, J.M., Barea, S., Gianinazzi, & V., Gianinazzi-Pearson (eds.). Springer Science & Business Media.

11. Augé, R.M. (2001). Water relations, drought, and vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Mycorrhiza*, 11: 3–42.
12. Augé, R.M., Toler, H.D., & Saxton, A.M. (2014). Arbuscular mycorrhizal symbiosis and osmotic adjustment in response to NaCl stress: a meta-analysis. *Frontiers in Plant Science*, 5: 562–574.
13. Avio, L., Castaldini, M., Fabiani, A., Bedini, S., Sbrana, C., Turrini, A., & Giovanetti, M. (2013). Impact of nitrogen fertilization and soil tillage on arbuscular mycorrhizal fungal communities in a Mediterranean agroecosystem. *Soil Biology and Biochemistry*, 67: 285-294.
14. Bâ, A.M., Duponnois, R., Diabaté, M. & Dreyfus, B. (2011). Les champignons ectomycorhiziens des arbres forestiers en Afrique de l'Ouest. Méthodes d'étude, diversité, écologie, utilisation en foresterie et comestibilité. Collections Actiques IRD, IRD éditions.
15. Bagchi, R., Swinfield, T., Gallery, R. E., Lewis, O. T., Gripenberg, S., & Narayan, L. (2010). Testing the Janzen-Connell mechanism: pathogens cause overcompensating density dependence in a tropical tree. *Ecology Letters*, 13 : 1262–1269.
16. Bais, H.P., Weir T.L., Perry L.G., Gilroy S., & Vivanco J.M. (2006). The role of root exudates in rhizosphere interactions with plants and other organisms. *Annual Review of Plant Biology*, 57: 233–266.
17. Baligar, V.C., & Bennett, O.L. (1986). NPK-fertilizer efficiency — a situation analysis for the tropics. *Fertilizer Research*, 10: 147–164.
18. Baligar, V.C., Fageria N.K., & He, Z.L. (2001). Nutrient use efficiency in plants. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 32: 921–950.
19. Baslam, M., Esteban, R., García-Plazaola, J.I., & Goicoechea, N. (2013a). Effectiveness of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) for inducing the accumulation of major carotenoids, chlorophylls and tocopherol in green and red leaf lettuces. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 97: 3119–3128.
20. Baslam, M., Garmendia, I., & Goicoechea, N. (2013b). The arbuscular mycorrhizal symbiosis can overcome reductions in yield and nutritional quality in greenhouse-lettuces cultivated at inappropriate growing seasons. *Scientia Horticulturae*, 164: 145–154.
21. Bedini, S., Avio, L., Sbrana, C., Turrini, A., Migliorini, P., Vazzana, C., & Giovanetti, M. (2013). Mycorrhizal activity and diversity in a long-term organic mediterranean agroecosystem. *Biology and Fertility of Soils*, 49: 781–790.

22. Bedrani, S. (2008). L'agriculture, l'agroalimentaire, la pêche et le développement rural en Algérie. In : Les agricultures méditerranéennes : analyses par pays, pp : 37–73. M., Allaya (eds.). Montpellier, France.
23. Beltrano, J., Ruscitti, M., Arango, M.C, & Ronco, M. (2013). Effects of arbuscular mycorrhiza inoculation on plant growth, biological and physiological parameters and mineral nutrition in pepper grown under different salinity and p levels. *Journal of soil science and plant nutrition*, 13: 123–141.
24. Berch, S.M., Monreal, M.A., & Kernaghan, G. (2009). Mycorrhizas in Canadian forests and agricultural ecosystems. In: *Advances in Mycorrhizal Science and Technology*, pp: 1-14. D., Khasa, Y., Piché, & A.P., Coughlan (eds.). CABI Publishing, Canada.
25. Bhadalung, N.N., Suwanarit, A., Dell, B., Nopamornbodi, O., Thamchaipenet, A., & Rungchuang, J. (2005). Effects of long-term NP-fertilization on abundance and diversity of arbuscular mycorrhizal fungi under a maize cropping system. *Plant and Soil*, 270: 371–382.
26. Blal, B., Morel, C., Gianinazzi-Pearson, V., Fardeau, J.C., & Gianinazzi, S. (1990). Influence of vesicular-arbuscular mycorrhizae on phosphate fertilizer efficiency in two tropical acid soils planted with micropropagated oil palm (*Elaeis guineensis* jacq.). *Biology and Fertility of Soils*, 9: 43-48.
27. Blancard, D. (2009). Les maladies de la tomate. Identifier, connaitre, maitriser. Éditions Quae, Paris, France.
28. Blanke, V., Renker, C., Wagner, M., Fullner, K., Held, M., Kuhn, A.J., & Buscot, F. (2005). Nitrogen supply affects arbuscular mycorrhizal colonization of *Artemisia vulgaris* in a phosphate-polluted field site. *New Phytologist*, 166: 981–992.
29. Bonfante, P., & Genre, A. (2010). Mechanisms underlying beneficial plant–fungus interactions in mycorrhizal symbiosis. *Nature Communications*, 1: 48.
30. Bothe, H., Regvar, M., & Turnau, K. (2010). Arbuscular mycorrhiza, heavy metal, and salt tolerance. In: *Soil Heavy Metals*, pp: 87–112. I., Sherameti, & A., Varma (eds.). Springer Science & Business Media.
31. Boudoukha, A., & Boulaarak, M. (2013). Pollution des eaux du barrage Hammam Grouz par les nutriments (Est Algérie). *Bulletin du Service Géologique National*, 24 : 139–149.
32. Boukella, M. (1996). "Les industries agro-alimentaires en Algérie politiques, structures et performances depuis l'indépendance". *Cahiers Options Méditerranéennes*, Vol 19. IAM, Montpellier, France.

33. Bouzid, A., & Bedrani, S. (2013). La performance économique de la filière tomate industrielle en Algérie. Les cahiers du CREAD, n° 103.
34. Bouzid-Lagha, S., & Djelita, B. (2011). Etude du phénomène d'eutrophisation dans le Barrage de Hammam Bouhrara (Wilaya de Tlemcen, Algérie). *Hydrological Sciences Journal*, 57 : 186–201.
35. Bressan, W. (2001). The interactive effect of phosphorus and nitrogen on “in vitro” spore germination of *Glomus etunicatum* Becker & Gerdermann, root growth and mycorrhizal colonization. *Brazilian Journal of Microbiology*, 32 : 276–280.
36. Candido, V., Campanelli, G., D’Addabbo, T., Castronuovo, D., Renco, M., & Camele, I. (2013). Growth and Yield Promoting Effect of Artificial Mycorrhization Combined with Different Fertiliser Rates on Field-Grown Tomato. *Italian Journal of Agronomy*, 8.
37. Castillo, C.G., Rubio, R., Rouanet, J. L., & Borie F. (2006). Early effects of tillage and crop rotation on arbuscular mycorrhizal fungal propagules in an Ultisol. *Biology and Fertility of Soils*, 43: 83–92.
38. Cavagnaro, T.R., & Martin, A.W. (2010). Arbuscular mycorrhizas in southeastern Australian processing tomato farm soils. *Plant and Soil*, 340: 327–336.
39. Chaoui, W., Bousnoubra, H., Benhamza, M., & Bouchami, T. (2013). Etude de la pollution des eaux des oueds Seybouse et Mellah (Région de l'Est Algérien). *Revue Science Technologie, Synthèse*, 26: 50–56.
40. Chen, S., Jin, W., Liu, A., Zhang, S., Liu, D., Wang, F., Lin, X., & He, C. (2013). Arbuscular Mycorrhizal fungi (AMF) increase growth and secondary metabolism in cucumber subjected to low temperature stress. *Scientia Horticulturae*, 160 : 222–229.
41. Choudhry, A.U. (2005). Higher-Value Organics. *Pakistan and Gulf Economist*, 35: 8.
42. Cibichakravarthy, B., Kumutha, K., & Balachandar, D. (2015). Arbuscular mycorrhizal fungal diversity in phosphorus-deficient Alfisols of a dry North-western agro-ecosystem of Tamil Nadu, India. *Annals of Microbiology*, 65: 143–153.
43. Citeau, L., Bispo, A., Bardy, M., & King, D. (2008). *Gestion durable des sols*. Editions Quae, Versailles, France. p : 336.
44. Clark, R.B., & Zeto, S.K. (2000). Mineral acquisition by arbuscular mycorrhizal plants. *Journal of Plant Nutrition*, 23: 867–902.
45. Cochran, W.G. (1950). Estimation of bacterial density by means of the ‘most probable number’. *Biometrics*, 6: 105–116.

46. Comby, M., Mustafa, G., Magnin-Robert, M., Randoux, J. Fontaine, B., Reignault, Ph., & Lounès-Hadj Sahraoui, A. (2017). Arbuscular Mycorrhizal Fungi as Potential Bioprotectants against Aerial Phytopathogens and Pests. In: Arbuscular Mycorrhizas and Stress Tolerance of Plants, pp : 195–223. Q.S., Wu (eds.). Springer, Singapour.
47. Conversa, G., Lazzizzera, C., Bonasia A., & Elia, A. (2013). Yield and phosphorus uptake of a processing tomato crop grown at different phosphorus levels in a calcareous soil as affected by mycorrhizal inoculation under field conditions. *Biology and Fertility of Soils*, 49: 691–703.
48. Copetta, A., Bardi, L., Bertolone, E., & Berta, G. (2011). Fruit production and quality of tomato plants (*Solanum lycopersicum* L.) are affected by green compost and arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant Biosystems*, 145 : 106–115.
49. Cordell, D., Drangert J.O. & White, S. (2009). The story of phosphorus: Global food security and food for thought. *Global Environmental Change*, 19: 292–305.
50. Curaqueo, G., Acevedo, E., Cornejo, P., Seguel, A., Rubio, R. & Borie, F. (2010). Tillage effect on soil organic matter, mycorrhizal hyphae and aggregates in a mediterranean agroecosystem. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 10: 12–21.
51. Daniels, B.A., & Skipper, H.D. (1982). Methods for the recovery and quantitative estimation of propagules from soil. In: *Methods and Principles of Mycorrhizal Research*, pp : 29-36. N. C., Schenck (Eds.). The American Phytopathological Society.
52. Dar, G.H. (2010). *Soil microbiology and biochemistry*. New India Publishing.
53. Davet, P. (1996). *Vie microbienne du sol et production végétale*. INRA, éditions Quae. p : 383.
54. Declerck, S., Risede J.M., Delvaux B. (2002). Greenhouse response of micropropagated bananas inoculated with in vitro monoxenically produced arbuscular mycorrhizal fungi. *Scientia Horticultura*. 93 : 301–309.
55. Derradji, F., Bousnoubra, H., Kherici, N., Romeo M., & Caruba, R. (2007). Impact de la pollution organique sur la qualité des eaux superficielles dans le Nord-Est algérien. *Sécheresse*, 18: 23–7.
56. Dickie, I.A. (2006). Mycorrhiza of ecosystems. In: *Encyclopedia of Soil Science*, Volume 2, pp : 1111–1118. R., Lal (eds.). CRC Press.
57. Douds Jr., D.D., & Schenck, N.C. (1990). Relationship of colonization and sporulation by VA mycorrhizal fungi to plant nutrient and carbohydrate contents. *New Phytologist*, 116: 621–627.

58. Douds Jr., D.D., & Millner, P.D. (1999). Biodiversity of arbuscular mycorrhizal fungi in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 74 : 77–93.
59. Douds Jr., D.D., & Johnson, N.C. (2007). Contributions of arbuscular mycorrhizas to soil biological fertility. In: *Soil biological fertility: a key to sustainable land use in agriculture*, pp : 129-162. L.K., Abott, D.V., Murphy (eds.). Springer, Berlin, Allemagne.
60. Drain, A., Pfister, C., Zerbib, J., Leborgne-Castel, N., Roy, S., Courty, P.E., & Wipf, D. (2017). Mécanismes cellulaires et moléculaires et ingénierie écologique des mycorhizes à arbuscules. In : *Les sols et la vie souterraine : Des enjeux majeurs en agroécologie*, pp : 237–252. J.F., Briat, & D., Job (eds.). Editions Quae.
61. Dutuit, P., & Gorenflot, R. (2016). *Unité du monde vivant et développement durable : Glossaire*. Editions Educagri, France. p : 124.
62. Edathil, T.T., Manian, S., & Udaiyan, K. (1996). Interaction of multiple VAM fungal species on root colonization, plant growth and nutrient status of tomato seedlings (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 59: 63–68.
63. Estaún, V., Camprubi, A., & Joner, E.J. (2002). Selecting arbuscular mycorrhizal fungi for field application. In: *Mycorrhizal Technology in Agriculture: From Genes to Bioproducts*, pp : 249–260. S., Gianinazzi, H., Schüepp, J.M., Barea, & K., Haselwandter (eds.). Editions Birkhäuser, Suisse.
64. Estaún, V., Calvet, C., & Camprubí, A. (2010). Effect of differences among crop species and cultivars on the arbuscular mycorrhizal symbiosis. In: *Arbuscular mycorrhizas: physiology and function*. pp : 279–295. H., Koltai, & Y., Kapulnik (eds.). Springer, Heidelberg, Allemagne.
65. Evans, D.E., Coleman, J.O.D., & Kearns, A. (2003). *Plant Cell Culture*. Bios scientific publishers, Londres, Royaume uni.
66. Fageria, N.K., Slaton, N.A., & Baligar, V.C. (2003). Nutrient Management for Improving Lowland Rice Productivity and Sustainability. *Advances in Agronomy*, 80: 63-152.
67. Farahani, A., Lebaschi, H., Hussein, M., Hussein, S.A., Reza, V.A., & Jahanfar, D. (2013). Effects of arbuscular mycorrhizal fungi, different levels of phosphorus and drought stress on water use efficiency, relative water content and proline accumulation rate of Coriander (*Coriandrum sativum* L.). *Journal of Medicinal Plants Research*, 2: 125-131.

68. Fakhro, A., Rocio Andrade-Linares, D., Von Bargen, S., Bandte, M., Buttner, C., Grosch, R., Schwarz, D., & Franken, P. (2010). Impact of *Piriformospora indica* on tomato growth and on interaction with fungal and viral pathogens. *Mycorrhiza*, 20 : 191–200.
69. FAO (2005). Utilisation des engrais par culture en Algérie. Rome, Italie.
70. FAO (2014). La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture : Ouvrir l'agriculture familiale à l'innovation. Rome, Italie.
71. FAO, FIDA & PAM (2015). L'État de l'insécurité alimentaire dans le monde. Objectifs internationaux 2015 de réduction de la faim : des progrès inégaux. Rome, Italie.
72. Fortin, J.A., Plenchette, C., & Piché, Y. (2008). Les mycorhizes : la nouvelle révolution verte. Editions Quae, Versailles, France.
73. Fortin, J.A., Plenchette, C., & Piché, Y. (2016). Les mycorhizes, l'essor de la nouvelle révolution verte. Editions Quae.
74. Garbaye, J. (2013). La symbiose mycorhizienne : Une association entre les plantes et les champignons. Editions Quae.
75. Garcia, K., & Zimmermann, S.D. (2014). The role of mycorrhizal associations in plant potassium nutrition. *Frontiers in Plant Science*, 5: 337.
76. Genre, A., Chabaud, M., Timmers, A.C.J, Bonfante, P., & Barker, D.G. (2005). Arbuscular Mycorrhizal Fungi Elicit a Novel Intracellular Apparatus in *Medicago truncatula* Root Epidermal Cells before Infection. *The Plant Cell*, 17: 3489–3499.
77. Genre, A., Chabaud, M., Faccio, A., Barker, D.G., & Bonfante, P. (2008). Prepenetration apparatus assembly precedes and predicts the colonization patterns of arbuscular mycorrhizal fungi within the root cortex of both *Medicago truncatula* and *Daucus carota*. *The Plant cell*, 20: 1407–20.
78. Gerdemann, J.W. & Nicolson, T.H. (1963). Spores of mycorrhizal endogone species extracted from soil by wet sieving and decanting. *Transactions of the British Mycological Society*, 46: 235–244.
79. Germida, J.J., & de Freitas, J.R. (2007). Cultural methods for soil and root-associated microorganisms. In: *Soil Sampling and Methods of Analysis*, 2ème Edition, pp : 341–354. M.R., Carter & E.G., Gregorich (eds.). CRC Press.
80. Gianinazzi, S., Gollotte, A., Binet, M.N., Van Tuinen, D., Redecker D., & Wipf, D. (2010). Agroecology: the key role of arbuscular mycorrhizas in ecosystem services. *Mycorrhiza*, 20: 519–530.

81. Gianinazzi-Pearson, V., Gianinazzi S., & Trouvelot, A. (1985). Evaluation of the infectivity and effectiveness of indigenous vesicular-arbuscular fungal populations in some agricultural soils in Burgundy. *Canadian Journal of Botany*, 63: 1521–1524.
82. Giovanelli, J. (1990). Regulatory aspects of cysteine and methionine biosynthesis. In: Sulphure nutrition and sulphur assimilation in higher plants; fundamental, environmental and agricultural aspects, pp : 33–48. H., Rennenberg, C., Brunold, L.J., De Kok, & I., Stulen (eds.). SPB academic publishers, La Haye, Pays Bas.
83. Giovanetti, M., Avio, L., Barale, R., Ceccarelli, N., Cristofani, R., Iezzi, A., Mignolli, F., Picciarelli, P., Pinto, B., Reali, D., Sbrana, C., & Scarpato, R. (2012). Nutraceutical value and safety of tomato fruits produced by mycorrhizal plants. *British Journal of Nutrition*, 107 : 242–251.
84. Gosling, P., Hodge, A., Goodlass G., & Bending, G.D. (2006). Arbuscular mycorrhizal fungi and organic farming. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 113: 17–35.
85. Gowariker, V., Krishnamurthy, V.N., Gowariker, S., Dhanorkar, M., Paranjape, K., & Borlaug, N. (2009). *The Fertilizer Encyclopedia*. John Wiley & Sons, Inc., Publications, New Jersey, USA.
86. Grant, C., Bittman, S., Montreal, M., Plenchette, C. & Morel, C. (2005). Soil and fertilizer phosphorus: Effects on plant P supply and mycorrhizal development. *Canadian Journal of Plant Science*, 85 : 3–14.
87. Gryndler, M., Larsen, J., Hřselová, H., Řezáčová, V., Gryndlerová, H., & Kubát, J. (2006). Organic and mineral fertilization, respectively, increase and decrease the development of external mycelium of arbuscular mycorrhizal fungi in a long-term field experiment. *Mycorrhiza*, 16: 159–166.
88. Hadjou, L., Cheriet, F., & Djenane, A. (2013). Agriculture biologique en Algérie : potentiel et perspectives de développement. *Les cahiers du CREAD*, 105/106 : 113–132.
89. Hamel, C. (1996). Prospects and problems pertaining to the management of arbuscular mycorrhizae in agriculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 60: 197–210.
90. Hamel, C., & Strullu, D.G. (2006). Arbuscular mycorrhizal fungi in field crop production: Potential and new direction. *Revue canadienne de phytotechnie*, 86: 941–950.
91. Hamel, C., & Plenchette, C. (2007). *Mycorrhizae in Crop Production*. Haworth Food and Agricultural Products Press, New York, USA.

92. Harrat, N., & Achour, S. (2010). Pollution physico-chimique des eaux de barrage de la région d'El Tarf Impact sur la chloration. *Larhyss Journal*, 8: 47–54.
93. Harrison, M.J., & van Buuren, M.L. (1995). A phosphate transporter from the mycorrhizal fungus *Glomus versiforme*. *Nature*; 378: 626–629.
94. Helgason, T., Daniell, T.J., Husband, R., Fitter, A.H., & Young, J.P.W. (1998). Ploughing up the wood-wide web?. *Nature*, 394: 431.
95. Hendrix, J.W., Guo, B.Z., & An, Z.Q. (1995). Divergence of mycorrhizal fungal communities in crop production systems. *Plant and Soil*. 170 : 131–140.
96. Hernández, T., Chocano, C., Moreno, J.L., & Garcia, C. (2014). Towards a more sustainable fertilization: Combined use of compost and inorganic fertilization for tomato cultivation. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 196: 178–184.
97. Heuvelink, E (2005). Tomatoes. CABI publishing, Londres, Royaume uni.
98. Holden, M. (1975). Chlorophylls I, chemistry and biochemistry of plant pigments. 2eme edition, pp : 37. T.W. Goodwin. Academic Press Edition, New York, USA.
99. Hsiao, T.C., & Lauchli, A., (1986). Role of potassium in plant-water relations. *Advances Plant Nutrition*, 2: 281–312.
100. Hu, J., Lin, X., Wang, J., Cui, X., Dai, J., Chu, H., & Zhang, J. (2010). Arbuscular mycorrhizal fungus enhances P acquisition of wheat (*Triticum aestivum* L.) in a sandy loam soil with long-term inorganic fertilization regime. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 88: 781–787.
101. Huang, J.C., Lai, W.A., Singh, S., Hameed, A., & Young, C.C. (2013). Response of mycorrhizal hybrid tomato cultivars under saline stress. *Journal of soil science and plant nutrition*, 13: 469-484.
102. ITCMI (2010). Fiches techniques valorisées des cultures maraichères et industrielles, la culture de la tomate industrielle. Alger, Algérie.
103. Jansa, J., Mozafar, A., Anken, T., Ruh, R., Sanders, I.R., & Frossard, E. (2002). Diversity and structure of AMF communities as affected by tillage in a temperate soil. *Mycorrhiza*, 12: 225–234.
104. Jansa, J., Wiemken, A., & Frossard, E. (2006). The effects of agricultural practices on arbuscular mycorrhizal fung. In: *Function of Soils for Human Societies and the Environment*, pp : 89–115. E., Frossard, W., Blum, & B., Warkentin (eds.). Geological Society, Londres, Royaume uni.
105. Jansa, J.L., Smith, F.A., & Smith, S.E. (2008). Are there benefits of simultaneous root colonization by different arbuscular mycorrhizal fungi?. *New Phytologist*, 177: 779–89.

106. Javaid, A. (2009). Arbuscular Mycorrhizal Mediated Nutrition in Plants. *Journal of Plant Nutrition*, 32 : 1595–1618.
107. Kabir, Z., O'Holloran, I.P., Fyles, J.W., & Hamel, C. (1997). Seasonal changes of arbuscular mycorrhizal fungi as affected by tillage practices and fertilization : Hyphal density and mycorrhizal root colonization. *Plant and Soil*, 192: 285–293.
108. Kapoor, R., Evelin, H., Mathur, P., & Giri, B. (2012). Arbuscular mycorrhiza: approaches for abiotic stress tolerance in crop plants for sustainable agriculture. In: *Plant Acclimation to Environmental Stress*, pp : 359–402. N., Tuteja, & G.S., Singh (eds.). Springer Science & Business Media.
109. Kaya, C., Ashraf, M., Sonmez, O., Aydemir, S., Tuna, A.L., & Cullu, M.A. (2009). The influence of arbuscular mycorrhizal colonisation on key growth parameters and fruit yield of pepper plants grown at high salinity. *Scientia Horticulturae*, 121 : 1–6.
110. Kiers, E.T., West, S.A., & Denison R.F. (2002). Mediating mutualisms: farm management practices and evolutionary changes in symbiont co-operation. *Journal of Applied Ecology*, 39: 745–754.
111. Kjoller, R., & Rosendahl, S. (2000). Effects of fungicides on arbuscular mycorrhizal fungi: differential responses in alkaline phosphatase activity of external and internal hyphae. *Biology and Fertility of Soils*, 31: 361-365.
112. Klironomos, J.N., & Moutoglis, P. (1999). Colonization of nonmycorrhizal plants by mycorrhizal neighbors as influenced by the collembolan, *Folsomia candida*. *Biology and Fertility of Soils*, 29: 277–281.
113. Knudsen, M.T., Halberg, N., Olesen, J.E., Byrne, J., Iyer, V., & Toly, N. (2006). Global trends in agriculture and food systems. In: *Global development of organic agriculture: challenges and prospects*, pp : 1–41. N., Halberg, H.F., Alroe, M.T., Knudsen, & E.S., Kristensen (eds.). CABI publishing.
114. Krishna, H, Singh, S.K., Sharma, R.R., Khawale, R.N., Grover, M., & Patel, V.B. (2005). Biochemical changes in micropropagated grape (*Vitis vinifera* L.) plantlets due to arbuscular-mycorrhizal fungi (AMF) inoculation during ex vitro acclimatization. *Scientia Horticulturae*, 106 : 554–567.
115. Kumar, V., Kumar, R., & Anal, A.K.D. (2016). Spore population, colonization, species diversity and factors influencing the association of arbuscular mycorrhizal fungi with litchi trees in India. *Journal of Environmental Biology*, 37: 91-100.
116. Larcher, W. (2003). *Physiological Plant Ecology: Ecophysiology and Stress Physiology of Functional Groups*. 4^{ème} edition, Springer Science & Business Media.

117. Lehman, R.M., Taheri, W.I., Osborne, S.L., Buyer, J.S., & Douds Jr., D.D. (2012). Fall cover cropping can increase arbuscular mycorrhizae in soils supporting intensive agricultural production. *Applied Soil Ecology*, 61: 300–304.
118. Lenne, P., & Branthome, F.X. (2006). Etude de la filière « transformation de la tomate » Algérie- septembre 2006, rapport de synthèse. Euro Développement Pme Alger, Algérie.
119. Le Tacon, F. (1985). Les mycorhizes : une coopération entre plantes et champignons. *La Recherche*, 16 : 624–632.
120. Maaitah, S.A., Mahadeen, A.Y., & Al-Karaki, G.N. (2014). Response of Potted-Grown Tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill var. Lorely F1) to AMF Inoculation with Organic and Inorganic Fertilizer. *American-Eurasian Journal of Agriculture & Environmental Sciences*, 14: 255–262.
121. Mackinney, G. (1941). Absorption of light by chlorophyll solutions. *Journal of Biological Chemistry*. 140 : 315–322.
122. Maiti, D., Toppo N.N., & Variar, M. (2011). Integration of crop rotation and arbuscular mycorrhiza (AM) inoculum application for enhancing AM activity to improve phosphorus nutrition and yield of upland rice (*Oryza sativa* L.). *Mycorrhiza*, 21: 659–667.
123. Maiti, S.K. (2012). *Ecorestoration of the coalmine degraded lands*. Springer Science & Business Media.
124. Malhi, S.S., Haderlein, L.K., Pauly D.G., & Johnston, A.M. (2002). Improving Fertilizer Phosphorus use Efficiency. *Better Crops*, 86: 8–9.
125. Mark, G.L., & Cassells, A.C. (1999). The effect of dazomet and fosetyl-Aluminium on indigenous and introduced arbuscular mycorrhizal fungi in commercial strawberry production. *Plant and Soil*, 209: 253–261.
126. Mathimaran, N., Ruh, R., Jama, B., Verchot, L., Frossard, E., & Jansa, J. (2007). Impact of agricultural management on arbuscular mycorrhizal fungal communities in Kenyan ferralsol. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 119: 22-32.
127. Meddad-Hamza, A., Beddiar, A., Gollotte, A., Lemoine, M.C., Kuszala C., & Gianinazzi, S. (2010). Arbuscular mycorrhizal fungi improve the growth of olive trees and their resistance to transplantation stress. *African Journal of Biotechnology*, 9 : 1159–1167.

128. Meena, V.S., Bahadur, I., Maurya, B.R., Kumar, A., Meena, R.K., Meena, S.K., & Verma, J.P. (2016). Potassium Solubilizing Microorganism in Evergreen Agriculture: An Overview. Springer India.
129. Miransari, M. (2011). Hyperaccumulators, arbuscular mycorrhizal fungi and stress of heavy metals. *Biotechnology Advances*, 29 : 645–653.
130. Mohammad, A., Mitra, B., & Khan, A.G. (2004). Effects of sheared-root inoculum of *Glomus intraradices* on wheat grown at different phosphorus levels in the field. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 103 : 245–249.
131. Mujica Perez, Y., De la Noval B., & Dell'Amico, J.R. (2010). Respuesta del cultivo de tomate a la aplicacion de dos inoculantes de hongos micorrizicos arbusculares porvias diferentes de inoculacion. *Agronomía Tropicales*, 60: 381–387.
132. Mujica Perez, Y., & Fuentes Martinez, A.G. (2012). Efecto a la biofertilizacion con hongos micorrizicos arbusculares (HMA) en el cultivo del tomate en condiciones de estres abiotico. *Cultivos Tropicales*, 33 : 40–46.
133. Müller, A., Ngwene, B., Peiter, E., & George, E. (2017). Quantity and distribution of arbuscular mycorrhizal fungal storage organs within dead roots. *Mycorrhiza*, 27 : 201–210.
134. Nadeem, S.M., Khan, M.Y., Waqas, M.R., Binyamin, R., Akhtar, S., & Zahir, A.Z. (2017). Arbuscular Mycorrhizas : An Overview. In : *Arbuscular Mycorrhizas and Stress Tolerance of Plants*, pp : 1–24. Q.S., Wu (eds.). Springer, Singapour.
135. Naika, S., van Lidt de Jeude, J., De Goffau, M., Hilmi, M., & van Dam, B. (2005). La culture des tomates production, transformation et commercialisation. Fondation Agromisa et CTA, Wageningue, Pays-bas.
136. Norme Française NF V 08–406 Microbiologie alimentaire. Conserves : détermination du pH (méthode de référence).
137. Nultsch, W. (1998). *Botanique Générale*. Edition De Boeck Supérieur.
138. Nyabyenda, P. (2007). Les plantes cultivées en régions tropicales d'altitude d'Afrique : Cultures industrielles et d'exportation, cultures fruitières, cultures maraîchères, Volume 2. Presses Agronomiques de Gembloux, Belgique.
139. Nzanza, B., Marais, D., & Soundy, P. (2011). Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) seedling growth and development as influenced by *Trichoderma harzianum* and arbuscular mycorrhizal fungi. *African Journal of Microbiology Research*, 5 : 425–431.
140. Oehl, F., Sieverding, E., Ineichen, K., Mäder, P., Boller, T., & Wiemken, A. (2003). Impact of land use intensity on the species diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in

- agroecosystems of central Europe. *Applied and Environmental Microbiology*, 69: 2816–2824.
141. Oehl, F., Sieverding, E., Mäder, P., Dubois, D., Ineichen, K., Boller, T., & Wiemken, A. (2004). Impact of long-term conventional and organic farming on the diversity of arbuscular mycorrhizal fungi. *Oecologia*, 138: 574–583.
142. Oehl, F., Sieverding, E., Palenzuela, J., Ineichen, K., & Alves da Silva, G. (2011). Advances in *Glomeromycota* taxonomy and classification. *IMA fungus*, 2: 191–199.
143. ONS (2016). Démographie Algérienne 2015. n° 740.
144. Ortas, I. (2012). The effect of mycorrhizal fungal inoculation on plant yield, nutrient uptake and inoculation effectiveness under long-term field conditions. *Field Crops Research*, 125: 35–48.
145. Ortas, I. (2015). Comparative analyses of Turkey agricultural soils: Potential communities of indigenous and exotic mycorrhiza species' effect on maize (*Zea mays* L.) growth and nutrient uptakes. *European Journal of Soil Biology*, 69: 79–87.
146. Ortas, I. & Ustuner, O. (2014). The effects of single species, dual species and indigenous mycorrhiza inoculation on citrus growth and nutrient uptake. *European Journal of Soil Biology*, 63: 64–69.
147. Ortas, I., Rafique, M., & Ahmed, I.A.M. (2017). Application of Arbuscular Mycorrhizal Fungi into Agriculture. In: *Arbuscular Mycorrhizas and Stress Tolerance of Plants*, pp : 305–327. Q.S., Wu (eds.). Springer, Singapour.
148. Osillos, P.L., & Nagpala, A.L. (2015). The Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF as Biofertilizer on the Growth, Yield and Nutrient Uptake of Tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *International Journal of Scientific Engineering and Research*, 3 : 49–65.
149. Paek, K.Y., & Murthy, H.N. (2013). Temperate oriental *Cymbidium* species. In: *Orchid Biology VIII: Reviews and Perspectives*, pp: 235-286. T., Kull, & J., Arditti (eds.). Springer Science+Business Media, B.V.
150. Parniske, M. (2008). Arbuscular mycorrhiza: the mother of plant root endosymbioses. *Nature Reviews Microbiology*, 6 : 763–775.
151. Peet, M.M., Harlow, C.D., & Larrea, E.S. (2004). Fruit quality and yield in five small-fruited greenhouse tomato cultivars under high fertilization regime. *Acta Horticulturae*, 659: 811–818.

152. Pellegrino, E., Bedini, S., Avio, L., Bonari E., & Giovannetti, M. (2011). Field inoculation effectiveness of native and exotic arbuscular mycorrhizal fungi in a Mediterranean agricultural soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 43: 367–376.
153. Pellerin, S., Butler, F., & Guiard-van Laethem, C. (2014). Fertilisation et environnement : Quelles pistes pour l'aide à la décision ?. Editions Quae.
154. Perotto, S., Girlanda, M., & Martino, E. (2002). Ericoid mycorrhizal fungi: some new perspectives on old acquaintances. *Plant and Soil*, 244 : 41–53.
155. Perrow, M., & Davy, A. (2002). *Handbook of Ecological Restoration*. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume uni.
156. Peterson, R.L., Massicotte, H.B., & Melville, L.H. (2004). *Mycorrhizas: Anatomy and Cell Biology*. CABI Publishing, Ottawa, Canada.
157. Philips, J.S. & Hayman, D.S. (1970). Improved procedures for cleaning roots and staining parasitic and VAM fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of the British Mycological Society*, 55: 158–161.
158. Plenchette, C., Fortin J.A., & Furlan, V. (1983). Growth responses of several plant species to mycorrhizae in a soil of moderate P-fertility Mycorrhizal dependency under field conditions. *Plant and Soil*, 70: 199–209.
159. PNUE (2011). *Vers une économie verte : pour un développement durable et une éradication de la pauvreté- Synthèse à l'intention des décideurs*. St-Martin-Bellevue, France.
160. Pöggeler, S., & Wöstemeyer, J. (2011). Evolution of mutualistic systems and metabolism in fungi. In: *Evolution of Fungi and Fungal-Like Organisms*, pp : 161–185. S., Pöggeler & J., Wöstemeyer (eds.). Springer Science & Business Media.
161. Polese, J.M. (2007). *La culture des tomates*. Editions Artemis, France.
162. Porter, W.M. (1979). The “most probable number” method for enumerating infective propagules of vesicular arbuscular mycorrhizal fungi in soils. *Australian Journal of Soil Research*, 17: 515–519.
163. Poulton. J.L., Bryla, D., Koide R.T., & Stephenson, A.G. (2002). Mycorrhizal infection and high soil phosphorus improve vegetative growth and the female and male functions in tomato. *New Phytologist*, 154: 255–264.
164. Prashar, P., & Shah, S. (2016). Impact of fertilizers and pesticides on soil microflora in agriculture. In: *Sustainable Agriculture Reviews*, Volume 19, pp: 331–361. E., Lichtfouse (eds.). Springer.

165. Qin, H., Lua, K., Strong, P.J., Xua, Q., Wu, Q., Xu, Z., Xu, J., & Wang, H. (2015). Long-term fertilizer application effects on the soil, root arbuscular mycorrhizal fungi and community composition in rotation agriculture. *Applied Soil Ecology*, 89 : 35–43.
166. Raghothama, K.G. (2000). Phosphate transport and signaling. *Current Opinion on Plant Biology*, 3: 182-187.
167. Rai, M. (2006). *Handbook of Microbial Biofertilizers*. International Book Distributing Company.
168. Raven, P.H., Evert, R.F., & Eichhorn, S.E. (2000). *Biologie végétale*. Éditions De Boeck université.
169. Raven, P.H., Mason, K.A., Johnson, G.B., Losos, J.B., & Singer, S.R. (2017). *Biologie*. 4^{ème} édition, De Boeck Supérieur.
170. Ravichandra, N.G. (2014). Nematode disease complex. In: *Horticultural Nematology*, pp : 206–238. N.G., Ravichandra (eds.). Springer.
171. Redecker, D., Kodner, R., & Graham, L.E. (2000). Glomalean fungi from the Ordovician. *Science*, 289 : 1920–1921.
172. Redecker, D., & Schüßler, A. (2014). 9 *Glomeromycota*. In: *Systematics and Evolution*, pp : 251–269. D.J., McLaughlin, & J.W., Spatafora (eds.). Springer Berlin Heidelberg, Allemagne.
173. Règlement (CEE) N° 1764/86 De la commission du 27 mai 1986 fixant des exigences minimales de qualité pour les produits transformés à base de tomates dans le cadre du régime d'aide à la production. 1986R1764-FR-01.05.2004-004.001 ; 26.05.2001-003.001.
174. Reinhardt, D. (2007). Programming good relations - development of the arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Current Opinion in Plant Biology*, 10: 98-105.
175. Remy, W., Taylor, T.N., Hass, H., Kerp, H. (1994). Four hundred million year old vesicular-arbuscular mycorrhizae. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 91 : 11841–11843.
176. Rillig, M.C., & Mummey, D. (2006). Mycorrhizas and soil structure. *New Phytologist*, 171: 41–53.
177. Rillig, M.C., Mardatin, N.F., Leifheit, E.F., & Antunes, P.M. (2010). Mycelium of arbuscular mycorrhizal fungi increases soil water repellency and is sufficient to maintain water-stable soil aggregates. *Soil Biology and Biochemistry*, 42: 1189–1191.
178. Rivera-Becerril, F., van Tuinen, D., Chatagnier, O., Rouard, N., Béguet, J., Kuszala, C., Soulas, G., Gianinazzi-Pearson, V., & Martin-Laurent, F. (2017). Impact of a

- pesticide cocktail (fenhexamid, folpel, deltamethrin) on the abundance of *Glomeromycota* in two agricultural soils. *Science of The Total Environment*, 577: 84-93.
179. Sarkar, A. (2009). *Plant Stem Cells*. Discovery Publishing House, Inde.
180. Schalamuk, S., Velazquez, S., Chidichimo, H., & Cabello, M. (2006). Fungal spore diversity of arbuscular mycorrhizal fungi associated with spring wheat: effects of tillage. *Mycologia*, 98: 16–22.
181. Schneider, K.D., Lynch, D.H., Dunfield, K., Khosla, K., Jansa, J., & Voroney, R.P. (2015). Farm system management affects community structure of arbuscular mycorrhizal fungi. *Applied Soil Ecology*, 96 : 192–200.
182. Schreiner, R.P. (2007). Effects of native and nonnative arbuscular mycorrhizal fungi on growth and nutrient uptake of ‘Pinot noir’ (*Vitis vinifera* L.) in two soils with contrasting levels of phosphorus. *Applied Soil Ecology*, 36: 205–215.
183. Schüßler, A., Schwarzott, D., & Walker, C. (2001). A new fungal phylum, the *Glomeromycota*: phylogeny and evolution, *Mycological Research*, 105: 1413–1421.
184. Schüßler, A., & Walker, C. (2010). The *Glomeromycota*: A species list with new families and new genera. Libraries at The Royal Botanic Garden Edinburgh, The Royal Botanic Garden Kew, Botanische Staatssammlung Munich, and Oregon State University.
185. Schwartz, M.W., Hoeksema, J.D, Gehring, C.A., Johnson, N.C., Klironomos, J.N., Abott, L.K., & Pringle, A. (2006). The promise and the potential consequences of the global transport of mycorrhizal fungal inoculum. *Ecology Letters*, 9 : 501–515.
186. Scott, P. (2013). *Physiology and Behaviour of Plants*. John Wiley & Sons, Angleterre, Royaume uni.
187. Semu, E. & Singh, B.R., (1995). Accumulation of heavy metals in soils and plants after long-term use of fertilizers and fungicides in Tanzania. *Fertilizer research*, 44: 241–248.
188. Shah, M.A. (2014). Mycorrhizas: an overview. In: *Mycorrhizas: Novel Dimensions in the Changing World*, pp : 5–12. M.A., Shah (eds.). Springer.
189. Shi, H. (2007). Integration of Ca²⁺ in plant drought and salt stress signal transduction pathways. In: *Advances in Molecular Breeding Toward Drought and Salt Tolerant Crops*, pp : 141-182. M.A., Jenks, P.M., Hasegawa & S., Mohan Jain (eds.). Springer Science & Business Media.

190. Siddiqui, Z.A., Akhtar, M.S., & Futai, K. (2008). Mycorrhizae: Sustainable Agriculture and Forestry. Springer Science & Business Media.
191. Sidhoum, W., & Fortas, Z. (2013). Effect of Arbuscular mycorrhizal fungi on growth of semi-woody olive cuttings of the variety "Sigoise" in Algeria. *American Journal of Research Communication*, 1: 244-257.
192. Smith, S.E. & Read, D.J. (2008). *Mycorrhizal Symbiosis*. Academic Press, Cambridge, Royaume-Uni.
193. Smith, S.E. & Read, D.J. (2010). *Mycorrhizal Symbiosis*. Academic Press, Grande Bretagne, Royaume-Uni.
194. Smith, S.E., Jakobsen, I., Gronlund, M., & Smith, F.A. (2011). Roles of Arbuscular Mycorrhizas in Plant Phosphorus Nutrition: Interactions between Pathways of Phosphorus Uptake in Arbuscular Mycorrhizal Roots Have Important Implications for Understanding and Manipulating Plant Phosphorus Acquisition. *Plant Physiology*, 156: 1050–1057.
195. Soltner, D. (1981). *Les bases de la production végétale. Tome 1 : Le sol*. Collection Sciences et Techniques agricoles, Angers, France.
196. Souza, T. (2015). *Handbook of Arbuscular Mycorrhizal Fungi*. Springer.
197. Steinkellner, S., Hage-Ahmed, K., García-Garrido, J.M., Illana, A., Ocampo, J.A., & Vierheilig, H. (2012). A comparison of wild-type, old and modern tomato cultivars in the interaction with the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus mosseae* and the tomato pathogen *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*. *Mycorrhiza*, 22 : 189–194.
198. Subhashini, D.V. (2016). Effect of NPK fertilizers and co-inoculation with phosphate-solubilizing arbuscular mycorrhizal fungus and potassium-mobilizing bacteria on growth, yield, nutrient acquisition, and quality of tobacco (*Nicotiana tabacum* L.). *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 47: 328–337.
199. Subramanian, K.S., Santhanakrishnan, P., & Balasubramanian, P. (2006). Responses of field grown tomato plants to arbuscular mycorrhizal fungal colonization under varying intensities of drought stress. *Scientia Horticulturae*, 107 : 245–253.
200. Tahat, M.M., Kamaruzaman, S., Radziah, O., Kadir J., & Masdek, H.N. (2008). Response of (*Lycopersicon esculentum* Mill.) to different arbuscular mycorrhizal fungi species. *Asian Journal of Plant Science*, 7: 479–484.
201. Tawaraya, K., Hirose R., & Wagatsuma, T. (2012). Inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi can substantially reduce phosphate fertilizer application to *Allium*

- fistulosum* L. and achieve marketable yield under field condition. *Biology and Fertility of Soils*, 48: 839–843.
202. Teotia, P., Kumar, M., Prasad, R., Kumar, V., Tuteja, N., & Varma, A. (2017). Mobilization of micronutrients by mycorrhizal fungi. In: *Mycorrhiza - Function, Diversity, State of the Art*, pp : 8–26. A., Varma, R., Prasad, & N., Tuteja (eds.). Springer.
203. Teste, F.P., Laliberté, E., Lambers, H., Auer, Y., Kramer S., & Kandeler, E. (2016). Mycorrhizal fungal biomass and scavenging declines in phosphorus-impooverished soils during ecosystem retrogression. *Soil Biology and Biochemistry*, 92: 119–132.
204. Tilman, D., Cassman, K.G., Matson, P.A., Naylor R., & Polasky, S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418: 671–677.
205. Trouvelot, A., Kough J.L., & Gianinazzi-Pearson, V. (1986). Mesure du taux de mycorrhization d'un système racinaire. Recherche de méthodes d'estimation ayant une signification fonctionnelle. In : *Physiological and genetical aspects of mycorrhizae*, pp: 217–221. V., Gianinazzi-Pearson, & S., Gianinazzi, (eds.). INRA, Dijon, France.
206. Turner, B.L., Papházy, M.J., & Haygarth, P.M. (2002). Inositol phosphates in the environment. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B*, 357: 449–469.
207. Turrini, A., Sbrana, C., Avio, L., Mugendi Njeru, E., Bocci, G., Bàrberi, P., & Giovanetti, M. (2016). Changes in the composition of native root arbuscular mycorrhizal fungal communities during a short-term cover crop-maize succession. *Biology and Fertility of Soils*, 52: 643–653.
208. Udaiyan, K., Greep, S., Muthukumar, T., & Chitra, A. (1999). Effect of fumigation and pesticide drenches on VAM status and growth in cereals. *Journal of Environmental Biology*, 20 : 167–175.
209. Ulrichs, C., Fischer, G., Buttner, C., & Mewis, I. (2008). Comparison of lycopene, β -carotene and phenolic contents of tomato using conventional and ecological horticultural practices, and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF). *Agronomía Colombiana*, 26: 40-46.
210. van Kauwenbergh, S.J. (2010). World phosphate rock reserves and resources. Technical Bulletin IFDC-T-75 (IFDC, 2010).
211. van Vuuren, D.P., Bouwmana A.F., & Beusen, A.H.W. (2010). Phosphorus demand for the 1970–2100 period: A scenario analysis of resource depletion. *Global and Environmental Change*, 20: 428–439.

212. Vitousek, P.M., Aber, J.D., Howarth, R.W., Likens, G.E., Matson, P.A., Schindler, D.W., Schlesinger, W.H., & Tilman, D.G. (1997). Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences. *Ecological Applications*, 7 : 737–750.
213. Vosátka, M. (1995). Influence of inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi on the growth and mycorrhizal infection of transplanted onion. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 53: 151–159.
214. Vosátka, M., Látr, A., Gianinazzi, S., & Albrechtová, J. (2012). Development of arbuscular mycorrhizal biotechnology and industry: current achievements and bottlenecks. *Symbiosis*, 58: 29–37.
215. Waller, F., Achatz, B., Baltruschat, H., Fodor, J., Becker, K., Fischer, M., Heier, T., Huckelhoven, R., Neumann, C., Von Wettstein, D., Franken P., & Kogel, K.H. (2005). The endophytic fungus *Piriformospora indica* reprograms barley to salt-stress tolerance, disease resistance, and higher yield. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102: 13386–13391.
216. Wang, Y.Y., Vestberg, M., Walker, C., Hurme, T., Zhang, X., & Lindstrom, K (2008). Diversity and infectivity of arbuscular mycorrhizal fungi in agricultural soils of the Sichuan Province of mainland China. *Mycorrhiza*, 18: 59-68.
217. White, P.J. & Brown, P.H. (2010). Plant nutrition for sustainable development and global health. *Annals of Botany*, 105: 1073–1080.
218. Woodford, C. (2003). Potassium. Benchmark Books, New York, USA.
219. Wright, S.F., & Upadhyaya, A. (1998). A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant and Soil*, 1: 97–107.
220. Wu, Q.S., & Zou, Y.N. (2017). Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Tolerance of Drought Stress in Plants. In: *Arbuscular Mycorrhizas and Stress Tolerance of Plants*, pp : 25–41. Q.S., Wu (eds.). Springer, Singapour.
221. Xavier, L.J.C., & Germida, J.J. (1997). Growth response of lentil and wheat to *Glomus clarum* NT4 over a range of P levels in a Saskatchewan soil containing indigenous AM fungi. *Mycorrhiza*, 7 : 3–8.
222. Zhang, S., Wang, L., Ma, F., Zhang, X., Li, Z., Li S., & Jiang, X. (2015). Can arbuscular mycorrhiza and fertilizer management reduce phosphorus runoff from paddy fields?. *Journal of Environmental Sciences*, 33: 211–218.
223. ZhongQun, H., ChaoXing, H., ZhiBin, Z., ZhiRong Z., & HuaiSong, W. (2007). Changes of antioxidative enzymes and cell membrane osmosis in tomato colonized by

arbuscular mycorrhizae under NaCl stress. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 59: 128–133.

224. Zhu, X., Song, F., & Liu, F. (2017). Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Tolerance of Temperature Stress in Plants. In: *Arbuscular Mycorrhizas and Stress Tolerance of Plants*, pp : 163-194. Q.S., Wu (eds.). Springer, Singapour.

Webographie

Site net 1 : <http://www.algerie-eco.com/2016/08/16/tomate-industrielle-renaissance-dune-filiere/>

Site net 2 : <https://fr.climate-data.org/location/>

ANNEXES

ANNEXE 1

Formule de calculs des paramètres de l'infection CMA définies par Trouvelot et al., (1986)

1. La fréquence de mycorhization (F) :

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

N : nombre de fragment observés

N₀ : nombre de fragments sans traces de mycorhization.

2. L'intensité de mycorhization du cortex radicaire (M et m) :

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

$$M\% = (95 n_5 + 70 n_4 + 30 n_3 + 5 n_2 + n_1) / (N - n_0)$$

M : l'intensité de mycorhization du cortex radicaire entier.

m : l'intensité de mycorhization de la partie endomycorhizée du système racinaire.

n₅, n₄, n₃, n₂, n₁ : sont respectivement les nombres de fragments notés dans les cinq classes de l'échelle d'intensité de colonisation du cortex radicaire.

3. La teneur arbusculaire (A et a) :

$$a\% = (100 m A_3 + 50 m A_2 + 10 m A_1) / 100$$

$$A\% = a \times M / 100$$

a : la teneur arbusculaire dans la partie endomycorhizée du système racinaire.

A : la teneur arbusculaire dans le cortex radicaire.

m A₃, m A₂, m A₁ : sont le pourcentage de mycorhization de qualité arbusculaire donnée, calculés suivant le model :

$$m A_1 = (95 n_5 A_1 + 70 n_4 A_1 + 30 n_3 A_1 + 5 n_2 A_1) F / M (N - n_0)$$

n₅ A₁, n₄ A₁, n₃ A₁, n₂ A₁ : sont respectivement les nombres de fragments notés dans les classes de l'échelle d'évaluation de la présence des vésicules et des arbuscules comme suit : 5 A₁, 4 A₁, 3 A₁, 2 A₁, 1 A₁.

ANNEXE 2

Table de Cochran (1950)

Table of Most Probable Numbers for Use with 10-Fold Dilutions and 5 Tubes per Dilution.

P ₁	P ₂	Most probable number for indicated values of P ₃					
		0	1	2	3	4	5
0	0	-	0,018	0,036	0,054	0,072	0,090
0	1	0,018	0,036	0,055	0,073	0,091	0,11
0	2	0,037	0,55	0,074	0,092	0,11	0,13
0	3	0,056	0,074	0,093	0,11	0,13	0,15
0	4	0,075	0,094	0,11	0,13	0,15	0,17
0	5	0,094	0,11	0,13	0,15	0,17	0,19
1	0	0,020	0,040	0,060	0,090	0,10	0,12
1	1	0,040	0,061	0,081	0,10	0,12	0,14
1	2	0,061	0,082	0,10	0,12	0,15	0,17
1	3	0,093	0,10	0,13	0,15	0,17	0,19
1	4	0,11	0,13	0,15	0,17	0,19	0,22
1	5	0,13	0,15	0,17	0,19	0,22	0,24
2	0	0,045	0,068	0,092	0,12	0,14	0,16
2	1	0,068	0,092	0,12	0,14	0,17	0,19
2	2	0,093	0,12	0,14	0,17	0,19	0,22
2	3	0,12	0,14	0,17	0,20	0,22	0,25
2	4	0,15	0,17	0,20	0,23	0,25	0,29
2	5	0,17	0,20	0,23	0,26	0,29	0,32
3	0	0,078	0,11	0,13	0,16	0,20	0,23
3	1	0,11	0,14	0,17	0,20	0,23	0,27
3	2	0,14	0,17	0,20	0,24	0,27	0,31
3	3	0,17	0,21	0,24	0,28	0,31	0,35
3	4	0,21	0,24	0,28	0,32	0,36	0,40
3	5	0,25	0,29	0,32	0,37	0,41	0,45
4	0	0,13	0,17	0,21	0,25	0,30	0,36
4	1	0,17	0,21	0,26	0,31	0,36	0,42
4	2	0,22	0,26	0,32	0,38	0,44	0,50
4	3	0,27	0,33	0,39	0,45	0,52	0,59
4	4	0,34	0,40	0,47	0,54	0,62	0,69
4	5	0,41	0,48	0,56	0,64	0,72	0,81
5	0	0,23	0,31	0,43	0,58	0,76	0,95
5	1	0,33	0,46	0,64	0,84	1,1	1,3
5	2	0,49	0,70	0,95	1,2	1,5	1,8
5	3	0,79	1,1	1,4	1,8	2,1	2,5
5	4	1,3	1,7	2,2	2,8	3,5	4,3
5	5	2,4	3,5	5,4	9,2	16	-

ANNEXE 3

Grille d'évaluation de l'infection

	0	1				2				3				4				5				
		A ₃	A ₂	A ₁	A ₀	A ₃	A ₂	A ₁	A ₀	A ₃	A ₂	A ₁	A ₀	A ₃	A ₂	A ₁	A ₀	A ₃	A ₂	A ₁	A ₀	
1																						
2																						
3																						
4																						
5																						
6																						
7																						
8																						
9																						
10																						
11																						
12																						
13																						
14																						
15																						
16																						
17																						
18																						
19																						
20																						
21																						
22																						
23																						
24																						
25																						
26																						
27																						
28																						
29																						
30																						
ToT																						

F% =

M% =

A% =

m% =

a% =

Résumé

L'utilisation d'engrais chimiques en agriculture permet des rendements satisfaisants, toutefois, cela peut avoir des effets néfastes sur l'environnement et la santé humaine. La réduction des quantités d'engrais utilisés devient alors une nécessité. A cet effet, les champignons mycorhiziens à arbuscules (CMA) constituent des outils biologiques efficaces pour une optimisation de leur utilisation. L'objectif de ce présent travail a été d'évaluer les conséquences des pratiques culturales sur les communautés de CMA naturellement présentes dans quelques champs du Nord-Est algérien d'une part et de tester le potentiel des CMA pour une agriculture plus productive et moins dépendante des fertilisants chimiques, d'autre part.

L'impact des pratiques culturales conventionnelles habituellement utilisées dans la culture de la tomate sur les communautés de CMA indigènes a été évalué dans huit sols agricoles du Nord-Est de l'Algérie (wilayas d'Annaba, d'El Tarf et de Guelma). Les résultats ont révélé à la fois une réduction de leur abondance et la dominance des espèces *Funneliformis mosseae*, *Septoglopus constrictum* et *Rhizophagus irregularis*. Cet effet sur la population des CMA indigènes handicape l'expression de leur effet bénéfique et à terme, pourrait compromettre leur maintien dans les sols agricoles.

Une expérimentation en serre, à l'aide d'un sol agricole provenant d'un champ prévu pour la culture de la tomate industrielle, a montré que l'inoculation à la fois de souches de CMA natives (composées d'un mélange des espèces *Funneliformis mosseae* et *Septoglopus constrictum*) et exotiques (inoculum de CMA commercial) permet des niveaux de colonisation racinaire allant jusqu'à 47.6% et 60.1%, respectivement. De même, la croissance des plants de tomate inoculés s'est traduite par un meilleur développement en hauteur (+22%), en poids frais aérien (+23%) en poids frais racinaire (+16%) et en poids sec aérien (+15%).

L'utilisation au champ du même inoculum commercial a été combinée avec une fertilisation chimique allant de 0, 50 et 100% de la dose requise en NPK sur le site de Ben Amar, et en mono-ammonium phosphate, sulfate d'ammonium et NPK sur celui d'El Karma, localisés au Nord-Est algérien. Ceci a confirmé chez la tomate l'effet positif de l'inoculation de CMA sur les niveaux de colonisation mycorhizienne (jusqu'à +52.37%), sur la croissance (jusqu'à +22% de la hauteur, +42% du poids sec aérien et +19% du poids sec racinaire) ainsi que sur les rendements (jusqu'à +24%). De plus, à El Karma, l'inoculation de CMA, combinée avec un apport de 50% de la dose recommandée en fertilisants chimiques, a permis d'obtenir le même rendement que lors de l'apport de la dose complète de fertilisants sans inoculation.

Mots clés : Champignons mycorhiziens arbusculaires ; *Funneliformis mosseae* ; *Septoglopus constrictum* ; inoculum CMA commercial ; fertilisants chimiques ; tomate industrielle ; Nord-Est algérien.