



UNIVERSITE MOHAMED EL BACHIR EL IBRAHIMI
BORDJ BOU ARRERIDJ

UNIVERSITY MOHAMED EL BACHIR EL IBRAHIMI
BORDJ BOU ARRERIDJ

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي برج بوعريريج

Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi B.B.A.

كلية علوم الطبيعة والحياة وعلوم الارض والكون

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre et de l'Univers

قسم العلوم البيولوجية

Département des Sciences Biologiques



UNIVERSITE MOHAMED EL BACHIR EL IBRAHIMI
BORDJ BOU ARRERIDJ

UNIVERSITY MOHAMED EL BACHIR EL IBRAHIMI
BORDJ BOU ARRERIDJ

Mémoire

En vue de l'obtention du Diplôme de Master

Domaine Des Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Sciences Biologiques

Spécialité : Biodiversité et Environnement

Thème

**Etude du statut mycorhizien du blé dur dans la wilaya
de Bordj Bou Arreridj**

Présenté par : BOUARISSA Widad

BESSAI Anfal

Devant le jury :

Président : M MOTASSIM Dahou (M.A.A., Univ.B.B.A)

Encadrant : Mme DRIAI Sihem (M.A.B., Univ.B.B.A)

Examineur : M. FELLAHI Zine El Abidine (M.A.A., Univ.B.B.A)

Année universitaire : 2017/2018

Remerciements

Gloire à « ALLAH » le tout puissant et le miséricordieux, qui a exaucé nos rêves et nous a donné force et patience pour accomplir ce modeste travail.

Nos remerciements les plus sincères accompagnés de notre profond respect vont à notre Directeur de mémoire Madame « Driai Sihem », pour nous avoir dirigées et encouragées tout au long de ce travail, nous la remercions pour sa disponibilité, son aide précieuse, son écoute ses conseils avisés et pour la confiance qu'elle a bien voulu nous accorder et sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.

Nous remercions le président «M. Laazazga Abd El Ali» ainsi que les membres de jury M. Moutassim Dahou et M. Fellahi Zine El Abidine d'avoir accepté de présider et examiner cette étude, Nous les remercions aussi pour leurs disponibilités, leurs remarques, leurs questions, leurs soutien et leurs encouragements

Nous adressons nos sincères remerciements M. Aliat Toufik pour ses conseils judicieux. Nos remerciement vont également à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé nos réflexions

Les mots ne suffisent pas à exprimer notre profonde gratitude à l'égard de notre sœur Mme Samira Ould Ameer, pour tous ses assistances et ses conseils

Nous remercions aussi les responsables des laboratoires de phytopathologie et zoologie surtout M. Khalil, pour nous avoir permis de réaliser une partie de ce travail dans son laboratoire.

Nous remercions M. Laabachi Ayachi, M. Aissa Mehammel et M. Battache Ben Dief agriculteurs qui nous ont accordé leur confiance, leur aide et nous ont permis de mener nos expériences sur leurs parcelles.

Nos remerciements les plus sincères et les plus chaleureux vont à nos familles, nos maris et bien-sûr tous les amis qui nous ont encouragés,

Enfin nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

A l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, que dieu te garde dans son vaste paradis, à toi mon père. « Abd Elhamid »

A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur ; Maman que j'adore.

Merci d'être là toujours pour moi

Aux personnes que j'ai bien aimé leur présences dans ce jour, et qui m'ont soutenue tout au long de ce projet, mon frère Ahmed Abdelkefi et mes sœurs,

Nawal, Khadidja et Maria

Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient

toujours à mes côtés, mon Cousin «mon grand frère » Abd Allah Zakaria

Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient toujours à mes côtés, et qui m'ont accompagné durant mon chemin d'études supérieures, mes aimables amis, collègues d'étude, A mon binôme Widad et mon ami Amina

A celui que j'aime beaucoup mon fiancé Nasser

Anfal Bessai

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes parents je pourrais jamais exprimer le respect que j'ai pour vous, Vos prières, vos encouragements et votre soutien m'ont toujours été d'un grand secours. Puisse dieu, le tout puissant vous préserver du mal, vous combler de santé, de bonheur et vous procurer une longue vie

A mes très chères frères Rabeh, farouk et Abdo

A mes beaux frères Walid et Amar, et leurs femmes

A mes petits fils de mes frères Waïl, islem et Sirine

A ma soeur Djawida ,et son époux Chaouki et leurs petite fille Houda .

Mon cher fiancé Ghezali abdelhakim , aucun mot ne saurait t'exprimer mon

profond attachement et ma reconnaissance pour l'amour, le soutien moral et physique, l'aide précieuse et ta patience avec moi,

A mon binôme Anfal et toute la famille Bessai à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis merci.

widad

Sommaire

Introduction	1
Chapitre I Synthèse bibliographique	03
1 La symbiose mycorhizienne.....	03
1.1 Définition des mycorhizes.....	03
1.1.1 Les ectomycorhizes	04
1.1.2 Les ectendomycorhizes.....	04
1.1.3 Les endomycorhizes	04
1.2 Cycle de développement des champignons mycorhiziens à arbuscules	06
1.2.1 la phase présymbiotique	06
1.2.2 la phase symbiotique	06
1.3 Classification des champignons mycorhiziens à arbuscules.....	07
1.3.1 La classification classique	07
1.3.2 La classification moléculaire	08
1.4 Rôle des champignons mycorhiziens à arbuscules dans les agrosystèmes.....	09
1.4.1 Nutrition minérale	09
1.4.2 Rôle des champignons mycorhiziens dans l'alimentation hydrique des plantes	10
1.4.3 Résistance au calcaire et à la salinité.....	10
1.4.4 Protection contre les polluants.....	10
1.4.5 Protection contre les pathogènes :	11
1.4.6 Amélioration de la structure du sol.....	11
1.5 Effet des différents facteurs sur les champignons mycorhiziens à arbuscules.....	11
1.5.1 La lumière.....	11
1.5.2 La plante hôte	12
1.5.3 Le pH du sol	12
1.5.4 Effet du phosphore sur la mycorhization.....	12
1.5.5 Effets des pratiques culturales sur lesCMA.....	13
1.5.6 Effet de la fertilisation sur les CMA.....	13
1.5.7 Rotation des cultures	13
1.5.8 Lespesticides.....	14
1.6 Généralité sur blé dur :	14
1.6.1 La culture du blé dur (<i>Triticumdurum</i> Desf.)	14
1.6.2 Classification du blé dur	14
1.6.3 Importance du blé	15
Chapitre II Matériel et méthodes	16

1. Présentation de la wilaya de Bordj Bou Arreridj	16
1.1 Données climatiques de la wilaya	17
1.1.1 Les précipitations	17
1.1.2 Les températures	17
1.2 Localisation des sites d'étude	18
1.2.1 Site de Medjana(S1)	18
1.2.2 Site d'El Hamadia(S2)	18
1.2.3 Site El Euche (S3)	19
2 Méthode de travail	19
2.1 Prélèvement des échantillons de sol et de racines de blé	19
2.2 Caractéristiques physico-chimiques des sols	20
2.2.1 Détermination du pH des sols	20
2.2.2 Détermination de la conductivité électrique	20
2.2.3 Détermination de la matière organique	20
2.2.4 Détermination du calcaire total	21
2.3 Détermination du taux de colonisation des racines par les CMA	21
2.3.1 Coloration et observation des systèmes racinaires	22
2.4 Détermination du potentiel mycorhizogène des sols	23
2.4.1 Préparation du dispositif	23
2.4.2 Calcul du potentiel mycorhizogène	24
2.5 Isolement des spores	24
2.5.1 Dénombrement des spores	25
3 Analyses statistiques	25
Chapitre III Résultats et discussion	27
1 Résultats de l'analyse physico-chimique et du sol	27
2 Taux de colonisation racinaire	29
3 Potentiel mycorhizogène des sols	29
4 Abondance des spores	30
4.1 Aspects morphologiques des spores isolées des trois sites S1, S2 et S3	31
Conclusion	36
Références bibliographiques	

Résumé

Cette étude a pour but principal l'évaluation du statut mycorhizien des sols agricoles de la wilaya de Bordj Bou Arreridj. Pour cela, le taux de mycorhization des racines de blé, le potentiel mycorhizogène du sol et le nombre de spores de champignons mycorhiziens à arbuscules ont été évalués dans trois sites : Medjana, El Hamadia et El Euche.

Les résultats obtenus ont montré des taux de mycorhization des racines de blé moyennement faibles à faible dans les trois sites. Le taux de mycorhization dans le site de Medjana était significativement plus élevé par comparaison aux sites S2 et S3. Nos résultats ont montré une diminution drastique du potentiel mycorhizogène des sols des sites S2 et S3 par rapport au site S1. Par ailleurs, les résultats obtenus ont montré que la moitié des spores de CMA isolées sont issues du site S1.

Mots clés : Champignons mycorhiziens à arbuscules, sol agricole, potentiel mycorhizogène, abondance sporale.

Abstract

The main purpose of this study was to assess the mycorrhizal status of agricultural soils in the wilaya of Bordj Bou Arreridj. Arbuscular mycorrhizal rate of wheat roots, soil mycorrhizal potential and Arbuscular mycorrhizal spores number were evaluated in three sites : Mediana (S1), El Hamadia (S2) and El Euche (S3). The results showed low mycorrhizal rates in the three sites. The arbuscular mycorrhizal rate in the Mediana site (S1) was significantly higher compared to the S2 and S3 sites. Our results also showed a drastic decrease in soil mycorrhizal potential in the S2 and S3 site compared to the S1 site.

In addition, our results showed that half of the isolated CMA spores were obtained from S1 site.

Key words: Arbuscular mycorrhizal fungi, agricultural soil, mycorrhizal potential, spore abundance.

ملخص

الهدف الرئيسي من هذه الدراسة، هي تقييم الحالة الميكورهيضية للقمح القاسي للأراضي الفلاحية لولاية برج بوعريريج، من أجل هذا قمنا بتقييم نسبة استعمار الجذور، قدرات الميكورهيضية وعددا الأبواغ في أراضي فلاحية في كل من مجانة، الحمادية و العش .

النتائج المتحصل عليها بينت نسب ضعيفة لاستعمار جذور القمح من قبل الفطريات الميكورهيضية الشجرية و هذا في المناطق الثلاثة، النسبة في موقع مجانة أعلى نسبيا على الموقعين الآخرين.

نستنتج أيضا تناقص كبير في القدرة الميكوريزية للموقعين الثاني والثالث بالنسبة للموقع الأول من جهة أخرى تثبت النتائج أن نصف الأبواغ الميكوريزية المعزولة مصدرها الموقع الأول.

الكلمات المفتاحية: الفطريات الميكوريزية الشجرية، التربة الزراعية ، القدرة الميكورهيضية، كمية الأبواغ.

Liste des abréviations

ADN : Acide désoxyribonucléique

ARN : Acide ribonucléique

BBA : bordj bou arreridj

C₃H₆O₃ : Acide lactique

C₃H₈O₃ : Glycerol

CaCO₃ : carbonate de calcium

CE : conductivité électrique

CO₂ : dioxyde de carbone

CMA : champignons mycorhiziens à arbuscules

DSA : direction des services agricoles

H₂PO₄⁻ : acide phosphorique

HCL : Chlorure d'hydrogène

KOH : Hydroxyde de potassium

M = Moyenne des maxima

m = Moyenne des minima.

MO : Matière organique

MPN : Most propable number

pH : Potentiel d'hydrogène

PPA : *PrePenetrationApparatus*

SSU rRNA : Small subunit ribosomal ribonucleic acid

Liste des figures

Figure 1 Principales formes de mycorhizes associées aux racines des plantes supérieures (Hallé, 2008, figure modifiée d'après Le Tacon, 1985).....	5
Figure 2 Cycle de développement des CMA (Akiyama, 2007)	6
Figure 3 Phylogénie des champignons basée sur la séquence de la SSU rRNA (Schüßler et al., 2001).	8
Figure 4 Arbre phylogénique des Glomeromycota (Schüßler et Walker, 2010), modifié par Schüßler (http://schuessler.userweb.mwn.de/geosiphon/geosiphon_home.html).....	9
Figure 5 Les trois grandes zones agricoles de wilaya Bordj Bou Arreridj.....	16
Figure 6 Les différentes intersections possibles entre l'axe de l'objectif du microscope et les structures fongiques dans un fragment racinaire mycorhizé par les CMA	22
Figure 7 Taux de colonisation totale, arbusculaire, vésiculaire et hyphale des racines de blé dans les trois sites S1, S2 et S3. Les moyennes ont été obtenues à partir de 5 répétitions. Les différentes lettres indiquent des différences significatives entre S1, S2 et S3 selon le test de Tukey ($P < 0,05$).....	28
Figure 8 Spores de CMA issues du site 01 dont les dimensions sont comprises entre 200 et 160µm.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 9 Spores de CMA issues du site 01 dont les dimensions sont comprises entre 160 et 100µm.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 10 Spores de CMA issues du site 01 dont les dimensions sont comprises entre 100 et 50µm.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 11 Spores de CMA issues du site 02 dont les dimensions sont comprises entre 250 et 200µm.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 12 Spores de CMA issues du site 02 dont les dimensions sont comprises entre 160 et 100µm.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 13 Spores de CMA issues du site 02 dont les dimensions sont comprises entre 100 et 50µm.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 14 Spores de CMA issues du site 03 dont les dimensions sont comprises entre 250 et 200µm.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 15 Spores de CMA issues du site 03 dont les dimensions sont comprises entre 160 et 100µm.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 16 Spores de CMA issues du site 03 dont les dimensions sont comprises entre 100 et 50µm.....	Erreur ! Signet non défini.

Liste des photos

Photo 1 Prélèvement des échantillons de sol et de racines de blé	20
Photo 2 Méthode de Mc Gonigle <i>et al.</i> , (1990).....	21
Photo 3 Coloration par le Bleu de Trypan 0,05 %.....	23
Photo 4 Tamisage humide selon la méthode de Gerdemann et Nicolson (1963).....	25
Photo 5 Observation des spores sous loupe binoculaire.....	26

Liste des tableaux

Tableau 1 Répartition moyenne mensuelle des précipitations (en mm)	17
Tableau 2 Températures moyennes mensuelles (en C°) pour la période 1990-2017.(Station météorologique de BBA, 2017).....	17
Tableau 3 Etapes de la coloration par le bleu de Trypan (Phillips & Hayman, 1970).....	22
Tableau 4 Caractérisation physico-chimiques des sols des trois sites S1, S2 et S3	27
Tableau 5 Nombre de propagules de CMA dans les trois sites S1, S2 et S3	29
Tableau 6 Nombre de spores de CMA isolées dans les sites S1, S2 et S3.....	30

INTRODUCTION

Introduction

Les céréales constituent 45 % des apports énergétiques dans l'alimentation humaine et leur utilisation organisée est à l'origine des civilisations. Il existe trois groupes de céréales majeures (blé, riz et maïs) qui correspondent à 75 % de la consommation céréalière mondiale (Clerget, 2011).

En Algérie, la culture du blé est très ancienne et remonte à la conquête arabe, depuis, elle s'est développée et occupe une place stratégique. Elle est l'une des principales filières de la production agricole. Dans les régions semi arides, les contraintes limitant la productivité sont principalement dues aux caractéristiques des sols (Larbi *et al.*, 1998). Les conditions écologiques devenant de plus en plus sévères et se retentissant essentiellement sur la qualité des sols. Cependant, les plantes de ces régions peuvent résister et se maintenir grâce aux microorganismes du sol dont les plus importants sont les bactéries, les protozoaires et les champignons mycorhiziens (CM) (Strullu, 1991). Ces microorganismes vivant en symbiose avec les racines des plantes jouent un rôle majeur dans la nutrition de ces dernières. (Smith et Read, 2008).

Les premières symbioses mycorhiziennes ont été formées il y a 400 millions d'années (Helgason et Fitter, 2005). L'avantage de cette symbiose ne se limite pas aux deux partenaires, mais concerne aussi l'intégrité de l'écosystème puisqu'elle améliore la qualité du sol (Caravaca *et al.*, 2002). Les champignons mycorhiziens sont considérés comme des champignons "clés" dans le fonctionnement des écosystèmes terrestres dont 90% sont bénéfiques pour les plantes. Dans ce groupe, les champignons mycorhiziens à arbuscules (CMA) sont les plus abondants et les plus importants sur les plans écologique et économique (Schüßler *et al.*, 2001). Leurs rôles dans l'amélioration de la production agricole ont été largement démontrés. Environ 80 % des plantes supérieures sont associées aux CMA qui assurent la stabilité écologique du milieu (Harley et Smith, 1983 ; Strullu, 1991). Ces symbiotes fongiques sont reconnus comme étant des composantes microbiennes majeures dans le déroulement des principaux cycles biogéochimiques des sols (carbone, phosphore et azote) et en conséquence dans le développement des plantes en améliorant leur nutrition minérale mais aussi hydrique et leur état sanitaire (Duponnois *etal.*, 2013).

L'objectif principal de ce mémoire est d'évaluer le statut des CMA dans la wilaya de Bordj Bou Arreridj en évaluant (i) le taux de mycorhization des racines de blé cultivé dans trois zones différentes, (ii) le potentiel mycorhizogènes des sols des trois zones et enfin (iii) l'abondance des spores de CMA se trouvant dans les trois agroécosystèmes.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres :

Chapitre 1 : Synthèse bibliographique inhérente au sujet.

Chapitre 2 : les méthodologies expérimentales utilisées lors de ce travail pour répondre aux questions posées.

Chapitre 3 : la présentation des résultats obtenus et leur discussion.

Enfin, ce manuscrit se termine par une conclusion générale

CHAPITRE I

Synthèse

Bibliographique

1. La symbiose mycorhizienne

À de rares exceptions près, les plantes vertes terrestres vivent en symbiose, c'est-à-dire en association intime (avec pénétration des tissus de l'un des deux organismes dans ceux de l'autre, ou à l'intérieur même des cellules), durable (effective jusqu'à ce que l'un des deux organismes meure) et à bénéfice mutuel (à bénéfice réciproque par l'échange de ressources complémentaires), avec des champignons liés aux racines sous la forme d'organes mixtes appelés mycorhizes (Garbaye, 2013). Ainsi, le symbiote participe positivement au développement de la plante.

1.1. Définition des mycorhizes

La notion de mycorhizes (du grec : *mykes* = champignon, *rhiza* = racine) a été citée pour la première fois par Frank en 1885 (Boullard, 1968), comme étant une association entre les champignons et les racines des plantes. Gerdemann (1970) a défini les mycorhizes comme une structure fonctionnelle entre les champignons symbiotiques du sol et les organes absorbants des plantes (racines, rhizomes et thalles) (Redecker *et al.*, 2000).

En réalité, ces associations impliquées dans l'absorption des éléments minéraux du sol sont très fréquentes et se retrouvent non seulement dans les racines de près de 90% des plantes à fleurs, mais également dans les organes souterrains de nombreuses bryophytes et ptéridophyte. Ces associations symbiotiques sont généralement mutualistes, c'est-à-dire qu'elles impliquent le transfert de nutriments (P, K etc.) en échange de carbone organique

1.1.1. Les ectomycorhizes

Chez les ectomycorhizes (du grec *ektos* : à l'extérieur) le champignon se développe essentiellement autour de la racine et forme un manchon mycélien. À partir du manteau, des hyphes extraracinaires prolifèrent et s'étendent dans le sol à la recherche des éléments nutritifs. Un autre réseau se développe dans les espaces intercellulaires corticaux de la racine pour former le réseau de Hartig qui constitue le siège des échanges nutritifs entre le champignon et la plante (Burgess *et al.*, 1994; Dell *et al.*, 1994; Smith et Read, 1997).

Ce type d'association est représenté surtout chez les essences forestières des régions tempérées et de la forêt boréale, mais il a été décrit aussi chez quelques espèces tropicales de la famille des *Dipterocarpaceae*, *Euphorbiaceae*, *Cesalpiniaceae*, *Myrtaceae* et

Fagaceae (Redhead, 1980). Les champignons ectomycorhiziens appartiennent surtout aux Basidiomycètes (Bolets, Russules, Laccaire, etc) mais aussi aux Ascomycètes (*Tuber*, *Elaphomyces*, etc) et rarement aux Zygomycètes (Endogone).

1.1.2. Les ectendomycorhizes

Les ectendomycorhizes se caractérisent à la fois par la présence du manteau mycélien et le développement d'hyphes inter et intracellulaires ; elles se rencontrent chez les *Arbutaceae*, les *Monotropaceae* et sont formées par des Basidiomycètes (*Cortinarius*, *Boletus*, etc) (Mikola, 1988).

1.1.3. Les endomycorhizes

Les endomycorhizes (du grec *endon* : à l'intérieur) se caractérisent par l'absence du manchon mycélien externe et par la pénétration des hyphes fongiques dans les cellules corticales. Trois types d'endomycorhizes sont rencontrés :

Les endomycorhizes des Orchidées et des Ericacées : Les hyphes forment des pelotons à l'intérieur des cellules corticales des racines des *Orchidaceae* et des *Ericaceae*. Ces deux types d'endomycorhizes sont formés respectivement par des Basidiomycètes et des Ascomycètes.

Les endomycorhizes des Cistacées : où les pénétrations endocellulaires prennent une forme coralloïde ; les champignons symbiotiques responsables appartiennent aux Ascomycètes hypogés, de la famille des *Terfeziaceae*.

Les mycorhizes à arbuscules : formées par des champignons inférieurs qui forment des associations avec environ 90 % des espèces végétales (Barea et Honrubia, 1993).

Les mycorhizes à arbuscules se composent de deux phases : une phase intraracinaire et une phase extraracinaire.

La phase intra-racinaire : comporte les structures qui se développent à l'intérieur des racines.

Les hyphes intra-racinaires : se développent dans les espaces inter et cellulaires et jouent un rôle dans le transfert et l'échange des nutriments.

Les arbuscules : résultent de la ramification des hyphes provenant d'une cellule voisine ou d'un espace intercellulaire adjacent. Ils se développent dans l'espace intracellulaire mais à

l'extérieur de la membrane cellulaire. Ils sont impliqués dans les échanges bidirectionnels entre les deux partenaires de la symbiose.

Les vésicules : des renflements d'hyphes intra ou intercellulaires riches en lipides et noyaux. Elles servent au stockage des lipides et glucides et à la reproduction.

La phase intraracinaire : comporte les structures qui se développent dans le milieu extraracinaire.

Les spores : structures intra ou extra-racinaires destinées à propager et à disséminer l'espèce. Les spores se rencontrent séparées ou dans des sporocarpes (Redecker et Schüßler, 2014) avec un diamètre compris entre 22 et 1 050 µm (Souza, 2015).

L'appressorium : épaissement d'origine hyphale adhérent à la surface de l'épiderme racinaire. L'appressorium facilite la pénétration du mycélium dans le cortex racinaire.

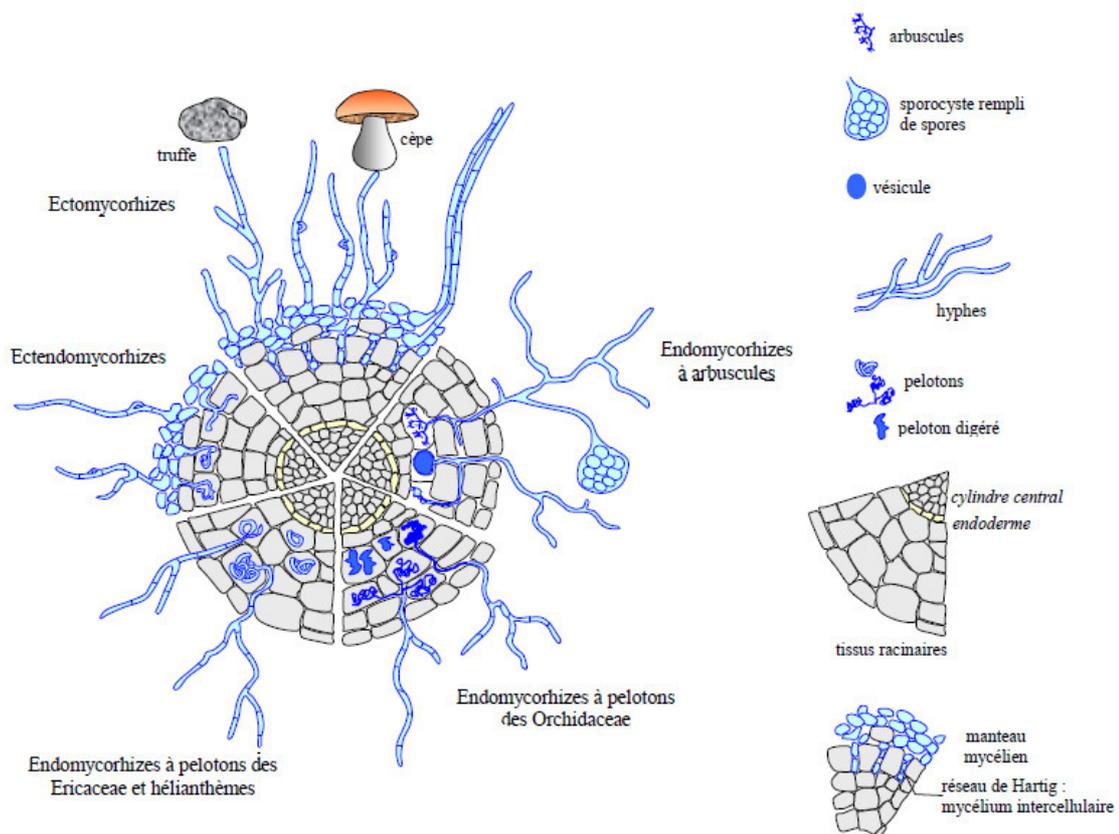


Figure 1 Principales formes de mycorhizes associées aux racines des plantes supérieures (Hallé, 2008, figure modifiée d'après Le Tacon, 1985)

1.2. Cycle de développement des champignons mycorhiziens à arbuscules :

Le cycle de développement des CMA peut être divisé en deux phases :

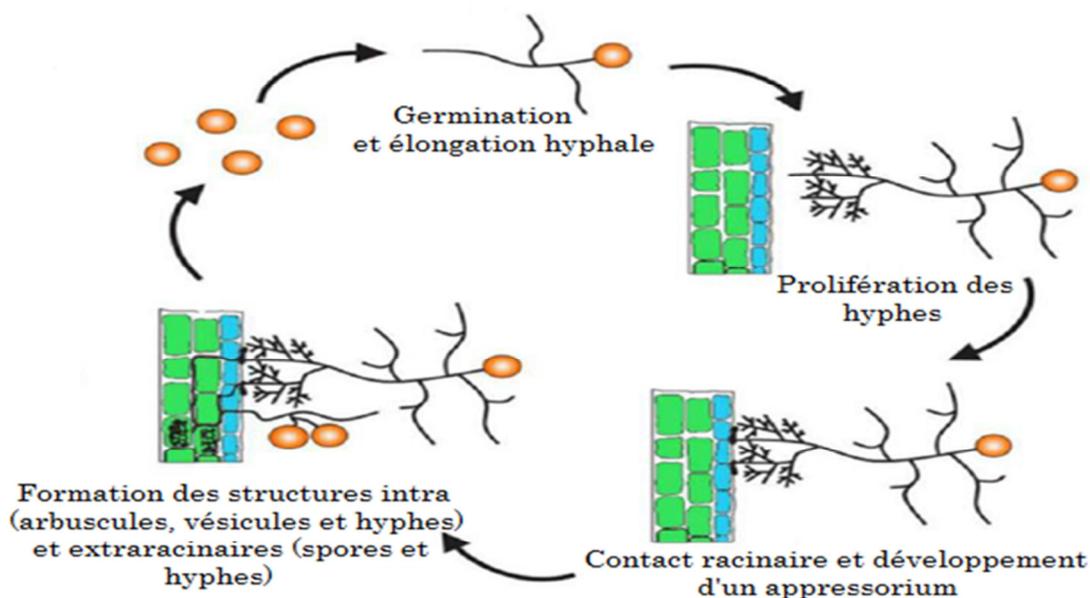


Figure 2 Cycle de développement des CMA (Akiyama, 2007)

1.2.1. la phase présymbiotique

La phase présymbiotique comprend la germination des spores, la ramification et le développement des hyphes germinatifs.

L'interaction plante-CMA est initiée dans la rhizosphère par un dialogue chimique entre les symbiotes (Fig. 2). La perception des signaux diffus par les deux partenaires leur permet de détecter leur présence respective avant tout contact physique et conduit à une ramification abondante du tube germinatif, augmentant la probabilité de contact avec les racines et ainsi l'établissement de la symbiose et au développement des structures fongiques (Akiyama *et al.*, 2005; Besserer *et al.*, 2006 ; Bonfanteet Genre, 2010).

1.2.2. la phase symbiotique

Cette phase comprend la prolifération des hyphes à l'intérieur des racines de l'hôte et leur expansion en dehors des racines qui est accompagnée par la formation des spores.

Les hyphes du CMA s'arrondissent et s'aplatissent sur la paroi de la racine pour former un appressorium ce qui indique que le champignon a reconnu une plante hôte potentielle.

Durant les 4 à 6 premières heures qui suivent la formation de l'appressorium, un appareil de pré-pénétration (*PrePenetrationApparatus* ou PPA) se constitue. Le PPA est un pont cytoplasmique épais à travers la cellule végétale à l'intérieur duquel se forme un tube creux. Seulement après que ce tunnel « transcellulaire » soit complet, les hyphes fongiques peuvent pénétrer les cellules de la racine jusqu'aux cellules corticales internes où le champignon forme des arbuscules qui représentent la structure la plus importante des CMA (Parniske, 2008). Le développement des arbuscules est accompagné par d'extrêmes changements dans la structure et les fonctions des cellules végétales. Ainsi, une cellule corticale presque entièrement remplie par une vacuole et effectuant principalement un rôle structural dans la racine, est reprogrammée par stimulation symbiotique (Harrison, 2012).

En dehors de ces deux phases, quand les conditions sont favorables, les spores des CMA peuvent germer spontanément en absence d'une plante hôte sans avoir besoin d'utiliser leurs réserves lipidiques (Bécard *et al.*, 2004). Durant cette phase asymbiotique, le développement du tube germinatif reste très limité. Après un certain temps, le protoplasme se rétracte dans la spore et la spore entre de nouveau en dormance. Certaines spores peuvent germer jusqu'à dix fois (Koske, 1981), ce qui conduit à suggérer que durant la phase asymbiotique, les spores des CMA économisent leurs ressources énergétiques pour conserver leur potentiel de croissance et leur capacité à survivre (Logi *et al.*, 1998).

1.3. Classification des champignons mycorhiziens à arbuscules

La première classification a été établie par Taxter (1922) puis elle a été modifiée par de nombreux mycorhizologistes (Zycha, 1935 ; Godfey, 1957 ; Moss, 1959 et 1970 ; Moss et Bowen, 1968 ; Gerdemann et Trappe, 1974 ; Walker, 1985 ; Walker et Sanders, 1986 ; Morton et Benny, 1990 ; Almada et Schenck, 1990 ; Walker et Trappe, 1993 ; Redecker *et al.*, 2000 ; Morton et Redecker, 2001 ; Schüßler *et al.*, 2001 et Schüßler et Walker, 2010).

1.3.1. La classification classique

Les premières classifications des CMA étaient basées sur les caractères morphologiques des spores (couleur, forme, taille, ornements). Celles qui ont une morphologie similaire et forment un seul type de paroi sporale sont apparentées phylogénétiquement (Morton, 2002).

Les faibles variations morphologiques entre les spores rend souvent difficile leur identification. Des études complémentaires de caractérisation moléculaire doivent être effectuées pour analyser la variabilité génétique des CMA.

1.3.2. La classification moléculaire

Le principe de l'approche moléculaire est basé sur l'amplification *in vitro* de l'ADN des régions variables du génome des champignons à partir des spores (Schwarzott et Schüßler, 2001) ou à partir des racines mycorhizées (Redecker *et al.*, 2000 ; Martin *et al.*, 2007 ; Alguacil, 2009).

Les CMA qui faisaient partie du phylum des Basidiomycètes, ont été déplacés dans un nouvel embranchement créé spécialement pour eux, les Glomeromycota (Fig. 3)(Schüßler et Walker, 2010). Ce dernier est constitué d'une seule classe, celle des Gloméromycètes qui est subdivisée en quatre ordres: les *Glomerales*, les *diversisporales* et deux lignées plus anciennes ; les *Paraglomerales* et les *Archeosporales*, onze familles (dont une de position incertaine) (Fig. 4) (Redecker et Schüßler, 2014).

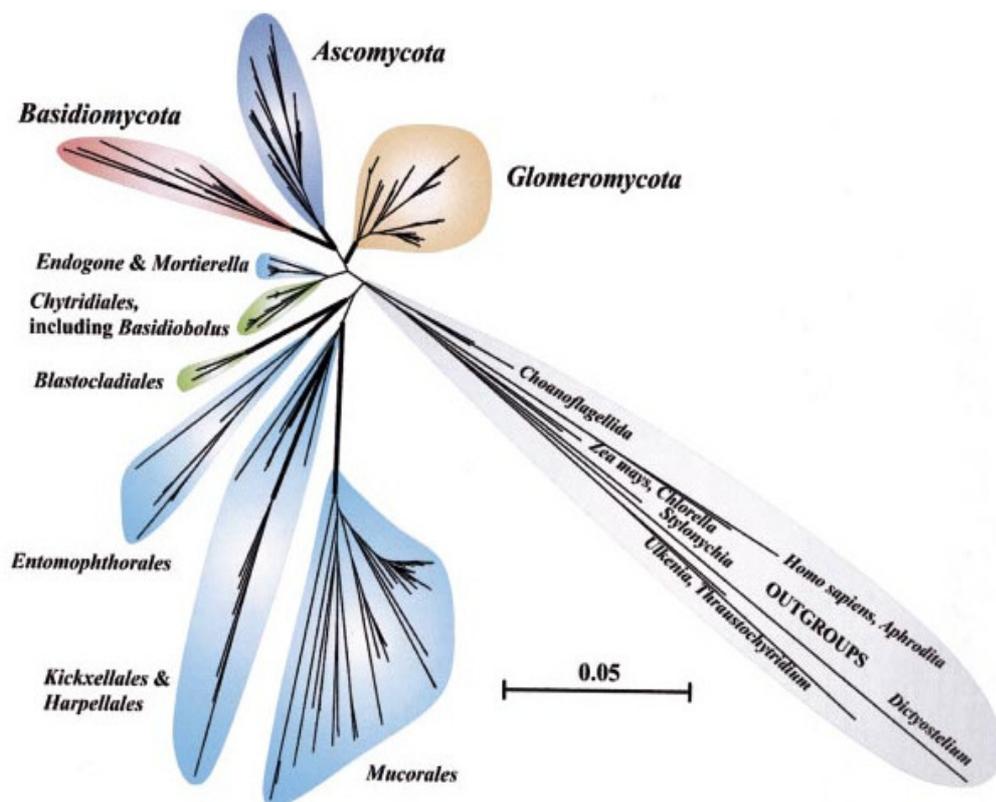


Figure 2 Phylogénie des champignons basée sur la séquence de la SSU rRNA (Schüßler *et al.*, 2001).

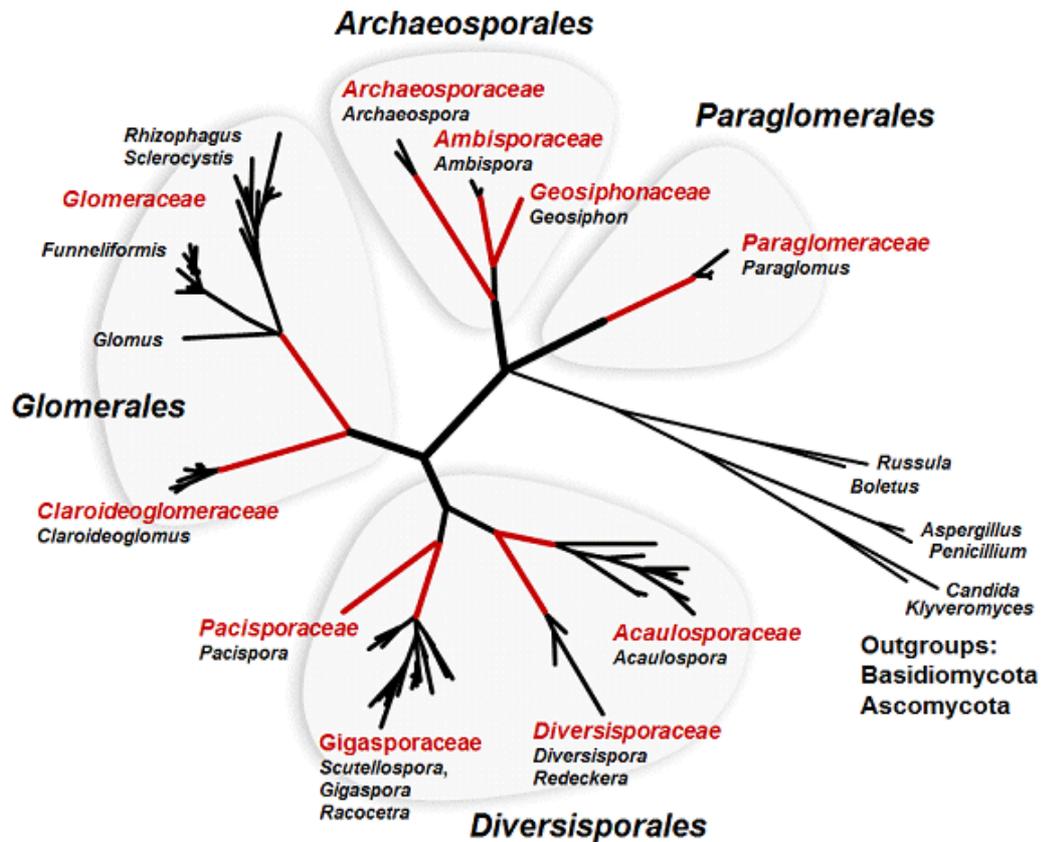


Figure 3 Arbre phylogénétique des Glomeromycota (Schüßler et Walker, 2010), modifié par Schüßler (http://schuessler.userweb.mwn.de/geosiphon/geosiphon_home.html)

1.4. Rôle des champignons mycorrhiziens à arbuscules dans les agrosystèmes

1.4.1. Nutrition minérale

Le rôle majeur des mycorhizes se situe au niveau de la mobilisation pour la plante d'éléments nutritifs très peu mobiles dans le sol, principalement le phosphore (Duponnois *et al.*, 2005 ; Lambers *et al.*, 2008). Les CMA permettent l'altération des minéraux primaires issus de l'altération de la roche mère améliorant ainsi la nutrition phosphatée des plantes (Landeweert *et al.*, 2001). Grâce au réseau extra matriciel, les CMA rendent accessibles les ions phosphates solubles, présents dans les petits interstices du sol qui ne sont pas accessibles aux poils absorbants (Strullu, 1991; Fortin, 2008; Smith et Read, 2008).

En plus du phosphore, les mycorhizes à arbuscules améliorent la nutrition en azote. (Hadley *et al.*, 1993). Cet élément est un composant essentiel pour la formation des acides

aminés et des nucléotides. Il rentre dans la structure des composés non protéiques tels que les pigments photosynthétiques (Maathuis, 2009). Il importe de mentionner que les CMA ont un rôle indirect dans la fixation symbiotique de l'azote par les légumineuses. Car la fixation symbiotique de l'azote ne peut être efficace que si les plantes sont bien alimentées en phosphore (Dianda, 1991)

Cette meilleure acquisition des nutriments inorganiques permise par les symbiotes fongiques concerne également d'autres macro- (K, Mg, Na, S) et micro- (B, Br, Cl, Cu, Cr, Cs, Co, Fe, Mo, Mn, Ni, Si, Zn) nutriments du sol (Smith, Read, 2008).

1.4.2. Rôle des champignons mycorhiziens dans l'alimentation hydrique des plantes

L'absorption de l'eau constitue la toute première fonction attribuée aux mycorhizes (Bolan, 1991 ; Smith et Read, 1997). L'augmentation de la surface d'absorption du système racinaire par la présence du réseau d'hyphes de CMA favorise l'absorption de l'eau. Le mycélium des champignons permet à la plante de puiser l'eau dans de petits interstices et agrégats du sol qui ne sont habituellement pas accessibles aux racines des plantes (Bothe *et al.*, 1994 ; Fortin *et al.*, 2015). Ainsi, les plantes mycorhizées ont tendance à être moins affectées par les périodes de sécheresse (Fortin *et al.*, 2008 ; Roy-Bolduc et Hijri 2010 ; Smith et Read, 2008).

Les CMA augmentent aussi la résistance des plantes au stress hydrique par un signal déclenché qui peut assurer une fermeture plus rapide des stomates, qui prévient une flétrissure irréversible (Davies *et al.*, 1992 ; Subramanian et Charest, 1997).

1.4.3. Résistance au calcaire et à la salinité

La mycorhization pourrait jouer un rôle dans la résistance des plantes aux effets du stress salin, ce qui pourrait se traduire par une amélioration de la nutrition hydrominérale (Mange *et al.*, 2008). Sur des sols calcaires, les CMA protègent les racines contre le calcium qui va être toxique pour la plante en limitant l'absorption de cet élément et en excréant dans le milieu des acides organiques qui vont le chélater, ou en limitant son transfert à la racine (Genet, 2008).

1.4.4. Protection contre les polluants

Les CMA sont également impliqués dans l'atténuation des effets néfastes des polluants sur les plantes tels que les hydrocarbures aromatiques polycycliques (Verdin *et al.*, 2006; Debiane *et al.*, 2008, 2009), les fongicides (Campagnac *et al.*, 2010) et les éléments

traces métalliques (Firmin *et al.*, 2015). Les CMA participent à l'élimination des polluants et améliorent ainsi la croissance des plantes dans les sols pollués (Joner et Leyval, 2003; Leyval et Binet, 1998; Verdin *et al.*, 2006).

1.4.5. Protection contre les pathogènes

L'association mycorhizienne est un moyen de lutte biologique contre les organismes pathogènes telluriques en réduisant la teneur des substrats carbonés du milieu rhizosphérique, en formant des obstacles mécaniques difficiles à franchir pour certains micro-organismes, en synthétisant des inhibiteurs du développement de certains micro-organismes du sol et enfin et surtout, en produisant des substances antibiotiques qui peuvent protéger la plantes (Dalpé, 2005).

1.4.6. Amélioration de la structure du sol

Les mycorhizes à arbuscules jouent un rôle important dans les interactions écologiques du sol et dans la préservation de la structure du sol par stabilisation des agrégats (Rillig,2004). Cette stabilisation se produit par deux mécanismes : le premier se fait par le mycélium des mycorhizes qui vient lier les agrégats du sol entre eux et le deuxième est constitué par relâchement d'une substance chimique appelée glomaline, qui lie les particules de sol entre eux(Douds,2004).

1.5. Effet des différents facteurs sur les champignons mycorhiziens à arbuscules

Les champignons mycorhiziens à arbuscules doivent évoluer dans un environnement approprié pour établir une symbiose pleinement efficace. Cependant, certains facteurs peuvent influencer l'établissement de la symbiose mycorhizienne et le rôle qu'elle joue dans les écosystèmes.

1.5.1. La lumière

L'énergie lumineuse captée par les plantes permet de produire la matière organique dont la plante et ses partenaires symbiotiques ont besoin pour leur développement. La qualité et la quantité de lumière ont un impact important sur l'efficacité de la photosynthèse et ainsi sur la quantité de matière organique produite(William et Hopkins, 2003). Une diminution de la photosynthèse due à un manque de lumière peut indirectement affecter la colonisation mycorhizienne, la production de spores et l'élongation du réseau d'hyphes (Heinemeyer *et*

al.,2004).La quantité et la qualité de lumière exerce donc une influence sur le développement des CMA et sur la stimulation de la croissance de la plante hôte.

1.5.2. La plante hôte

Le partenaire fongique est obligatoirement dépendant de l'hôte photosynthétique pour se développer et se reproduire (Fortin *etal*, 2008). La plante hôte fournit également au champignon une protection physique contre les variations de la température et de l'humidité et les attaques des agents pathogènes (Garbaye, 2013). Cependant, la réponse des plantes à la mycorhization diffère d'une espèce à une autre. Pour un même cultivar, la réponse endomycorhizienne peut également être différente. Certaines espèces comme la carotte, le poireau et l'oignon ont une forte dépendance mycorhizienne, alors que d'autres comme le sorgho, le soja, le maïs et la luzerne ont une dépendance mycorhizienne intermédiaire. Enfin, une dernière catégorie comprenant le blé, l'orge, le riz et la tomate montrent une faible dépendance envers la colonisation mycorhizienne (Fortin *etal.*, 2015). Les facteurs végétaux qui sont à l'origine des différences observées dans l'aptitude à la colonisation endomycorhizienne semblent liés aux caractères morphologiques et physiologiques des plantes (Derelle, 2012).

1.5.3. Le pH du sol

Le pH influence la disponibilité des éléments minéraux et l'activité microbienne du sol. Un pH très élevé ou très faible peut exposer les plantes à des carences en éléments minéraux, affectant ainsi le rendement des cultures.

L'activité microbienne dépend fortement des conditions physico-chimiques du sol. Elle est optimale à un pH neutre (pH = 7) et diminue à des pH acide et basique. La distribution des CMA est influencée par le pH du sol (Green et al 1967). En effet, dans les sols à pH inférieur à 5,5 et supérieur à 6,5 la germination des spores de CMA diminue (Gunasekaran 1987). La diminution des taux de germination des spores entraîne une diminution du potentiel infectieux des CMA et de leur performance. Certains auteurs affirment que la colonisation mycorhizienne est plus élevée dans des sols où le pH est modéré. Coughlan et al. (2000) ont démontré une corrélation positive du pH avec la qualité et la quantité de la colonisation intracellulaire. Ils ont affirmé que la colonisation mycorhizienne est élevée pour un pH situé entre 5 et 7.

1.5.4. Effet du phosphore sur la mycorhization

L'association symbiotique plante/CMA a tendance à diminuer quand la concentration du phosphore augmente dans le sol. Quand la plante présente de hauts niveaux de phosphore dans les tissus, la production de spores et d'hyphes secondaires extra-racinaires est réduite (Grant *et al*, 2004). Pour expliquer la décroissance de la colonisation racinaire quand il y a de hauts niveaux de phosphore dans les sols et les tissus, une hypothèse a été formulée. Elle indique qu'à un niveau non limitant de phosphore, la plante ne va pas livrer de carbone au champignon car elle peut continuer le prélèvement du phosphore via le système racinaire. A court terme, les racines maintiennent un transfert du carbone au champignon jusqu'à ce que la plante atteigne un niveau de phosphore suffisant (Javot *et al*, 2007). Cependant, des études ont montré que dans un système de production avec de faibles niveaux d'intrants, l'activité mycorhizienne peut être améliorée. Dans l'étude de Grant *et al* (2004), la colonisation au champ était 60% plus élevée que dans un système avec de hauts niveaux d'intrants.

1.5.5. Effets des pratiques culturales sur les CMA

La diversité des communautés de CMA est plus faible dans les sols cultivés que dans les sols de prairies ou de forêts (Daniell *et al.*, 2001 ; Oehl *et al.*, 2003, 2004 et 2005). Cette perte de diversité de CMA est due à des pratiques agricoles comme la fertilisation minérale, le travail du sol, l'emploi de pesticides et la monoculture.

Le type de culture pratiquée et la nature du sol influent aussi sur la diversité des CMA (Hijri *et al.*, 2006).

1.5.6. Effet de la fertilisation sur les CMA

L'apport de fertilisant minéral soluble augmente sa disponibilité pour les plantes mais il réduit fortement et même supprime la symbiose mycorhizienne (Ba *et al*, 2001). Puisque les concentrations élevées en azote et en phosphore dans le sol augmentent les synthèses protéiques et les composés phosphorylés chez les plantes, mais diminuent la teneur en sucres solubles dans les racines, et par conséquent le taux de colonisation mycorhizienne (Le Tacon, 1999). Les engrais organiques (fumier, compostes, résiduels de cultures, bois rameaux fragmentés), au contraire ne sont pas néfastes pour les CMA, et peuvent même les stimuler (Gosliget *et al*, 2006).

1.5.7. Rotation des cultures

Les faibles diversités des cultures ainsi que les systèmes de monocultures modifient la diversité des CMA dans les sols cultivés et augmentent la densité de certaines espèces fongiques plutôt que d'autres (Burrows et Pfleger, 2002 ; Oehl *et al.*, 2003). Il existe en effet une

certaines spécificités des CMA pour leur hôte (Helgason *et al.*, 2002 ; Mummey *et al.*, 2005) et la succession année après année de la même culture permet de sélectionner un nombre réduit d'espèces spécifiques à cette plante.

1.5.8. Les pesticides

L'application des pesticides peut avoir des effets néfastes sur les populations de CMA (Plenchette et Corpron, 1987 ; Menge, 1982 ; Trappe *et al.*, 1984). Ils peuvent supprimer ses derniers et autres pathogènes, comme les nématodes et les adventices par conséquent, l'effet global peut être positif (Goslig *et al.*, 2006).

1.6. Généralité sur blé dur :

Le blé dur est une plante annuelle, monocotylédone qui appartient au genre *Triticum* de la famille des *Poaceae*. C'est la première céréale cultivée et largement consommée en Algérie et dans le monde.

1.6.1. Classification du blé dur

Le blé dur est une plante annuelle appartenant à la famille des *Poaceae*. La classification du blé dur, selon Brouillet *et al.*, (2006) est la suivante :

Règne	<i>Plantae</i>
Embranchement	<i>Spermaphyta</i>
S. Embanchement	<i>Magnoliophyta</i>
Classe	<i>Liliopsida</i>
Ordre	<i>Poales</i>
Famille	<i>Poaceae</i>
Genre	<i>Triticum</i>
Espèce	<i>Triticum durum</i> Desf.

1.6.2. La culture du blé dur (*Triticum durum* Desf.)

Dans le monde

Le blé dur est cultivé sur 10% des superficies réservées aux céréales (blé dur, tendre, riz et maïs). La production mondiale du blé a atteint 750 millions de tonnes en 2018 (FAO).

En Algérie

Le blé dur occupe une place privilégiée suite à son utilisation dans l'alimentation quotidienne de la population sous diverses formes. En 2016, 2 440 097 tonnes de blé ont été récoltés en Algérie sur une superficie de 1 442 846 ha de terre agricole en (FAO). Le rendement faible (16 912 hg/ha) est généralement dû à la faiblesse pluviométrique très importante dans les étages climatiques aride et semi-aride.

1.6.3. Importance du blé

Les céréales occupent à l'échelle mondiale une place primordiale dans le système agricole. Elles sont considérées comme une principale source de la nutrition humaine et animale (Slama *et al.*, 2005). Parmi ces céréales, le blé occupe la première place pour la production mondiale et la deuxième après le riz, comme source de nourriture pour les populations humaines. Il assure 15% de ses besoins énergétiques (Bajji, 1999).

Actuellement, l'Algérie est un grand importateur de blé et se trouve dépendante du marché international. Cette situation risque de se prolonger à plusieurs années, faute de rendements insuffisants et des besoins de consommation sans cesse croissants devant une forte évolution démographique (Chellali, 2007).

CHAPITRE II

Materiel et Méthodes

1. Présentation de la wilaya de Bordj Bou Arreridj

La wilaya de Bordj Bou Arreridj s'étend sur une superficie de 392 252 ha au Nord-Est du pays. Elle est limitée au Nord par la wilaya de Bejaia, à l'Est par la wilaya de Sétif, à l'Ouest par la wilaya de Bouira et au Sud par la wilaya de Msila. Elle est composée de 10 Daïras :1. Bordj Bou Arréridj, 2. Bordj Ghedir, 3.Medjana, 4. El Hamadia, 5. Mansoura, 6. Ras El Oued, 7.BirKasdali, 8.Djaafra, 9. Bordj Zemoura et 10.AïnTaghrout.

La wilaya se subdivise en trois zones bien distinctes :(figure 05)(DSA ,2018)

La zone nord montagneuse à relief très accidenté avec une pluviométrie variant de 300 mm à l'ouest à plus de 500 mm au centre et à l'est.

La zone intermédiaire constituée de hautes plaines avec une pluviométrie annuelle variant entre 300 et 400 mm/an.

La zone sud caractérisée par un relief très accidenté, une pluviométrie inférieure à 250 mm et un sol fortement menacé par l'érosion. (DSA, 2018)

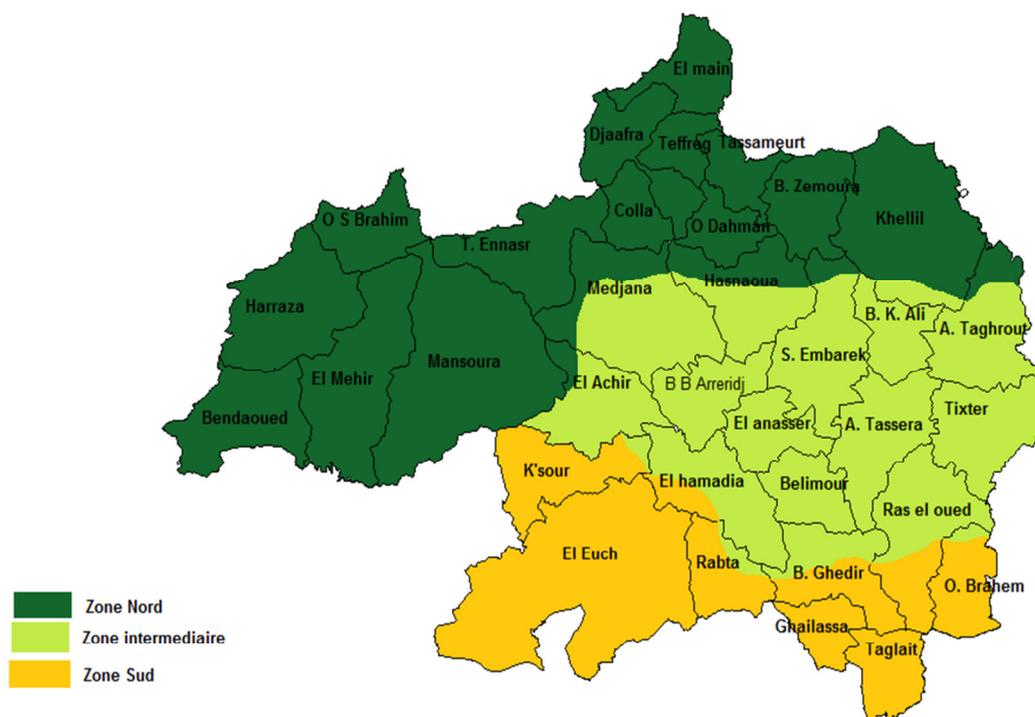


Figure 4 Les trois grandes zones agricoles de wilaya Bordj Bou Arreridj
(Direction des Services Agricole, 2018)

1.1. Données climatiques de la wilaya

1.1.1. Les précipitations

La région d'étude reçoit une quantité de pluie très irrégulière, le maximum est atteint au mois de septembre (42 mm) et le minimum au mois de juillet (9,80 mm).(tableau 1).

Tableau 1Répartition moyenne mensuelle des précipitations (en mm) pour la période 1990-2017.(Station météorologique de BBA, 2017)

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Jui	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc.
P (mm)	41,50	28,50	31,60	38,40	38,20	20	9,80	16,40	42	31	31,80	33,70

1.1.2. Les températures

Les températures moyennes mensuelles sont calculées par différentes méthodes. Dans notre cas, nous avons utilisé la méthode de la sommation des extrêmes et le calcul de leur moyenne arithmétique « $\frac{M+m}{2}$ ».

Dont : M = Moyenne des maxima.

m = Moyenne des minima.

Le tableau 2, montre que les températures mensuelles de notre zone d'étude atteignent leur minima au mois de janvier, avec une valeur de 2,5°C. Les maxima sont observés au mois de juillet, avec une valeur de 35,2 °C. La moyenne annuelle des minima est de 6,4°C et celle des maxima est de 28.4°C. Pour la moyenne annuelle arithmétique « $\frac{M+m}{2}$ » est de 17.4 °C.

Tableau 2Températures moyennes mensuelles (en C°) pour la période 1990-2017.(Station météorologique de BBA, 2017)

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
T max(C°)	11	12	16	20	25,3	32	35,2	34,5	28	23	15,5	11,6
T min(C°)	2,5	3	5,5	8	12,7	17,3	20,9	20,3	16	12,2	6,6	3,5
T moy(C°)	6,4	7,2	10,5	13,7	18,8	24,5	28,4	27,8	22,4	17,6	11	7,1

1.2. Localisation des sites d'étude

Les prélèvements ont été réalisés dans trois sites dans la wilaya de Bordj Bou Arreridj. Il s'agit des fermes Mhammel située à Medjana dans la zone nord, Laabachi située à El Hamadia dans la zone intermédiaire, et Battache à El Euhe dans la zone sud.

1.2.1. Site de Medjana(S1)

La commune de Medjana est située dans au Nord-Ouest de la wilaya de Bordj Bou Arreridj. Elle est limitée au Nord par Colla, à l'Est par Hasnaoua, au Sud-Est par Bordj Bou Arreridj, au Sud-Ouest par El Achir et à l'Ouest par Teniet Ennasr et Mansoura. Le site S1 se trouve dans la ferme Mhammel dans la région Ain Essoltane (altitude: 808 m, latitude: 36°13'N, longitude: 4°40'E).

Climat

Le site S1 est soumis à des influences méditerranéennes, avec un écart de température considérable. Le climat est de type continental semi-aride avec un hiver pluvieux et froid et un été sec et chaud. Les précipitations enregistrées varient entre 300 et 400 mm/an.

Le sol

Le sol a une texture argileuse et une capacité de rétention de l'eau et des engrais très élevées. En générale le sol est de fertilité élevée et ne présente pas des problèmes de salinité.

1.2.2. Site d'El Hamadia(S2)

La commune d'El Hamadia est limitée au Nord par EL Anasser, à l'Est par Belimour, au Sud par Rabta et à l'Ouest par Ksour. Le site S2 se trouve dans la ferme Laabachi dans la région de Oued Lakhder (altitude: 852 m, latitude: 35°58'N, longitude: 4°46'E).

Climat

Le climat du site S2 est de type continental semi-aride, caractérisé par un été très chaud avec du vent dominant (SIROCCO), et automne chaud. L'hiver est très froid avec de fortes gelées tardives (Social, 2015).

Sol

Le sol est de type argilo-limoneux, il est constitué de 32% de sable, 36% de limon et 1,6% matière organique (Social, 2015).

1.2.3. Site El Euche (S3)

La commune d'El Euche se situe à 35 Km au sud du chef-lieu de la wilaya de Bordj Bou Arreridj. Elle est limitée par Ksour à l'Ouest, El Hamadia à l'Est et Msila au Sud (DSA). Le site S3 se trouve dans la ferme Bettach (altitude: 765 m, latitude: 35°54'N, longitude: 4°40'E).

Climat

Située dans l'étage bioclimatique aride, El Euche est caractérisée par un relief très accidenté et une pluviométrie inférieure à 250 mm.

Sol

La texture du sol est argilo-limoneuse à argilo-sableuse avec une perméabilité déficiente et un sol fortement menacé par l'érosion (DSA, 2018).

2. Méthode de travail

2.1. Prélèvement des échantillons de sol et de racines de blé

Les prélèvements du sol et des racines de blé ont été effectués pendant la saison printanière de l'an 2018. Le sol a été collecté de l'horizon 15-20 cm de la rhizosphère du blé au niveau de trois points différents de chaque site (Photo 1). Après tamisage à 2 mm, le sol a été séché à l'air libre pour servir à l'isolement des spores de CMA, aux dosages physico-chimiques et à l'étude du potentiel mycorhizogène du sol. Parallèlement à cela, des racines de blé ont été prélevées et utilisées fraîches pour la détermination de leurs taux de colonisation par les CMA.



Photo2Prélèvement des échantillons de sol et de racines de blé. (Originale)

2.2. Caractéristiques physico-chimiques des sols

Le pH, la conductivité électrique (CE), la matière organique (MO) et le calcaire total (CaCO_3) ont été mesurés au laboratoire de phytopathologie de l'Université de Mohamede El Bachir El Ibrahim.

2.2.1. Détermination du pH des sols

La mesure du pH a été effectuée selon la méthode décrite par Pauwels (1992), sur une suspension 1:2,5 de sol : eau distillée, au moyen d'un pH mètre à lecture directe et de précision de 0,01.

2.2.2. Détermination de la conductivité électrique

La conductivité électrique permet d'obtenir une estimation globale en sels solubles d'un sol. La mesure a été effectuée sur un extrait 1:5 sol : eau distillée agitée pendant 1 heure, à l'aide d'un conductimètre de précision 0,01. La conductivité électrique est exprimée en milli siemens par centimètre (ms/cm).

2.2.3. Détermination de la matière organique

La matière organique a été mesurée par incinération. Les échantillons de sol ont été placés pendant une nuit (16 heures) dans un four à moufle à 375 °C. La perte de poids, après calcination, nous donne la matière organique.

2.2.4. Détermination du calcaire total

0,3 g de sol est mis en contact avec 10 ml d'HCl qui dissout le calcaire en milieu fermé. L'attaque du calcaire se traduit par un dégagement gazeux de CO₂ dont le volume est mesuré indirectement.

2.3. Détermination du taux de colonisation des racines par les CMA

Pour détecter la colonisation des racines par les CMA, cinq systèmes racinaires de chaque traitement ont été examinés. Les racines ont été colorées selon la technique décrite par Phillips & Hayman(1970).

Les taux de mycorhization ont été déterminés par la méthode de McGonigle *etal.*(1990). Cette technique consiste à placer entre lame et lamelle 20 fragments racinaires colorés ayant chacun 1 cm de longueur. L'observation des différentes intersections pouvant exister entre l'axe de l'objectif et le fragment de racine colorée a été faite au microscope optique (G 400x). Trois lectures par fragment ont été réalisées et cinq lames par traitement ont été préparées. Au total, au moins 100 fragments racinaires ont été utilisés pour chaque traitement (Photo 2) (Fig.06).



Photo 2 :Détermination du taux de coloration par la méthode de McGonigle *etal.*, (1990)

Le pourcentage de colonisation total = (nombre d'intersections observées – nombre d'intersections sans champignon)*100 / nombre d'intersections.

$$\text{Taux total H} = 100 * (G-p) / G$$

Taux d'arbuscules $A = 100 \cdot (q+s)/G$

Taux de vésicules $V = 100 \cdot (r+s)/G$

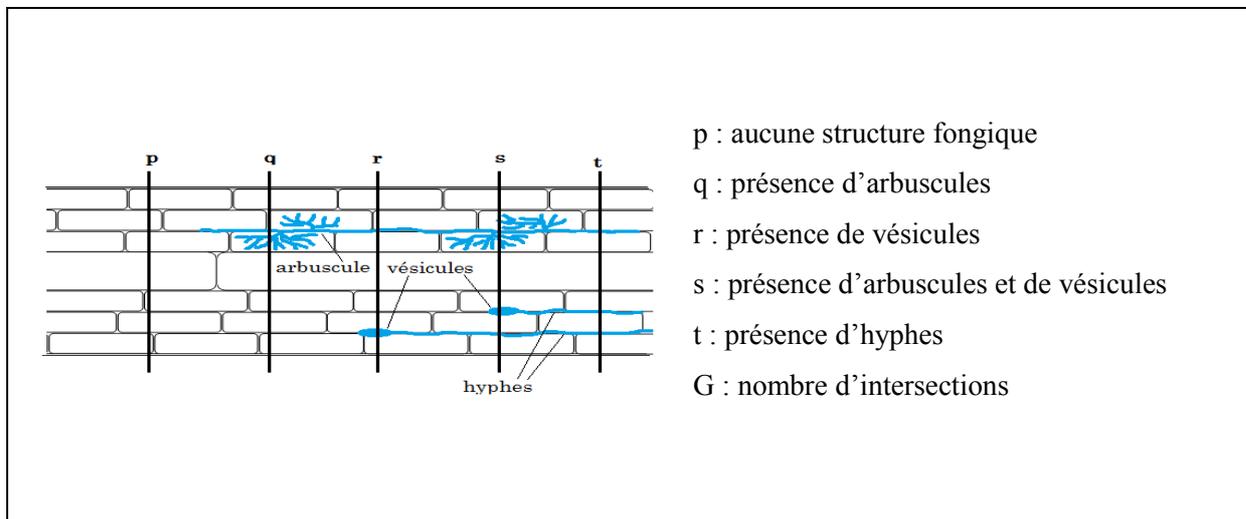


Figure 5 Les différentes intersections possibles entre l'axe de l'objectif du microscope et les structures fongiques dans un fragment racinaire mycorhizé par les CMA

2.3.1. Coloration et observation des systèmes racinaires

Les systèmes racinaires récoltés sont colorés selon la méthode décrite par Phillips & Hayman (1970).

Pour chaque dilution de sol, la présence ou l'absence de mycorhization est ensuite évaluée sous microscope (G 40x) et le nombre de plantes mycorhizées est noté. Le tableau 4 illustre les différentes étapes de la coloration des racines.

Tableau 3 Etapes de la coloration par le bleu de Trypan (Phillips & Hayman, 1970).

Etape	Réactif	Durée	Température
1. Eclaircissement	KOH 10 %	20 minutes	90 °C
2 .Rinçage	eau distillée	suffisamment	ambiante
3 .Acidification	HCl 1 %	5 minutes	ambiante
4 .Coloration	Bleu de Trypan 0,05 % (dans l'acidelactique (C ₃ H ₆ O ₃) + glycérol (C ₃ H ₈ O ₃) + eau distillée)	20 minutes	120 °C

5. Décoloration et conservation	Acide lactique 50 %	suffisamment	ambiante
------------------------------------	---------------------	--------------	----------



Photo 3 :Coloration par le Bleu de Trypan0,05 %

2.4. Détermination du potentiel mycorrhizogène des sols

Le potentiel mycorrhizogène du sol reflète la richesse du sol en propagules (spores, mycélium, racines colonisées, fragments) susceptibles de générer une mycorrhization. (Gianinazzi-Pearson *etal*, 1985).

Pour évaluer le potentiel mycorrhizogène des trois sols, la technique du nombre le plus probable MPN de l'anglais *Most Probable Number*(Alexander, 1965) a été utilisée. Cette technique adaptée aux CMA par Porter(1979) consiste à préparer des dilutions successives de sol.

2.4.1. Préparation du dispositif

Les dilutions ont été réalisées au nombre de cinq en homogénéisant du sol non stérilisé (inoculum) contenant les CMA de chaque échantillon de sol étudié mélangé avec du sol stérilisé par autoclavage à 120 °C pendant 20 minutes.

Les dilutions ont été préparées comme suit :

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

A partir de ces 300 g de mélange, 250 g 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).

Les dilutions ont été mises dans des pots de 100 ml à raison de cinq répétitions par niveau de dilution, des témoins de sol stérile ont été prévus. Le maïs a servi de plante piège pour la mycorhization. Après avoir été désinfectées par immersion dans l'alcool (70 %) pendant 5 minutes puis rincées abondamment à l'eau distillée, les graines de maïs sont mises à germer à l'obscurité à 25 °C. Les graines pré germées ont été repiquées dans les pots auparavant préparés à raison d'une plantule par pot. La culture a duré six semaines et l'arrosage a été fait trois fois par semaine à l'eau distillée.

2.4.2 Calcul du potentiel mycorhizogène

Cette estimation se fait par l'intermédiaire de la table d'Alexander (1965) à partir des racines mycorhizées ou non mycorhizées obtenues pour chacun des niveaux de dilutions et pour les cinq répétitions. La lecture de la table se fait en définissant la dilution la moins concentrée (P1) pour laquelle la mycorhization est observée dans les cinq répétitions et si ce cas ne se présente pas on prend celle où on trouve le maximum de plantes mycorhizées. Le nombre de plants colonisés dans les deux dilutions successives représente donc le P2 et le P3. Les trois valeurs P1, P2 et P3 seront reportées sur la table pour en déduire un nombre qui servira à la détermination du MPN pour 30 g de sol initial, en multipliant ce nombre par le facteur de dilution de P2, le nombre de propagules par kilogramme de sol est alors calculé.

2.4.3 Isolement des spores

100 g de sol prélevé de chaque site, séché à l'aire libre et tamisé à 2 mm a servi pour l'isolement des spores de CMA. La technique utilisée pour cette fin est celle du tamisage humide décrite par Gerdemann et Nicolson (1963). La technique consiste à soumettre à un jet d'eau l'échantillon de sol déposé sur une série de tamis à mailles décroissantes (250, 125, 100 et 40 μ m) (photo 4) disposés respectivement l'un au-dessus de l'autre dans l'ordre ci-dessus mentionné. Les particules de sol retenues dans chaque tamis sont transférées dans un b cher

puis observées à la loupe binoculaire. Les spores prélevées à l'aide d'une micropipette, sont conservées à 4 °C dans des tubes Eppendorf contenant de l'eau distillée stérile. (Photo 4)



Photo 4 Tamisage humide selon la méthode de Gerdemann et Nicolson (1963).

2.5. Dénombrement des spores

Après avoir isolé les différents types de spores correspondants à chaque site, ces dernières ont été observées sous loupe binoculaire afin de déterminer leur nombre.

3. Analyses statistiques

Les résultats obtenus ont été analysés statistiquement grâce au logiciel MINITAB. Les tests statistiques ont été menés sur 5 réplicats. Pour normaliser les données des taux de mycrohization initialement exprimées en pourcentage, celles-ci ont été transformées en coordonnées angulaires (arcsinus de la racine carrée), afin de pouvoir réaliser le test de tukey (($P < 0,05$)).

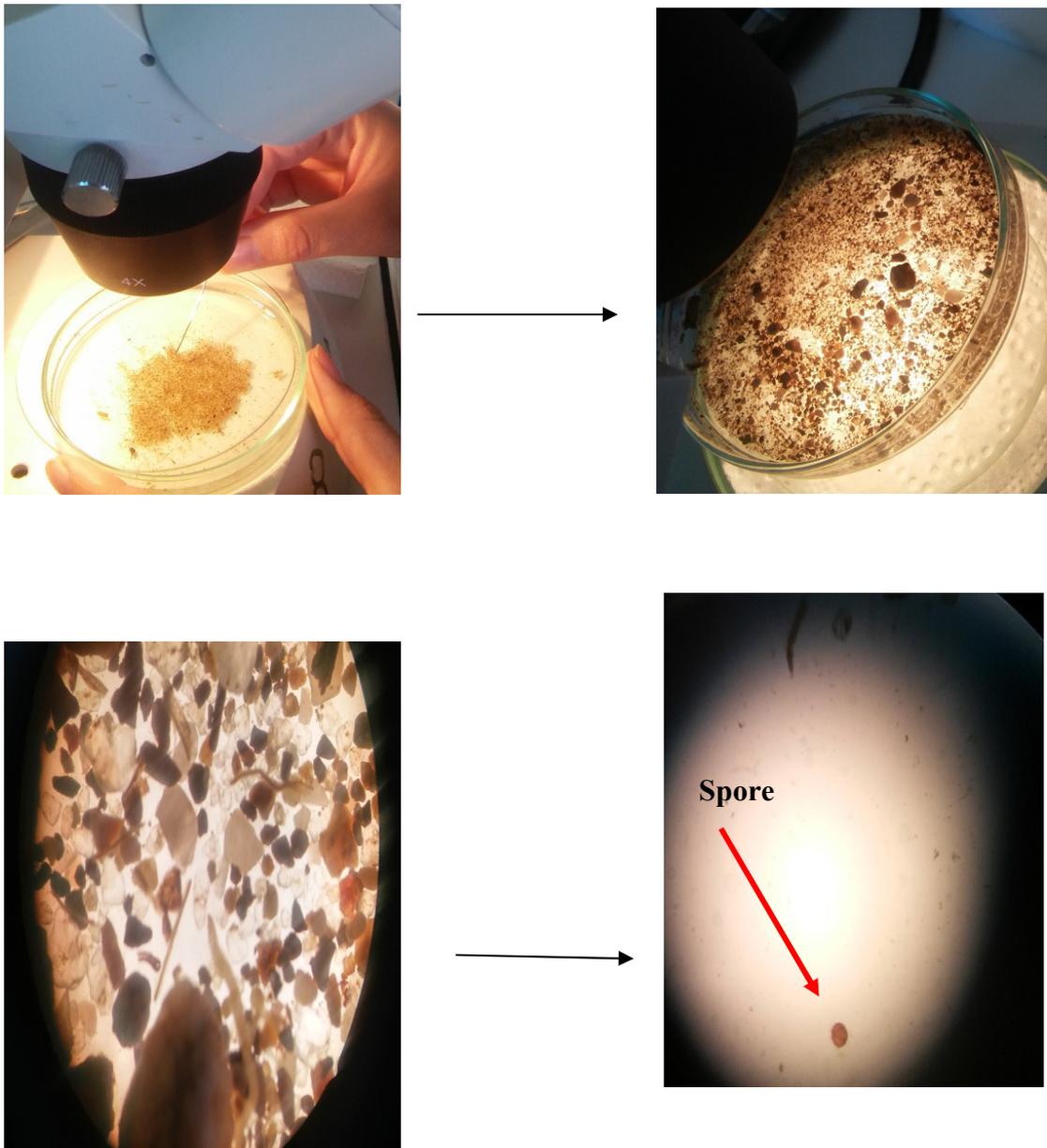


Photo 5 Observation des spores sous loupe binoculaire

CHAPITRE III

Résultats et

Discussion

1. Résultats de l'analyse physico-chimique du sol

Les sols des trois sites prospectés se caractérisent par un pH alcalin (7,84, 8,23 et 8,35). La conductivité électrique de la solution aqueuse des quatre sols est faible allant de 0,16 à 0,21 mS/cm indiquant une faible salinité des sols. Le sol des sites S1 et S2 est modérément calcaire (12,55 et 8,66 %), tandis que celui du site S3 est non calcaire (4,22%). La teneur en matière organique des sols des trois sites est relativement faible (2,56 à 3,37 %) (Tab. 4).

Tableau 4 Caractérisation physico-chimiques des sols des trois sites S1, S2 et S3

	S1	S2	S3
pH	7.84±0.38	8.35±0.11	8.23±0.29
Conductivité mS.m⁻¹	0.16±0.03	0.21±0.01	0.16±0.0
Calcaire (%)	12.55±0.83	8.66±0.23	4.22±0.03
MO %	2.56 ±1.42	2.4±2.38	3.37±1.34

2. Taux de colonisation racinaire

L'observation microscopique des racines de blé prélevées des trois sites S1, S2 et S3 (Medjana, El Hamadia et El Euch), montre la présence des structures fongiques spécifiques des CMA (arbuscules, vésicules et hyphes intra-racinaires). La colonisation racinaire totale a été approximativement 2 fois plus faible dans le site S2 (09,33 %) et 1 fois et demi plus faible dans le site S3 (05,33 %) par comparaison au site S1 (21,33 %). Le taux d'arbuscules dans les racines de blé prélevées dans le site S2 (02,66 %) était significativement faible par comparaison au site S1 (9,77 %). Cependant, les arbuscules étaient absentes dans les racines du blé collectées dans le site S3. La colonisation vésiculaire des racines n'a été remarquée que dans les racines du blé du site S1 avec un pourcentage de 04%. Les hyphes de CMA dans les racines de blé représentent 43,75, 71,43 et 100% du taux de colonisation totale dans les trois sites S1, S2 et S3 respectivement. Aucune différence significative n'a été enregistrée entre les taux d'hyphes dans les trois sites (Fig8.).

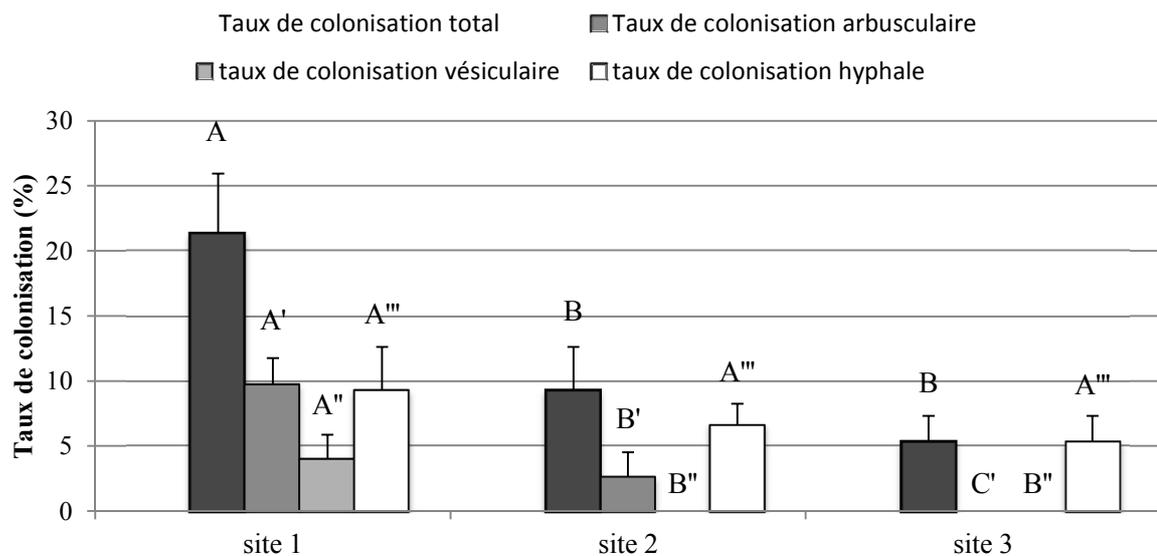


Figure 6 Taux de colonisation totale, arbusculaire, vésiculaire et hyphale des racines de blé dans les trois sites S1, S2 et S3. Les moyennes ont été obtenues à partir de 5 répétitions. Les différentes lettres indiquent des différences significatives entre S1, S2 et S3 selon le test de Tukey ($P < 0,05$)

L'observation microscopique des racines de blé prélevées des trois sites S1, S2 et S3 a montré qu'elles sont colonisées naturellement par des CMA. Les CMA ont une distribution géographique très large (Öpik *et al.*, 2006) et la plupart des espèces végétales du milieu méditerranéen semi-aride sont mycorhizées (Requena *et al.*, 1996 ; Maremmani *et al.*, 2003 ; Ferrol *et al.*, 2004).

Le taux de colonisation totale des racines de blé dans les trois sites est moyennement faible. Hayman (1975) a signalé que les fertilisants et les traitements chimiques peuvent diminuer le nombre de spores des champignons mycorhiziens dans les sols ce qui pourrait expliquer les faibles taux de colonisation observés dans les trois sites. En effet, l'addition de l'engrais phosphaté engendre une diminution des taux d'arbuscules ce qui pourrait justifier les taux faibles calculés dans le site S1 (02,66 %) et S2 (9,77 %). La diminution du taux de mycorhization dans les sols des trois sites pourrait s'expliquer par l'utilisation répétée du phosphore qui limite fortement l'installation de la symbiose mycorhizienne (Grant *et al.*, 2004). L'application des intrants chimiques dans les sols agricoles, la monoculture, le labour et autres pratiques culturales réduisent de façon drastique le développement des CMA (Mosse, 1986 ; Jasper *et al.*, 1991 ; Hamel, 1996 ; Smith et Read, 1997). Un faible taux de vésicules a été observé dans les racines prélevées des trois sites S1, S2 et S3 ce qui peut montrer que cela est une caractéristique physiologique des champignons

autochtones des trois sites.

3. Potentiel mycorhizogène des sols

Le Potentiel mycorhizogène d'un sol représente sa richesse en propagules mycorhiziennes sous forme de spores, de mycélium et de fragments de racines portant des structures mycorhiziennes, susceptibles d'initier chez les plantes la formation d'associations mycorhiziennes (Plenchette *et al.*, 1989). Le potentiel mycorhizogène estimé dans les trois sites S1, S2 et S3, montre que le nombre de propagules a été plus faible dans les sites S2 et S3 par rapport à celui calculé pour le site S1. Dans les sites S2 et S3, le potentiel mycorhizogène a été 20 et 30 fois plus faible par comparaison au site S1 (Tab.5). Nos résultats corroborent ceux de Hamza *et al.*, 2014 qui ont rapporté un taux de 760 propagules/kg de sol dans une parcelle agricole. Des potentiels mycorhizogènes moyennement faibles ont également été rapportés dans d'autres études réalisées sur des sols dégradés (Weissenhorn et Leyva, 1996 ; Cabello, 1997; Gattai *et al.*, 2011). La diminution du potentiel mycorhizogène infectieux des sols serait probablement due à une diminution du pouvoir germinatif des spores de CMA. Le nombre de propagules de CMA estimé dans le sol des sites S2 et S3 explique les taux de mycorhization faible des racines de blé provenant de ces sites.

Tableau 5 Nombre de propagules de CMA dans les trois sites S1, S2 et S3

	Site 1	Site 2	Site 3
P1	3	2	2
P2	2	1	1
P3	2	1	0
Coefficient	0,20	0,09	0,07
facteur P2	1000	100	100
Propagules/30g de sol	200	9,20	6,80
Propagules/1000g de sol	6666,67	306,67	226,67

4. Abondance des spores

Les spores de CMA étaient présentes dans les sols des trois sites S1, S2 et S3. Le site S3 compte le nombre de spores le plus faible, 26 spores/100g de sol, ce qui correspond à 20% du nombre total des spores collectées dans les trois sites. Le nombre de spores augmente pour atteindre 36 spores/100 g de sol dans le site S2. Ce nombre correspond à 28% du nombre total des spores isolées des sites S1, S2 et S3. Le nombre de spores isolées du site S1 (66 spores) représente plus de la moitié du nombre total des spores (52%).

Tableau 6 Nombre de spores de CMA isolées dans les sites S1, S2 et S3

	Site 1	Site 2	Site 3
Fraction 1 : 250-200 µm	20	10	4
Fraction 1 : 200-160 µm	18	20	8
Fraction 1 : 160-100 µm	22	6	14
Fraction 1 : 100-50 µm	6	0	0
Total (Nombre de spores /100g de sol)	66	36	26
Pourcentage/nombre total des spores isolées (%)	52	28	20

Les champs agricoles sont pauvres en CMA, sans doute dû aux pratiques culturales qui modifient la diversité et diminuent la quantité des propagules mycorhiziennes (Fortin *et al.*, 2008). L'abondance des spores dans les sols de site S1 est nettement supérieure à celle dans le sol de S2 et S3. Nicolson (1960) rapporte que les facteurs qui affectent la distribution des CMA sont : l'espèce végétale, le degré de stabilité du sol, la quantité de matière organique et l'activité microbiologique. Ces paramètres physico-chimiques sont essentiels dans la répartition et l'abondance des champignons mycorhiziens et pourraient être la cause des variabilités enregistrées dans les trois sites. L'intensité d'exploitation des sols agricoles a également une grande influence sur les communautés de CMA indigènes. Une exploitation intensive entraîne une diminution du nombre d'espèces de CMA et on trouve plus d'espèces de CMA dans les sols cultivés pas ou peu travaillés que dans ceux qui le sont fréquemment (Oehl *et al.* 2011). En effet, les sols dégradés montrent toujours de faibles densités en propagules mycorhiziennes indigènes (Sieverding, 1991).

4.1. Aspects morphologiques des spores isolées des trois sites S1, S2 et S3

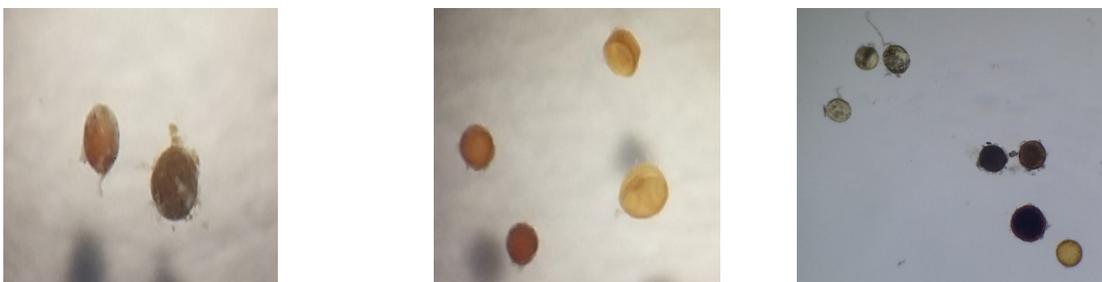
4.1.1. Spores isolées du site de Medjana : site S1



4.1.2. Spores isolées du site d'El Hamadia : site S2



4.1.3. Spores isolées du site d'El Euch : site S3



CONCLUSION

Conclusion

Cette étude a été consacrée à l'étude du statut mycorhizien du blé dur dans trois sites, à savoir Medjana, El Hamadia et El Euche situés dans les zones nord, intermédiaire et sud de wilaya de Bordj Bou Arreridj. Pour cela, des prélèvements de racines de blé cultivé dans les trois sites ont été effectués pour évaluer leur taux de colonisation par les champignons mycorhiziens à arbuscules. Afin d'estimer le potentiel des sols des trois sites à générer des associations mycorhiziennes, nous avons déterminé la richesse des sols en propagules mycorhiziennes en utilisant la méthode du nombre le plus probable PMN. De plus, nous avons évalué l'abondance des spores de CMA dans les trois sites d'étude. Parallèlement à ces investigations des analyses physico-chimiques concernant le pH, la conductivité électrique, la teneur en matière organique ainsi que la teneur en calcaire total ont été réalisées.

Les résultats des analyses physico-chimiques montrent que les sols des trois sites agricoles Medjana (S1), El Hamadia (S2) et El Euche (S3) se caractérisent par un pH faiblement alcalin, par des taux de salinité et de calcaire et une teneur en matière organique relativement faibles.

Les résultats obtenus montrent également que les racines de blé provenant des trois sites étaient colonisées par les CMA. Le taux de mycorhization des racines de blé cultivé dans le site de Medjana (S1) est significativement plus élevé par comparaison à ceux du blé des sites El Hamadia (S2) et El Euche (S3).

L'estimation du potentiel mycorhizogène dans les trois sites S1, S2 et S3, montre que le nombre de propagules a été plus faible dans les sites S2 et S3 par rapport à celui calculé pour le site S1.

Les résultats relatifs à l'abondance des spores de CMA dans les sites d'étude montrent que le site S1 compte le nombre de spores le plus élevé. Plus de la moitié du nombre total des spores collectées dans les trois sites ont été isolées du site S1.

En perspective de cette étude, il serait intéressant d'identifier les espèces de CMA présents dans nos sites d'étude et les utiliser pour produire des inocula indigènes. L'apport d'un inoculum indigène permet de restaurer un potentiel mycorhizogène acceptable dans les

sols et ainsi assurer un meilleur approvisionnement en eau et en éléments minéraux et une meilleure protection contre les différents stress biotiques et abiotiques.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

A

- Abeledo L. G., Savin R., Gustavo A. et Slafer. (2008). Wheat productivity in the Mediterranean Ebro Valley: Analyzing the gap between attainable and potential yield with a simulation model. *European journal of Agronomy*. 28. 541-550p
- Akiyama, K., Matsuzaki, K., & Hayashi, H. (2005). Plant sesquiterpenes induce hyphal branching in arbuscular mycorrhizal fungi. *Nature*. 435, 824–827.
- Akiyama, K., & Hayashi, H. (2007). Strigolactones: Chemical signals for fungal symbionts and parasitic weeds in plant roots. *Annals of Botany*. 97, 925.
- Ammar, K., Lage, J., Villegas, D., Crossa, J., Hernandez, E., Alvarado, G., (2006). Association among durum wheat international testing sites and trends in yield progress over the last twenty two years. International symposium on wheat yield potential. *Cd. Obregón, Sonora, Mexico*, March 20-24th, pp: 19-20 .
- Alexander, M. (1965). Most probable number for microbial populations. In: *Methodes of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties.*, (Midson: American Society of Agronomy), pp. 1467–1472.

B

- Bajji M. 1999. Étude des mécanismes de résistance au stress hydrique chez le blé dur : caractérisation de cultivars différant par leurs niveaux de résistance à la sécheresse et de variants somaclonaux sélectionnés *In vitro*. Thèse de doctorat. Univ. Louvain.
- Bartolome-Esteban, H., & Schenck, N.C. (1994). Spore germination and hyphal growth of arbuscular mycorrhizal fungi in relation to soil aluminum saturation. *Mycologia*. 86, 217–226.
- Bâ A., Guisson T., Duponnois R., Planchette C., Sacko O., Sidibé D., Sylla K., Windou B., (2001). Mycorrhization contrôlée et fertilisation phosphatée: Applications à la domestication du jujubier. *Fruits*, 56(4): 261-269

- Barea J.M. y Honrubia M., 1993. Micorrizas y revegetación. Ecosistemas, 4 : 46-47.
- Bothe H, Klingner A, Kaldorf M, Schmitz O, Esch H, Hundeshagen B, Kernebeck B (1994), Biochemical approaches to the study of plant-fungal interactions in arbuscular mycorrhiza Institut, Universität zu Köln, Gyrhofstr. 15, D-50923 Köln (Germany)
- Boulard, B.(1968). les mycorhizes. Masson et Cie, Editeurs. Paris. 135p
- Boullard B., (1968). Guerre et paix dans le règne végétal. Edition marketing, p. 336.
- Burrows R. L., Pflieger F. L., 2002. Arbuscular mycorrhizal fungi respond to increasing plant diversity. Can. J. Bot., 80: 120-130.
- Burgess, T., Dell, B., & Malajczuk, N. (1994). Variation in mycorrhizal development and growth stimulation by 20 *Pisolithus* isolates inoculated on to *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. New Phytologist. 127, 731–739.

C

- Caravaca F., Barea J.M., Figueroa D. and Roldán A., 2002. Assessing the effectiveness of mycorrhizal inoculation and soil compost addition for enhancing reforestation with *Olea europaea* subsp. *sylvestris* through changes in soil biological and physical parameters. Applied Soil Ecology, 20 : 107-118
- Cardoso I.M., Kuyper T.W., 2006. Mycorrhizas and tropical soil fertility. Agri. Ecosy. Envir., 116: 72-84.
- Chellali B. 2007. Marché mondial des céréales: L'Algérie assure sa sécurité alimentaire.
- Clerget, Y. (2011) Biodiversité des céréales Origine et évolution. In La biodiversité des céréales et leur utilisation par l'homme. Société d'Histoire Naturelle du Pays de Montbéliard. Extrait de la vidéoconférence du Service éducatif du Muséum Cuvier de la Ville de Montbéliard « La biodiversité des céréales et leur utilisation par l'homme » publié dans le bulletin 2011 de la Société d'Histoire Naturelle du Pays de Montbéliard. 1-16 p

D

- Daniels B., Trappe J. M., 2001. Factors affecting spore germination of the vesicular-arbuscular fungus, *Glomus epigaeus*. *Mycologia*, 72:457–471.
- Dalpé Y., de Souza F. A., Declerck S., 2005a. Life Cycle of *Glomus* Species in Monoxenic Culture. In : In Vitro Culture of Mycorrhizas. Eds. Declerck S., Strullu D.-G., Fortin A. *Soil Biol.*, 4:49-71
- Davies Ft, Potter Jr, Linderman RG., 1992, Drought resistance of mycorrhizal pepper plants independent of leaf P concentration-response in gas exchange and water relations. *Physiologia Plantarum*, 87: 45-53.
- Derelle D. (2012) Effets des associations de plantes sur la symbiose mychorizienne et réponse spécifique des plantes à la mychorization. Alliances au pays des racines. 14ème Colloque scientifique et journées à thème. Société Nationale d’Horticulture de France. 25 mai 2012. Paris, pp 17–19
- Dell, B., Malajczuk, N., Bougher, N.L., & Thomson, G. (1994). Development and function of Pisolithus and Scleroderma ectomycorrhizas formed *in vivo* with Allocasuarina, Casuarina and Eucalyptus. *Mycorrhiza*. 5,129–138.
- Dianda, M. 1991. Comparaison des effets de champignons V.A. introduits et indigènes associés ou non à Bradyrhizobium, sur la la croissance d’Acacia albida. *Physiologie des arbres et arbustes en zones arides et semi- arides*. John Libbey Eurotext (Paris): 263-269.
- Duponnois R, Ramanankierana H, Hafidi M, Baohanta R, Baudoin E, Thioulouse J, Sanguin H, Bâ A, Galiana A, Bally R, Lebrun M, Prin Y. 2013. Des ressources végétales endémiques pour optimiser durablement les opérations de réhabilitation du couvert forestier en milieu méditerranéen et tropical : exemple des plantes facilitatrices vectrices de propagation des champignons mycorrhiziens *Comptes rendus biologies* 336(5-6):265-272

F

- Ferrol N, Calvente R, Cano C, Barea JM, Azcón-Aguilar C. 2004.
- FEILLET P. ,2000. Le grain de blé , composition et utilisation. Edition INRA, paris : 23-25pp

- Felliet, P. (2000). Le grain de blé. Composition et utilisation. Ed. INRA. Paris. p. 58-98.
- FORTIN, J.A. et al. (2008) *Les mycorhizes : la nouvelle révolution verte*. Québec, Éditions MultiMondes, 131 p
- Fortin, J.A., Plenchette, C. et Piché, Y. 2008. Les mycorhizes: la nouvelle révolution verte. MultiMondes. Quebec (Canada). 138 p.
- FORTIN, J.A. et al. (2015) *Les mycorhizes : l'essor de la nouvelle révolution verte, 2e édition*. Québec, Éditions MultiMondes, 163 p.
- Fulton, S. M. 2011. Mycorrhizal Fungi: Soil, Agriculture and Environmental Implications. Nova Science Publishers. New York (USA). 261p
Analysing arbuscular mycorrhizal fungal diversity in shrub-associated resource islands from a desertification threatened semiarid Mediterranean ecosystem. *Appl Soil Ecol* 25: 123-133.

G

- GARBAYE, J. (2013) *La symbiose mycorhizienne : Une association entre les plantes et les champignons*. Paris, Editions Quae, 280 p.
- Gate, P. (1995) .Ecophysiologie du blé. Ed. ITCF. Technique et Documentat ion. *Lavoisier*. Paris. p.419-425.
- Gerdemann J. W., Trappe J. M. 1974. The Endogonaceae in the Pacific Northwest. *Myc. Memoir.*, 5: 1-76.
- Goss M. G., de Vare nnes A., 2002. Soil disturbance reduces the efficacy of mycorrhizal associations for early soybean growth and N₂ fixation. *Soil Biol. Bioch.*, 34: 1167-1173.

- Giovannetti M. 1985. Seasonal variations of vesicular-arbuscular mycorrhizae and Endogonaceous spores in a maritime sand dune. *Trans. Br. Mycol. Soc.* 84: 485-500.
- Goslig P., Hodge A., Goodlass G., Bending G. D., 2006. Arbuscular mycorrhizal fungi and organic farming. *Agricult. Ecosyst. Env.*,113: 17-35.
- Godfrey R. M., 1957. Studies of British species of Endogone. I. Morphology and taxonomy. *Trans. Br. Mycol. Soc.* , 40 : 117-135.
- Grant C, Bittman S, Montreal M, Plenchette, C, Morel C. 2004. Soil and fertilizer phosphorus: Effects on plant P supply and mycorrhizal development. *Can. J. Plant Sci.* 85: 3–14

H

- Handley, L.L., Daft, M.J., Wilson, J., Scrimgeour, C.M., Ingleby, K. et Sattar, M.A. 1993. Effects of the ecto- and VA-mycorrhizal fungi *Hydnagium carneum* and *Glomus clarum* on the $\delta^{15}N$ and $\delta^{13}C$ values of *Eucalyptus globulus* and *Ricinus communis*. *Plant, Cell and Environment*, 16 : 375-382.
- Harrison, M.J. (2012). Cellular programs for arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Current Opinion in Plant Biology*. 15, 691–698.
- Hatimi A, Tahrouch S. 2007. Caractérisation chimique, botanique et micro biologique du sol des dunes littorales du Souss-Massa. *Biomatec Echo* 2(5):85-97.
- Hayman DS. 1970. Endogone spores numbers in soil and vesicular-arbuscular mycorrhiza in wheat as influenced by season and soil treatments. *Trans. Br. Mycol.*

Soc 54(1): 53-63. 49

- Hayman D.S. 1975. The occurrence of mycorrhiza in crops as affected by soil fertility.
In: F.E. Sanders, B. Mosse and P.B. Tinker (Editors), *Endomycorrhizas*. Academic Press, London. 495-509 pp.
- Helgason T., Maryswathe J.W., Denison J., Wilson P., Young J.P.W., Fitter A. H., 2002. Selectivity and functional diversity in arbuscular mycorrhizas of occurrence fungi and plant from temperate deciduous woodland. *J. Ecol.*, 90:371-384.
- Helgason T. and Fitter A. 2005. The ecology and evolution of the arbuscular mycorrhizal fungi. *Mycologist*. 19: 96–101
- Hijri M., Sykorova Z., Oehl F., Ineichen K., Mader P., Wiemken A., Redecker D., 2006. Communities of arbuscular mycorrhizal fungi in arable soils are not necessarily low in diversity. *Mol. Ecol.*, 15:2277-2289.

I

- (International Culture Collection of (Vesicular) Arbuscular Mycorrhizal Fungi: <http://invam.caf.wvu.edu/>) et celui créé par Janusz Blaszowski (www.agro.ar.szczecin.pl).

J

- Javot H, Pumplin N, Harrison M. 2007. Phosphate in the arbuscular mycorrhizal symbiosis: transport properties and regulatory roles. *Plant, Cell and Environment* .30: 310–322

K

- Koske, R.E. (1981). Labyrinthula inside the spores of a vesicular: arbuscular mycorrhizal fungus. *Mycologia*.73, 1175–1180.
- Kantety, R.V., Diab, A., Sorrells, M.E., (2005). Contribution à la mise en place d'une approche intégrée de lutte contre la sécheresse chez le blé dur au Maroc In: Conxita,
- Koomen, I., McGram, S.P., & Giller, K.E. (1990). Mycorrhizal infection of clover is delayed in soils contaminated with heavy metals from past sewage sludge applications. *Soil Biology and Biochemistry*.22, 871–873.

L

- Laberche, J.C. (2004) .La nutrition de la plante In. *Biologie Végétale*.Ed.Dunod. Paris. p.154 -163.
- Le Tacon F., Le Tacon T., Mauron V., Rousseau Y., Backer M., Bouchard D., (1999). Fertilisation raisonnée et mycorrhize. 4 ème rencontre de la fertilisation raisonnée. Blois, novembre- décembre 1999, pp. 211-222.
- Larbi, A., Mekliche, A., Abed, R., Badis, M. (1998). Effet du déficit hydrique sur la production de deux variétés de blé dur (*Triticum turgidum* L. var. durum) en région semi-aride. *CIHEAM - Options Méditerranéennes* 295-297
- Logi, C., Sbrana, C., & Giovannetti, M. (1998). Cellular events involved in survival of individual arbuscular mycorrhizal symbionts growing in the absence of the host. *Applied Environmental Microbiology*. 64, 3473–3479.

M

- Maremmani A, Bedini S, Matošević I, Tomei PE, Giovannetti M. 2003.Type of mycorrhizal associations in two coastal nature reserves of the Mediterranean basin.*Mycorrhiza* 13: 33-40.
- Mikola P., 1988. Ectendomycorrhiza of conifers.*Silvia fennica* 22 : 19-27

- Morton J.B., Benny G.L., 1990. Revised classification of arbuscular mycorrhizal fungi (Zygonycetes): A New order, Glomales, Two New suborders, Glomineae and Gigasporineae, with an emendation of Glomaceae. *Mycotaxon*, 37: 471-491.
- Mosse B. 1959. The regular germination of resting spores and some observations on the growth requirements of an *Endogone* sp. causing vesicular-arbuscular mycorrhiza. *Trans. Br. Mycol. Soc.*, 42: 273-286.
- Mosse B., Bowen G. D. 1968. A key to the recognition of some *Endogone* spore types. *Trans. Br. Mycol. Soc.* 51, 469-483.
- Mosse B. 1970. Honey-coloured, sessile *Endogone* spores. I. Life history. *Arch. Microbiol.*, 70: 167-175.
- Morton J. B., Redecker D. 2001. Two families of Glomales, Archaeosporaceae and Paraglomaceae, with two new genera *Archaeospora* and *Paraglomus*, based on concordant molecular and morphological characters. *Mycologia* 93: 181–195.
- Morton J. B., Redecker D. 2002. Two families of Glomales, Archaeosporaceae and Paraglomaceae, with two new genera *Archaeospora* and *Paraglomus*, based on concordant molecular and morphological characters. *Mycologia* 93: 181–195.
- Mummey D.L., Rillig M.C., Holben W.E., 2005. Neighboring plant influences on arbuscular mycorrhizal fungal communities composition as assessed by T-RFLP analyses. *Plant Soil*, 271: 83-90.

N

- Nicolson TH. 1960. Mycorrhiza in the gramineae. II. Development in different habitats, particularly sand dunes. *Trans. Br. Mycol. Soc* 43(1):132-145.

O

- 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. *Appl. Environ. Microbiol.*,69:2816–2824.
- Oehl F., Sieverding E., 2004. *Pacispora*, a new vesicular arbuscular mycorrhizal fungal genus in the Glomeromycetes. *J. Appl. Bot.* 78, 72-82.
- Oehl F., Sieverding E., Ineichen K., Ris E-A., Boller T., Wiemken A., 2005. Community structure of arbuscular mycorrhizal fungi at different soil depths in extensively and intensively managed agroecosystems. *New Phytol.*,165:273–283.
- Oehl F., Jansa J., Ineichen K., Mäder P. & van der Heijden M., (2011). Champignons mycorrhiziens arbusculaires, bioindicateurs dans les sols agricoles suisses. *Recherche Agronomique Suisse* 2, (7–8), 304–311.
- Öpik M, Moora M, Liira J, Zobel M. 2006. Composition of root colonizing arbuscular mycorrhizal fungal communities in different ecosystems around the globe. *Journal of Ecology* 94: 778-790.

P

- Pawlowska, T.E., & Charvat, I. (2004). Heavy-metal stress and developmental patterns of arbuscular mycorrhizal fungi. *Applied and Environmental Microbiology*.70, 6643–6649.
- Plenchette C., Fortin J.A., Furlan V.(1983). Growth responses of several plant species to mycorrhizae in a soil of moderate P-fertility. Part I. Mycorrhizal dependency under field conditions.*Plant Soil*, 70:199–209.
- Phillips, J.M., & Hayman, D.S. (1970). Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of the British Mycological Society.* 55, 158–161.

R

- Readhead J.F., 1980. Mycorrhiza in natural forest. In : *Tropical Mycorrhiza Research* (Mikola P. Eds.), Clarendon Press, Oxford : 127-

- Redecker D., Morton J.B., Bruns T.D., 2000. Ancestral lineages of arbuscular mycorrhizal fungi (Glomales). *Mol. Phyloge. Evol.*, 14(2): 276-284
- Requena N, Jeffries P, Barea JM. 1996. Assessment of natural mycorrhizal potential in a desertified semiarid ecosystem. *Appl. Environ. Microbiol* 62: 842-847.
- Rorat, T. (2006). Plant dehydrins tissue location, structure and function. *Cellular & molecular biology letters. Institute of plant genetics.* 11(4):536-556
- ROY-BOLDUC, A. AND HIJRI, M., 2010. The Use of Mycorrhizae to Enhance Phosphorus Uptake: A Way Out The Phosphorus Crisis. *Journal of biofertilizers and biopesticides*, vol.2, n°1, p.doi: 10.4172/2155-6202.1000104.
- Rillig M.C., 2004. Arbuscular mycorrhizae and terrestrial ecosystem processes. *Ecol. Lett.*, 7: 740- 754

S

- Schüßler A., Schwarzott D., Walker C., 2001. A new fungal phylum, the *Glomeromycota*: phylogeny and evolution. *Mycol. Res.* 105:1413–1421.
- Schenk N.C. and Perez Y., 1987. Manual for the identification of VA Mycorrhizal fungi. First Edition INVAM.
- Schenck, N.C., & Perez, Y. (1989). Manual for the Identification of Va Mycorrhizal Fungi Gainesville, USA, Synergistic Publications.
- Shetty, K.G., Banks, M.K., Hetrick, B.A., & Schwab, A.P. (1994). Biological characterization of a southeast Kansas mining site. *Water,*

Air & Soil Pollution. 78, 169–177.

- Slama A., Ben Salem M., Ben Naceur M. et Zid E. D. 2005. Les céréales en Tunisie : production, effet de la sécheresse et mécanismes de résistance. *Sécheresse* (16) 3 :225-9.
- Smith TF. 1980. The effect of saison and crop relation with abundance of spores of vesicular- arbuscular(VA) mycorrhizal endophytes. *Plant and soil* 57: 475-479.
- Smith, S.E et Read, D.J. 2008. *Mycorrhizal symbiosis*. 3e ed. New-York : Academic press is an imprint of Elsevier. 507p.
- SMITH S.E, READ D.J.,1997, *Mycorrhizal symbiosis*. Second edition. Academic Press ; Harcourt Brace and Compan y Publishers, 605p.
- SUBRAMANIAN KS, CHAREST C., 1997, Nutritional, growth, and reproductive responses of maize (*Zea mays* L.) to vesicular mycorrhizal inoculation during and after stress at tasseling. *Mycorrhiza*, 7: 23-25.
- Sutton JC, Barron GL. 1972. Population dynamics of *Endogone* spores in soil. *Can. J. Bot.* 50: 1909-1914.
- Strullu, D.G. 1991. *Les mycorhizes des arbres et plantes cultivées*. Collection Tec. & Doc., Lavoisier, Paris, 250 pages
- Sieverding E., 1991. *Vesicular-arbuscular mycorrhiza management in tropical agrosystems*. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ). Eschborn, Germany, 1991, 371 p.

W

- Walker C., Sanders F. E. 1986. Taxonomic concepts in the Endogonaceae: III. The separation of *Scutellospora* gen. nov. from *Gigaspora* Gerd. & Trappe. *Mycotaxon*, 27 :169-182.
- Walker C., Trappe J. M., 1993. Names and epithets in the Glomales and Endogonales. *Mycol. Res.* ,97: 339–344.

- William G. *Hopkins*. Translated by, Serge Rambour, Charles-Marie (2003) Evrard. Publisher, De Boeck Supérieur.

Z

- Zycha H. 1935. Mucorineae. *Kryptogamenfl. Mark Brandenburg* 6a, Leipzig, 264 p.

