

**Republique Algerienne Democratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Université de Blida -1-**  
**Faculté des Sciences de la Nature et de la vie**  
**Département de Biotechnologie Agro-Ecologie**



**Mémoire de fin d'étude**  
**Présenté pour l'obtention du Diplôme de Master Académique**  
**Option : Biotechnologie Microbienne**

## **Valorisation des Mycorhizes en Biotechnologie Végétale**

**Réalisé par :**

**Elhouari Bouchra**

**Zitoun Kamar**

**Setenu le : 04/ 07/ 20222**

**Devant le jury composé de :**

**Présidente : Mme Benkorteby H.      M.A.A      univ Blida -1-**

**Examinatrice : Mme Mekhaldi D.      Docteur      univ Blida-1-**

**Promotrice : Mme bensaïd F.      M.A.A      univ Bida-1-**

**Année universitaire : 2021 / 2022**

# Remerciement

*Tous d'abord nous tenons à remercier le bon **Dieu** tout puissant et miséricordieux de nous avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.*

*Nous exprimons nos profondes gratitude et respectueuses reconnaissances à notre encadrant **M<sup>me</sup> Bensaid** pour son encadrement, conseils et sacrifices afin de donner le meilleur et pour son suivi durant la période de préparation de notre mémoire d'afin d'étude.*

*Nos remerciements vont aux membres du jury **M<sup>me</sup> Benkorteby** et **M<sup>me</sup> Mekhaldi** qui m'ont fait l'honneur d'accepter de jurer notre travail.*

*Nous adressons nos sincère remerciements à tous les professeurs surtout **M<sup>me</sup> Krimi Zohilkha** et **Mme Tafifat** qui par leurs conseils et leurs efforts durant tous les années passées nous sommes là, vraiment un grand remerciement pour leurs qualité d'enseignement qui nous a été dispensé.*

# Dédicace

*En témoignage d'amour et d'affection, je dédie ce modeste travail avec une grande fierté à tous ceux qui me sont chers :*

*\*Ma très chère mère **Zahra**, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie.*

*\* Mon très cher père **Rachid**, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Que Dieu vous protège et que la réussite soit toujours à ma portée pour que je suis puisse vous combler de bonheur.*

*\*Ma copine **Nour elhouda** et ma compagne de, c'est bien que tu sois dans ma vie, et félicitation pour sa réussite aussi.*

*\* Mes douces sœurs **Elwerd** et **Sara** et **Nassima** et ma chère **Rania** la femme de mon frère et son fils (**youcef**) et aussi ma chère cousine **Souhila** puisse Dieu vous donne santé, bonheur et réussite. Merci pour tous ce que tu me donne.*

*\* Ma cher binôme **Bouchra** pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet. Dieu vous protège.*

*Sans oublier le binôme **Fella** et **Zineb** merci pour tout et pour votre gentillesse, vous être meilleurs équipe.*

**Kamare**

# Dédicace

*En témoignage d'amour et d'affection, je dédie ce modeste travail avec une grande fierté à tous ceux qui me sont chers :*

*\*Ma très chère mère **Naima**, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie.*

*\* Mon très cher père **Mahieddine**, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Que Dieu vous protège et que la réussite soit toujours à ma portée pour que je suis puisse vous combler de bonheur.*

*\* Mes douces sœurs **Nour elhouda** et **Khadidja***

*\* Mes cher frères **Mohammed amine** et **Salah Edinne***

*\* Ma chère binôme **Kamar** pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet. Dieu vous protège.*

*Sans oublier le binôme **Fella** et **Zineb** merci pour tout et pour votre gentillesse, vous être meilleurs équipe.*

*A tous mes amies.*

*A tous mes professeurs, à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.*

**Bouchra**

# Valorisation des mycorhizes en biotechnologie végétale

## Résumé

L'emploi abusif des formulations chimiques dans le système de gestion des plantes abouti à la pollution de l'environnement d'une manière générale et particulièrement du sol, sans omettre les risques de phytotoxicité. Les techniques microbiologiques, reposant sur l'exploitation des potentialités antagonistes des microorganismes, deviennent une alternative réelle pour l'augmentation de rendements.

Actuellement, plusieurs travaux ont montré l'effet bénéfique des mycorhizes en biotechnologie végétale. Les champignons mycorhiziens sont des champignons rhizosphériques ayant une relation symbiotique avec les racines des plantes, ces mycorhizes peuvent protéger les plantes directement ou indirectement à travers plusieurs mécanismes d'action, comme biorégulateurs qui modifient le métabolisme de la plante et des bioprotecteurs qui améliorent la résistance des plantes contre les agents pathogènes et des stress abiotique et biotique du sol.

Les nouvelles biotechnologies basées sur l'utilisation des champignons mycorhiziens à arbuscules ouvrent des alternatives fortes intéressantes en production végétale. La valorisation de ce type de champignons en biotechnologie végétale a été réalisée à travers des bioformulations, principalement, à base de *Glomus intraradices*, sous le nom MyKe Pro.

MyKe Pro est un produit mis sur le marché sous forme poudreux, granulaire ou liquide. Il s'applique en plein champ avec différentes plantes et sur différents types de sols. L'application de ces produits avec la pomme de terre a un impact positif sur la bio-fertilisation, la bio-régulation et la bio-protection des plantes.

**Mots clés** : endomycorhize, biotechnologie végétale, valorisation, Myke Pro, *Glomus intraradices*.

## Valorization of mycorrhizae in plant biotechnology

### Abstract:

The misuse of chemical formulations in the plant management system leads to pollution of the environment in general and particularly of the soil, without forgetting the risks of phytotoxicity. Microbiological techniques, based on exploiting the antagonistic potential of microorganisms, are becoming a real alternative for increasing yields.

Currently, several works have shown the beneficial effect of mycorrhizae in plant biotechnology. Mycorrhizal fungi are rhizospheric fungi having a symbiotic relationship with plant roots, these mycorrhizae can protect plants directly or indirectly through several mechanisms of action, such as bioregulators that modify plant metabolism and bioprotectants that improve plant resistance against pathogens and abiotic and biotic stresses in the soil.

New biotechnologies based on the use of arbuscular mycorrhizal fungi open up very interesting alternatives in plant production. The valorization of this type of fungi in plant biotechnology has been carried out through bioformulation, mainly based on *Glomus intraradices*, under the name MyKe Pro.

MyKe Pro is a product marketed in powder, granular or liquid form. It is applied in the field with different plants and on different types of soil. The application of these products with the potato has a positive impact on bio-fertilization, bio-regulation and bio-protection of plants.

**Keywords:** endomycorrhiza, plant biotechnology, valorization, Myke Pro, *Glomus intraradices*.

## تثمين الفطريات في التكنولوجيا الحيوية النباتية

### ملخص

يؤدي سوء استخدام التركيبات الكيميائية في نظام إدارة النبات إلى تلوث البيئة بشكل عام والتربة بشكل خاص ، دون إغفال مخاطر السمية النباتية. أصبحت التقنيات الميكروبيولوجية ، القائمة على استغلال الإمكانيات المضادة للكائنات الحية الدقيقة ، بديلاً حقيقياً لزيادة الغلات.

في الوقت الحالي، أظهرت العديد من الأعمال التأثير المفيد للجذر الفطري في التكنولوجيا الحيوية النباتية. الفطريات الجذرية الفطرية هي فطريات في الجذور لها علاقة تكافلية مع جذور النباتات ، ويمكن لهذه الفطريات الفطرية حماية النباتات بشكل مباشر أو غير مباشر من خلال العديد من آليات العمل ، مثل المُنظِّمات الحيوية التي تعدل استقلاب النبات والمواد الواقية الحيوية التي تعمل على تحسين مقاومة النبات لمسببات الأمراض والضغوط الحيوية وغير الحيوية في التربة .

تفتح التقنيات الحيوية الجديدة القائمة على استخدام الفطريات الجذرية الشجرية بدائل مثيرة جداً للاهتمام في الإنتاج النباتي. تم إجراء تثمين لهذا النوع من الفطريات في التكنولوجيا الحيوية النباتية من خلال التشكيل الحيوي ، الذي يعتمد

بشكل أساسي على *Glomus interaradices* تحت اسم MyKe Pro ،

MyKe Pro هو منتج يتم تسويقه في شكل مسحوق أو حبيبات أو سائل يتم تطبيقه في الحقل مع نباتات مختلفة.

وأنواع مختلفة من التربة. لتطبيق هذه المنتجات مع البطاطس تأثير إيجابي على الإخصاب الحيوي، والتنظيم الحيوي والحماية الحيوية للنباتات

الكلمات المفتاحية : Endomycorrhizes , التكنولوجيا الحيوية النباتية ، التثمين ، MyKe Pro ، *glomus interaradices*.

# Sommaire

Résumé

Abstract

ملخص

Liste des figures

Liste de tableaux

Liste des abréviations

*Introduction*..... 1

## CHAPITRE 1 GENERALITE SUR LES MYCORHIZES

**1 Historique :**..... 4

**2 Les principaux types de mycorhizes :**..... 6

2.1 Les ectomycorhizes (ECM):..... 6

2.2 Les endomycorhizes:..... 10

2.3 Les ectendomycorhizes: ..... 17

**3 Ecologie de la symbiose mycorhizienne :**..... 17

3.1 Les facteurs biotiques:..... 18

3.2 Les facteurs abiotiques: ..... 18

## CHAPITRE 2 LES MYCORHIZES EN BIOTECHNOLOGIE VEGETALE

**1 Généralités sur la biotechnologie végétale :** ..... 23

**2 Importance des microorganismes dans la biotechnologie agricole :** ..... 24

2.1 Biofertilisants: ..... 24

2.2 Les biopesticides: ..... 26

2.3 Les biostimulants:..... 26

<b>3 Les effets bénéfiques des mycorhizes :</b>	27
3.1 Absorption des éléments nutritifs:	27
3.2 L'absorption de l'eau:	29
3.3 Protection des racines contre les substances toxiques:	29
3.4 L'agrégation des sols:	30
3.5 La protection contre les agents pathogènes :	31
3.6 Activité hormonale:	32
<b>4 Les inoculant mycorhiziens commerciaux :</b>	33

## **CHAPITRE 3 VALORISATION DES MYCORHIZES EN BIOTECHNOLOGIE VEGETALE (CAS MYKE PRO)**

<b>1 Exploitation des champignons mycorhiziens arbusculaires:</b>	36
1.1 Production d'inoculant mycorhiziens:	36
1.2 Les Formes d'inoculum :	38
<b>2 Les bioformulation à base de <i>Glomus intraradices</i> :</b>	41
2.1 Taxonomie de <i>Glomus intraradices</i> :	41
2.2 Importance de <i>Glomus intraradices</i> en biotechnologie végétale :	41
<b>3 Etude d'un produit mycorhizien (cas de MYKE pro) :</b>	42
<b>4 Application de produit Myke pro pomme de terre . L :</b>	46
4.1 Importance de mycorhizes pour la production de la pomme de terre:	47
4.2 La Variété de pomme de terre utilisée :	47
4.3 Etude des régions:	48
4.4 La méthode:	49
4.5 Les conditions:	48
4.6 RÉSULTATS	50

### **Conclusion**

### **Références bibliographies**

## Liste des figures

<b>Figure 1</b>	Représentation schématique des principaux types de mycorhizes	6
<b>Figure 2</b>	Illustration schématique d'une Ectomycorhize en vue éclatée	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<b>Figure 3</b>	Principaux types mycorhiziens représentés sur une coupe transversale de racine	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<b>Figure 4</b>	Fragments de coupe longitudinale pratiquée dans des endomycorhizes	16
<b>Figure 5</b>	Vésicules de <i>Glomus versiformes</i> dans une racine d' <i>Allium porrum</i>	17
<b>Figure 6</b>	Histoire du développement de la biotechnologie	23
<b>Figure 7</b>	L'impact des mycorhizes sur l'absorption des éléments minéraux des plantes	29
<b>Figure 8</b>	La pomme de terre type de variété Gold Rush	50
<b>Figure 9</b>	Le traitement des plantons à été effectué par brumisation	52
<b>Figure 10</b>	Le sillon de pomme de terre	52
<b>Figure 11</b>	L'effet de l'inoculation mycorhizienne sur le rendement total en pomme de terre	54
<b>Figure 12</b>	Résultat de site Rawdon	56
<b>Figure 13</b>	Système racinaire beaucoup plus développé avec Myke Pro	56

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1</b>	Les principales dates de l'histoire de la mycorhizien	5
<b>Tableau2</b>	Principaux genres de champignons formant des endomycorhizes	11
<b>Tableau 3</b>	Quelque produit mycorhizien commerciaux	41
<b>Tableau 4</b>	Quelques produits MyKe Pro de espaces verts et paysagement	43
<b>Tableau 5</b>	Les produit myke pro disponible pour les grand culture /culture spécialisées	45
<b>Tableau 6</b>	les produits des secteurs horticole	46
<b>Tableau 7</b>	Les traitements appliqué	51

## **Liste des abréviations:**

**AM:** champignons mycorhiziens à arbuscules.

**ECM:** les champignons ectomycorhiziens.

**V.A:** les endomycorhizes à vésicules et à arbuscules.

**AMF linéaire:** Association mycorhiziennes qui se propagent principalement par les hyphes intracellulaires dans les racines.

**AMF enroulée:** Association mycorhiziennes qui se propagent principalement par des enroulements hyphaliques.

**CMA:** champignons mycorhiziens à arbuscule.

**VAM:** vesicular arbuscular mycorrhizae.

**AC:** les cellules auxiliaires.

**OCDE:** Organisation de Coopération et de Développement l'Économie.

**OGM:** Organisme Génétiquement Modifiées.

**ADN:** l'Acide Désoxyribonucléiques.

**Mn:** Manganèse.

**P:** Phosphore.

**HAP:**Hydrocarbures aromatiques Polycycliques.

**PTB:** Premier Tech Biotechnologie.

**ANOVA:** l'analyse de la variance (ANalysis Of Variance).

**n.s:** statistiquement significatives

## ***Introduction***

Depuis plusieurs années, le domaine agricole utilise des produits chimiques pour obtenir des rendements plus élevés. Malheureusement, ces formulations de synthèses ont un effet négatif sur l'environnement (sols, l'eau et l'air) et constituent une menace sérieuse pour la sécurité alimentaire. Certains produits chimiques sont susceptibles d'être une source d'inflammation, ou d'explosion avec des conséquences graves pour l'homme (les allergies, cancer, intoxication chronique).

La recherche des alternatives aux produits chimiques s'impose alors afin de garantir la durabilité de l'agriculture et d'assurer la fertilité des sols. Les techniques biologiques peuvent devenir une alternative pour renforcer les procédures de lutte. La rotation des cultures, la transgénèse, l'utilisation des compostes et les potentialités des microorganismes antagoniste et les champignons mycorhiziens sont parmi les méthodes biologiques les plus prometteuses (Alfred *et al*, 2013).

La mycorhization est une relation symbiotique entre les champignons et les racines des plantes à travers laquelle ils échangent des matériaux. La symbiose est une sorte de relation "mutuellement bénéfique" entre les organismes, c'est-à-dire que les deux organismes bénéficient de la relation. Il existe plusieurs types de mycorhizes, mais les plus étudiés sont les ectomycorhizes, les endomycorhizes et ectendomycorhizes. Si le champignon se développe à l'intérieur des cellules racinaires, on l'appelle endomycorhizes. Ce phénomène est extrêmement fréquent : environ 80 % des plantes vasculaires sont associées à des endomycorhizes. Dans le cas des ectomycorhizes, les hyphes du champignon ne rentrent pas dans les cellules racinaires, environ 10% des plantes créent ce type d'association. Et concernant les ectendomycorhizes sont des formes intermédiaires, qui présentent à la fois des caractères ectomycorhiziens et endomycorhiziens (Nultsch, 1998).

La plupart des espèces végétales ne peuvent pas se développer normalement sans la symbiote fongique dont elles dépendent fortement (Janos, 1980 ; Hetrick, 1984 ; Brundrett, 1991 ; Gobat *et al*, 2003). Le champignon va coloniser les racines de la plante grâce à des hyphes, de fines fibres capables d'explorer un grand volume de sol, ce qui lui a permis de mieux absorber

l'eau et les nutriments tels que le phosphore (Hopkins, 2003; Finlay, 2004; Helgason et Fitter, 2005; Plenchette *et al.*, 2005). La protection des plantes et de ces racines contre les pathogènes et les substances toxiques, la production des substances stimulant la croissance des plantes telles que les hormones et les enzymes ont également exercés par ce genre de champignons. Ces avantages sont limités par des facteurs de nature écologique, biotique et abiotique.

La biotechnologie végétale a un grand succès dans l'amélioration de la production et l'augmentation de rendements. Les champignons mycorhiziennes peuvent être utilisés comme des bio-engrais, biostimulants et même comme des fertilisants ceci permettrait de diminuer les apports d'engrais chimiques de 15 à 25 %, de réduire les coûts d'entretien et d'exploitation des sols. Par conséquent, la mycorhization est un outil biotechnologique potentiel dans la restauration des écosystèmes fragiles (Bratek *et al.*, 2002; Quoreshi, 2008; Barea *et al.*, 2011).

Notre travail porté sur une étude bibliographique synthétique des travaux récents montrent la valorisation des mycorhizes en biotechnologie végétale. Le travail a été réalisé travers trois parties complémentaires. La première partie porte sur des généralités sur les mycorhizes. La deuxième a été consacrée au rôle des mycorhizes en biotechnologie végétale. La troisième à pour objectif d'étudier la valorisation des endomycorhizes à arbuscule en produits bio formulés (cas de MyKe Pro).

# **Chapitre 1**

## **Généralité sur les mycorhizes**

## **GENERALITE SUR LES MYCORHIZES :**

De nombreuses espèces de microorganismes vivent dans le sol aux voisinages des racines des plantes, parmi elles on trouve les champignons mycorhiziens, ils ne sont qu'un cas particulier des champignons de la rhizosphère, qui appartiennent au règne des mycètes. Les mycorhizes sont des symbioses entre les racines des végétaux et les mycéliums des champignons. Ils sont très répandus dans la nature. On considère qu'elles intéressent 95 % des végétaux (Strullu, 1989).

On appelle des mycorhizes, du grec "mukes", qui signifie champignon et "rhiza," qui veut dire racine (Sahraoui, 2013). Ce sont des unions durables basées sur des échanges réciproques des métabolites entre les racines des végétaux et certains champignons présents dans le sol. Le nouvel organe mixte est formé de tissu de la plante hôte et du champignon mycorhizien (ou symbiote fongique) et chaque partenaire optimise son développement grâce à cette symbiose (Châtaigner et Duponnois, 2017).

### **1 Historique :**

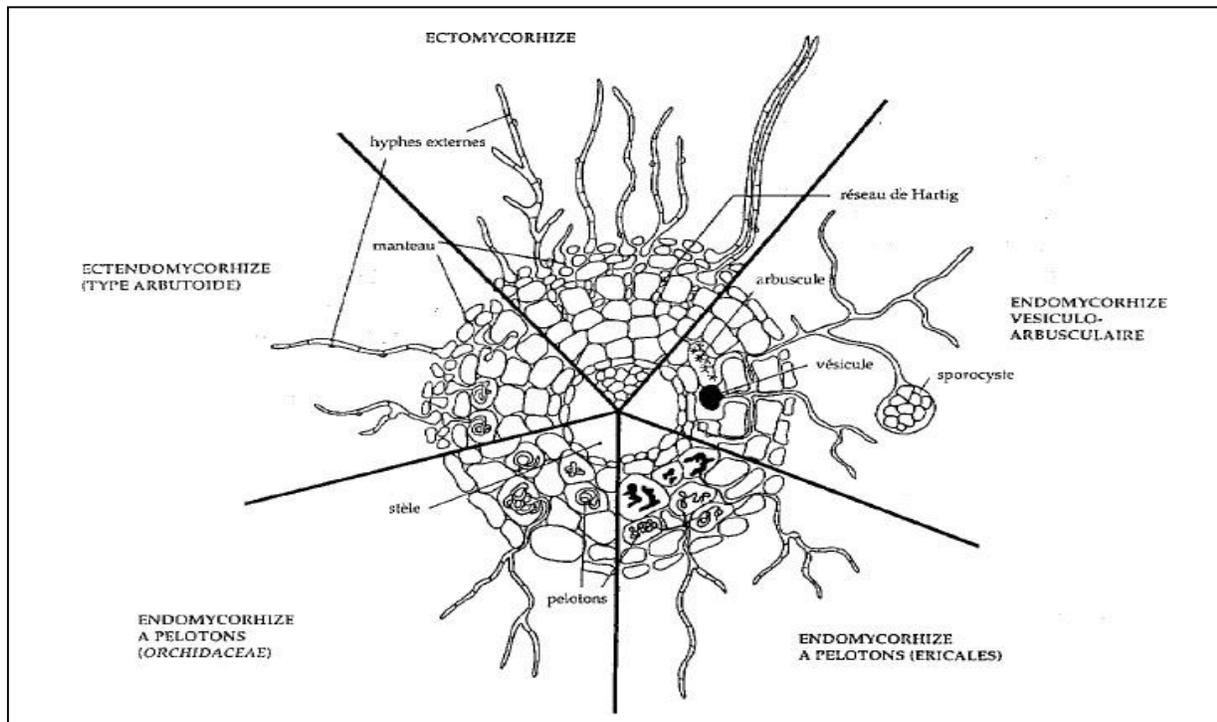
La mycorhize est ancien; Des preuves fossiles du Dévonien (il y a 400 millions d'années) indiquent que les premières plantes terrestres ont formé des associations endophytes avec des champignons mycorhiziens à arbuscule (AM) modernes qui colonisent les bryophytes modernes. Des fossiles de spores de champignons AM ont été trouvés dans des roches ordoviciennes (il y a 460 millions d'années), la période où les premières plantes ont colonisé la terre. Les premières plantes terrestres ressemblaient aux bryophytes modernes, avaient un système racinaire sous-développé et bénéficieraient grandement de la symbiose mycorhizienne (Powell et Klironomos, 2007).les principaux évènements de la découverte des mycorhizes représente dans le tableaux dessous.

**Tableau 1:** Les principales dates de l'histoire de la mycorhization (Ben cherif, 2007 )

Dates	Auteurs	Evénement
1831	Fries	Premières observations d'hyphes à la surface des racines sur <i>Monotorpa</i> .
1844	Les Frères Tulsanes Giuseppe Gibelli	Description du genre <i>Glomus</i> .
1879-1883		Démonstration de la relation entre les mycètes et les plantes supérieures.
1885	Frank Dangeard	Apparition du terme <b>Mycorhize</b> .
1894		Description de <i>Tuber melanosporum</i> avec <i>Quercus pubescens</i> .
1917	Peyronel	Obtention de la notoriété internationale pour les études des mycorhizes.
1932	Gibelli	Démonstration des relations Tubercées/plantes supérieures avec des anatomiques et biologiques.
1936/1937	Hatch	Affirmation de meilleurs croissance et richesse en NPK pour les plants mycorhizés / plants non mycorhizés
1942	Hatch et Preston	
1949	Bjorkman	Plus le sol est pauvre plus il est mycorhizé.
1959	Dominik	La mycorhization favorise l'absorption des éléments minéraux par les racines.
1959	Le Tacon	Première clé analytique pour l'identification des mycorhizes.
1978		première maîtrise de la mycorhization des plantations forestières hors sol.
1990	Morton et Benny	
1995	Bentivenga <i>et al.</i> ,	Apparition de l'ordre des Glomales qui englobe les VAM (CMA). Création de la famille des Gigasporaceae.
1996/1997	Stumer et Morton	Apparition de la famille des Glomaceae
1998	Stumer et Morton	Création de la famille des Caolosporaceae
2000	Morton et Redecker	Apparition de la famille des Archaesporaceae.
2004	Harrier <i>et al</i>	Recherches sur l'organisation du génome des Gloméromycètes.

## 2 Les principaux types de mycorhizes :

La classification des mycorhizes est basée sur le type de champignon associé. On distingue trois groupes principaux d'associations : les ectomycorhizes, les endomycorhizes et les ectendomycorhizes (Béreau *et al.*, 2003) (Figure 1).



**Figure 1 :** Représentation schématique des principaux types de mycorhizes (Selosse et Le Tacon, 2001).

### 2.1 Les ectomycorhizes (ECM):

Les ectomycorhizes (du grec *ektos* ; à l'extérieur), c'est les champignons se développent essentiellement autour de la racine. Il est généralement estimé que 6 000 espèces de plantes terrestres présentent un statut Ectotrophe (Taylor et Alexander, 2005 ; Tedersoo *et al.*, 2010). Ils ne forment des mycorhizes qu'avec les plantes ligneuses, arbres ou arbustes.

La symbiose ectomycorhizienne est une association mutualiste entre les racines fines des plantes et des champignons du sol. Elle se traduit par la formation ECM, organe mixte, et par l'apparition de fructification appelée sporophores visible à proximité de la plante hôte. Ce symbiose ne concerne que 3 % des espèces végétales (Mousain, 1991) mais elle été très étudiée car ces espèces constituent la majorité des ligneux à intérêt économique.

### **2.1.1 Les partenaires:**

#### **2.1.1.1 La plante hôte :**

La symbiose ectomycorhizienne se retrouvent dans les arbres qui poussent dans les régions tempérées et méditerranéennes et boréale, mais elle a été également décrit chez quelques espèces tropicales. Les champignons s'associent essentiellement avec les Dicotylédones et les Gymnospermes (Strullu, 1991), comme une Polygonacée de genre *Polygonum* ou encore une Pyrolacée du genre *Pyrola*. Ce fait à relier à la morphologie et à l'anatomie des racines. Ces deux groupes possèdent des racines primaires de taille limitée et spécialisées dans l'absorption. Des formation secondaires se mettent ensuite en place. Les arbres sont représentés principalement dans les familles ou sous-familles des *Betulaceae*, *Caesalpinioideae*, *Dipterocarpaceae*, *Fagaceae*, *Myrtaceae*, *Papilionoideae* et *Pinaceae*.

#### **2.1.1.2 Les champignons :**

Les ectomycorhizes se forment principalement par des Ascomycètes, des basidiomycètes et des zygomycètes. Ils se localisent à l'extérieur de la cellule sous forme d'un manteau (Selosse et LeTacon, 2001).

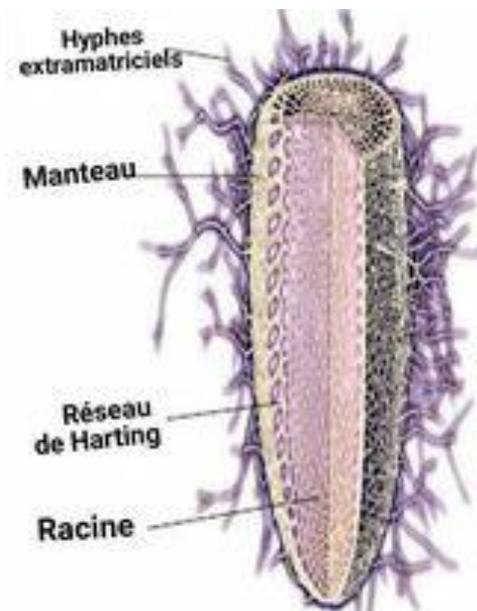
Les Ascomycètes, comme les truffes, forment des carpophores souterrains ou aériens. La hure du Périgord (*Tuber melanosporum*) s'associé généralement aux chênes, aux noisetiers, aux pins et avec plusieurs d'autres arbres. Il existe de nombreuses truffes mycorhiziennes : *Tuber magnatum*, *T. mesentericum*, *T. uncinatum* (Gupta et al., 2000).

Les Basidiomycètes sont représentés par les Agaricales, les Sclérodermatales et les Aphylophorales. Ces genres forment des carpophores au niveau plusieurs arbre à l'exemple du cèpe (*Boletus edulis*), d'oronge rougissante (*Amanita rubescens*) ou de la girolle (*Cantharellus*

*cibarius*). Beaucoup de ces champignons sont soit comestibles (sclérodermies) ou toxiques (entolomes, cortinaires) (Gupta *et al.*, 2000).

### 2.1.1 La morphologie des ectomycorhizes (ECM):

La plante morphologiquement et structurellement apparentée est recouverte d'un manteau fongique appelé maille de Hartig (figure. 02) (Bâ *et al.*, 2011), qui pénètre entre les cellules corticales sans traverser la paroi. Les hyphes pénètrent dans la racine pour former un système intercellulaire complexe dans le cortex appelé réseau "hartig", avec peu ou pas de pénétration cellulaire (Cruyppenninck, 2013). La morphologie racinaire est modifiée par l'infection ectomycorhizienne : l'ectomycorhize est simple, dichotomique, coralloïde, pyramidale ou nodulaire (Selosse, 2000). À partir du manteau du champignon, un réseau ectopique d'hyphes commence, qui examine un grand volume de sol, dépassant la rhizosphère et définissant la mycorrhysphère. Le réseau extra-matrice des hyphes est relié aux sporophores (Bâ *et al.*, 2001).



**Figure 2** : Illustration schématique d'une Ectomycorhize en vue éclatée (Gagné, 2005)

## **2.1.2 Les composantes des ectomycorhizes:**

Les différentes structures des ectomycorhizes sont: un manteau fongique, réseau de Hartig et des hyphes extramatriciels.

### **2.1.2.1 Manteau fongique :**

Cette structure est formée par le mycélium qui s'enroule autour de la racine de la plante. L'épaisseur de ce dernier varie selon les espèces de MEC (Soualmia, 2010). La couleur du manteau et les caractéristiques de surface telles que le manteau lisse, papillaire, ouaté ou épineux sont utilisées pour identifier le composant fongique de l'ectomycorhize. Des caractéristiques telles que l'organisation spatiale et la forme du manteau externe, et la présence de cystides peuvent être déterminées. Ces caractéristiques, ainsi que les motifs qui découlent de l'interaction des hyphes composants qui composent les manteaux intérieur, moyen et extérieur, sont utilisés dans différentes clés et sont utiles pour déterminer les morphotypes présents dans les collections sur le terrain (Peterson *et al.*, 2006).

### **2.1.2.2 Réseau de Hartig :**

Le réseau de Hartig est constitué de tissu fongique épais qui se dépose entre les cellules racinaires et les radicules, assurant ainsi un contact étroit entre les deux partenaires (Egli et Brunner, 2002). La formation du réseau de Hartig s'effectue au contact de la surface des cellules corticales, les hyphes pénètrent entre les cellules corticales vivantes, se détachant des parois cellulaires adjacentes le long de la lame médiale. Les hyphes ne pénètrent pas individuellement, mais forment la partie avant des branches en forme de doigt qui sont maintenues en contact étroit. Cette architecture a été appelée le réseau Hartig, bien qu'il ne s'agisse pas vraiment d'une structure en forme de filet mais d'une couche dense qui entoure plus ou moins complètement les cellules corticales de la racine (Blasius *et al.*, 1986) (Balestrini et Kottke, 2016).

### **2.1.2.3 Les hyphes extramatriciels :**

Les hyphes ectopiques peuvent être droits ou assemblés en cordons linéaires appelés « rhizomorphes » (Soualmia, 2010). Il est clair que le mycélium racinaire supplémentaire peut être un vaste réseau d'éventails mycéliens qui imprègnent le sol et qui peuvent relier les racines d'une même plante et/ou d'autres plantes voisines. Les détails du développement de ces hyphes de la surface du manteau dans le sol sont mal documentés. On sait d'après les ectomycorhizes formées

à partir du genre *Cenococcum* qu'un certain nombre de couches d'hyphes sont nécessaires avant l'initiation du mycélium racinaire dans le manteau. Le réseau mycélien est souvent composé d'hyphes et de rhizomorphes, et chez *Cenococcum* les hyphes sont à parois épaisses et pigmentées. Lorsque des hyphes extraradiculaires se développent, elles peuvent adhérer à des particules de sol et les entourer, ou des particules de sol peuvent adhérer à la longueur d'hyphes individuelles ou de groupes d'hyphes. Les hyphes extraradiculaires de certains champignons se développent autour et en colonies de bactéries, d'excréments de vers de terre, de pollen et de débris organiques dans le sol ; certains sont capables de pénétrer la roche. Certains champignons, en particulier les genres *Hysterangium* et *Gautieria*, forment des "tapis" de mycélium qui lient le sol et les racines fines. Ce mycélium, qui peut être incrusté de cristaux d'oxalate de calcium, constitue une partie importante de la biomasse des sols forestiers (Peterson *et al.*, 2004).

## **2.2 Les endomycorhizes:**

Les endomycorhizes (du grec endon : à l'intérieur) sont connu également sous le nom de mycorhizes endotrophes. Elles sont apparues bien avant les autres types de mycorhizes, sont caractérisées par l'absence de manchon mycélien externe et par la pénétration des hyphes fongiques dans les cellules corticales (Duponnois *et al.*, 2013).

Les endomycorhizes sont des symbiotes obligatoires sans spécificité «absolue» pour l'hôte. La capacité d'une espèce fongique à coloniser la grande majorité des espèces végétales accentue son potentiel de commercialisation et témoigne d'une longue co-évolution (Déziél, 2000).

### **2.2.1 Les partenaires:**

Pratiquement tous les végétaux forment au moins un type d'endomycorhizes, en général des endomycorhizes à vésicules et arbuscules en association avec des zygomycètes. Les orchidées, les Ericacées, les Cistacées et quelque autre familles peuvent s'associés avec les Ascomycètes ou les Basidiomycètes (Strullu, 1989).

#### **2.2.1.1 Les plantes-hôtes :**

Ces mycorhizes sont le groupe le plus souvent recensé, car elles se trouvent sur une vaste gamme taxonomique de plantes de grande importance économique, tant herbacées (les légumineuses, Graminées, les Solanacée) que ligneuses (Strullu, 1989). Le symbiote végétal va

des bryophytes aux angiospermes. Les hyphes aseptisés pénètrent dans les cellules corticales des racines et forment des vésicules et des arbuscules caractéristiques. Le plasmalemme de la cellule hôte invagine et enferme les arbuscules. Les champignons mycorhiziennes à arbuscules (AM) appartiennent à neuf genres : *Gigaspora*, *Scutellospora*, *Glomus*, *Acaulospora*, *Entrophospora*, *Archaeospora*, *Gerdemannia*, *Paraglomus* et *Geosiphon* (Das et Varma 2009).

### 2.2.1.2 Les champignons :

Une liste non exhaustive des champignons formant des endomycorhizes est donnée dans le (tableau 2). Les zygomycètes constituent des endomycorhizes à vésicules et arbuscules. On compte 4 principaux genres : *Acaulospora*, *Gigaspora*, *Glomus* et *sclerocystis* qui se répartissent en plus de 100 espèces décrites. Ces champignons peuvent s'unir à de très nombreuses plantes et ils possèdent une non spécificité remarquable, sans doute en relation avec leurs caractères de symbiose obligatoire. Les Ascomycètes sont surtout associés aux Ericacées, avec la présence de basidiomycètes dans les cellules corticales de racines d'Ericacées a souvent été signalée. Les Orchidées sont principalement associées aux Basidiomycètes.

**Tableau 2:** Principaux genres de champignons formant des endomycorhizes (Strullu, 1989).

ZYGOMYCETES	BASIDIOMYCETES	ASCOMYCETES
<i>Acaulospora</i>	<i>Rhizoctonia</i>	<i>Oidiodendron</i>
<i>Gigaspora</i>	<i>Corticium</i>	<i>Pezizella</i>
<i>Glomus</i>	<i>Ceratabasidium</i>	<i>Pterostylis</i>
<i>Sclerocysts</i>	<i>Ypsilnidium</i>	
	<i>Sinebacina</i>	
	<i>Tuasnella</i>	
	<i>Marasmius</i>	

## **2.2.2 Organisation des Complexes:**

Durrieu (1993), divise les endomycorhizes en deux principaux groupes, les endomycorhizes à septomycètes et les endomycorhizes à vésicules et arbuscules.

### **2.2.2.1 Mycorhizes à pelotons PEL (les endomycorhizes à septomycètes):**

Les endomycorhizes à septomycètes sont divisés en deux types principaux, les endomycorhizes Ericoides et les endomycorhizes.

#### **A. Les endomycorhizes éricoïdes :**

Les mycorhizes éricoïdes (MRE) se rencontrent dans les plantes des landes des Éricacées, des Épacridacées et des Empétraceae qui ont généralement des racines très fineuses avec seulement une ou deux couches de cellules corticales et aucun poil de racine. Les champignons (principalement des ascomycètes avec quelques basidiomycètes) forment une surface libre recouverte d'hyphes qui pénètrent dans les cellules épidermiques pour former des complexes hyphaliques très denses (Read, 1996). Contrairement aux champignons AM et ECM, les endomycorhizes éricoïdes sont écologiquement spécialisés et ne semblent pas coloniser d'autres plantes (Gregory, 2008).

Une caractéristique commune aux plantes qui développent ce type de mycorhize est la formation de racines latérales très spécialisées, les "racines des cheveux". Celles-ci ont un diamètre très étroit, possèdent une anatomie simple, ont une croissance limitée en extension et manquent de croissance secondaire. Chaque racine est constituée d'un étroit cylindre vasculaire, d'une ou deux rangées de cellules corticales (y compris l'endoderme) et d'une couche épidermique de cellules volumineuses. L'association mycorhizienne implique la colonisation des cellules épidermiques par des hyphes fongiques, qui sont réduites par la formation d'un complexe hyphalique ramifié dans chaque cellule colonisée (Peterson *et al.*, 2004).

#### **B. Les endomycorhizes des orchidées :**

Contrairement au type précédent, dans ce type de mycorhizes, la couche externe est indemne, alors que la zone la plus superficielle du parenchyme cortical héberge des filaments en forme de peloton (du mot français pour "petit écheveau rond" dense occupant une part importante du volume cellulaire causant une hypertrophie du noyau (Selosse *et al.*, 2011) (Dearnaley *et al.*,

2016). Il a été démontré qu'un certain nombre de genres de basidiomycètes sont impliqués dans la symbiose, bien que de nombreux rapports sur l'isolement du champignon symbiotique des racines d'orchidées aient placé les symbiotes sous la forme du genre *Rhizoctonia* lorsque le stade parfait n'était pas connu ou que l'isolat n'était pas amené à fructifier en culture. La graine d'orchidée ne germe qu'en présence d'un champignon approprié (Das et Varma, 2009).

### **C. Les endomycorhizes à vésicules et à arbuscules (V.A) :**

Les mycorhizes arbusculaires, appelées aussi mycorhizes vésiculaires et arbusculaires (Smith et Read ,1997), sont des associations symbiotiques mutualistes entre les racines de la plupart des plantes vasculaires et un petit groupe de champignons de la classe de Glomeromycota (Schüßler *et al.*, 2001). Bien qu'il existe une certaine variation structurelle dans cette catégorie, la plupart des mycorhizes à arbuscules sont caractérisées par la présence d'hyphes intraradiculaires (intercellulaires ou intracellulaires), d'arbuscules (hyphes finement ramifiées impliquées dans l'échange de nutriments), de mycélium extraradicaire (hyphes qui relient la racine au sol) et de spores formées dans le mycélium extraradicaire. Certaines espèces de champignons forment également des structures intraradiculaires appelées vésicules (portions élargies d'hyphes qui se remplissent de corps lipidiques, ce qui donne à ce groupe son nom original de mycorhize vésiculaire-arbusculaires (Peterson *et al.*, 2004). Ce sont des membres de Zygomycotina qui sont des biotrophes obligatoires et ne peuvent donc pas être cultivés. Actuellement, le mode de formation des spores et leur structure subcellulaire sont utilisés pour leur classification (Mukerji, 1996; Raina *et al.*, 2000). La morphologie des racines ne subit aucun changement significatif.

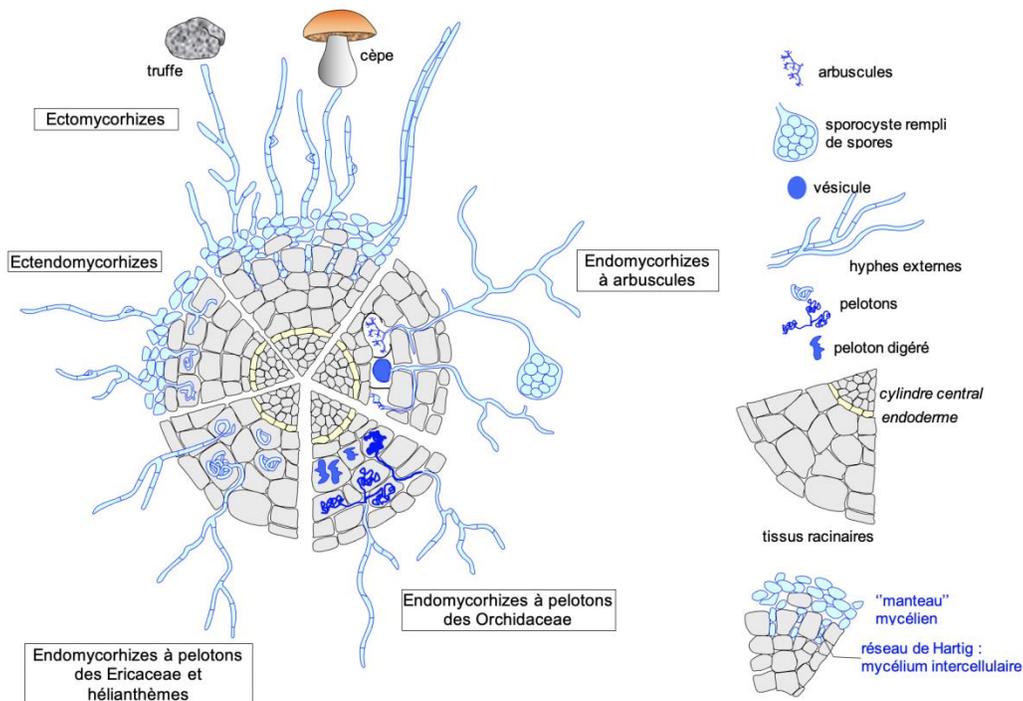
#### **• Le cycle de développement des endomycorhizes à vésicules et à arbuscules (V.A) :**

Les champignons mycorhiziens arbusculaires (AM) établissent d'abord un contact et pénètrent l'épiderme des jeunes racines. Ensuite, les hyphes des champignons AM se répandent dans les tissus racinaires et forment un réseau mycorhizien pour l'échange de nutriments entre la plante et les champignons. Les plantes sécrètent des sucres, des acides organiques et des acides aminés dans la rhizosphère, ce qui déclenche la colonisation des racines par les champignons du sol et leur interaction avec la plante au niveau moléculaire. Dans la plupart des cas, les

endomycorhizes ont à la fois des arbuscules et des vésicules ; c'est pourquoi on les appelle VAM (vesicular arbuscular mycorrhizae) (Parniske, 2008) (Nadeem *et al.*, 2017). Les arbuscules sont formés par des ramifications hyphaliques dichotomiques successives et sont les structures clés de la symbiose, qui sont nécessaires à l'échange de nutriments entre les deux partenaires (Agnolucci *et al.*, 2019).

### 2.2.3 Les différents composants des endomycorhizes:

Les endomycorhizes sont constitués par les pelotons intracellulaires et arbusculaire, les vésicules, les cellules auxiliaires et les spores, ces différents composants présente dans la figure 3 .



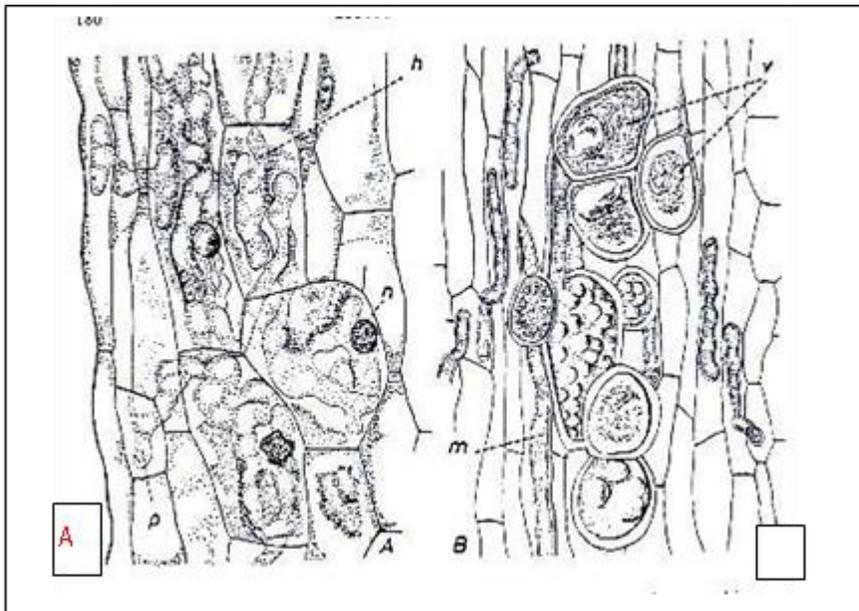
**Figure 3** : Principaux types mycorhiziens représentés sur une coupe transversale de racine (Halle *et al.*, 2008).

#### 2.2.3.1 Les pelotons intracellulaires :

Les pelotons intracellulaires sont formés par des hyphes qui peuvent pénétrer à l'intérieur de la radicule, dans les cellules les plus externes du parenchyme cortical (Saad, 2009).

### 2.2.3.2 L'arbuscule :

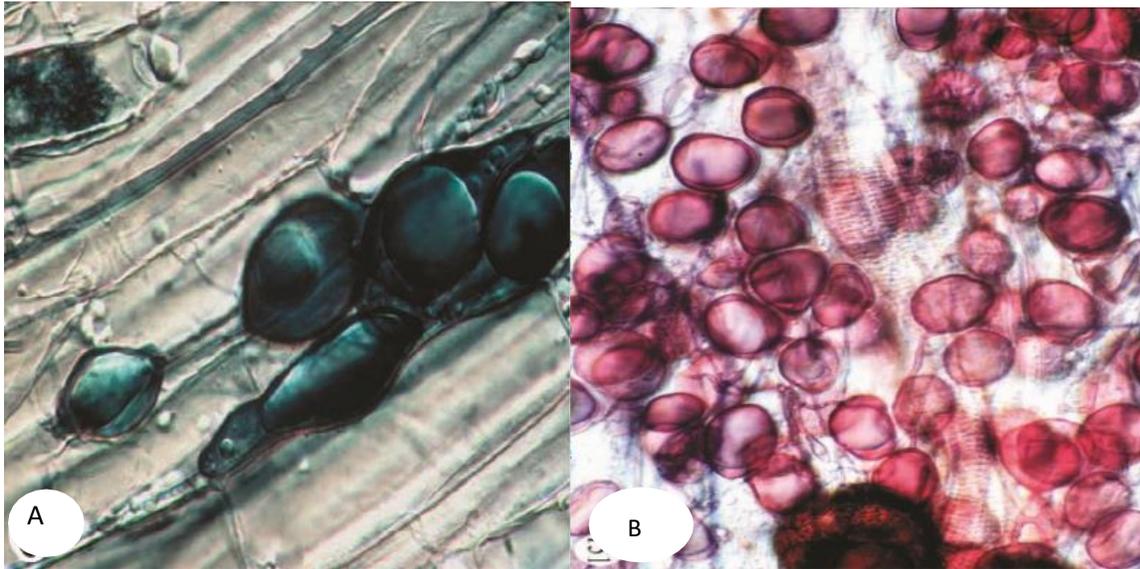
Structure hautement ramifiée produite par des champignons mycorhiziens à arbuscules dans la lumière des cellules hôtes (figure. 5). Les arbuscules sont considérées comme un élément clé de l'échange symbiotique de nutriments entre la plante et le champignon (Bonfante et Genre, 2010). Les arbuscules apparaissent dans hyphe extraradicale et se forment dans la cellule du cortex racinaire. Ils peuvent se produire sporadiquement le long des racines, mais dans certains cas, les arbuscules peuvent pousser presque à partir du point d'entrée (Schüßler et Walker, 2010).



**Figure 4:** Fragments de coupe longitudinale pratiquée dans des endomycorhizes (Boulard, 1974).A : Plage infectée chez le *Glaux maritima*. Point de pénétration (p) ; hyphes fongique (h) ; noyau de cellule – hôte (n).B : Mycélium inter et intracellulaire (m) et vésicules gorgées de réserves (v) chez la *Selaginella wildenovii*.

### 2.2.3.3 Les vésicules :

Ce sont des organes très répandus chez les endophytes. Ils se forment à partir des renflements de l'hyphes générateur, soit à son extrémité (intercellulaire), soit à l'intérieur de l'hyphes (intracellulaire), en prenant la forme d'une massue, d'une sphère ou d'une poire. Ceci s'effectue en accumulant du cytoplasme et de nombreux noyaux qui sont aussi des structures de réserves, possèdent une paroi épaisse et contiennent des lipides. Les vésicules sont observées aussi bien entre les cellules racinaires des plantes qu'au sein de ces dernières. Elles ne sont pas présentes chez tous les CMA (Peyret-Guzzon, 2014) (figure. 6).



**Figure 5 :** Vésicules de *Glomus versiformes* dans une racine d'*Allium porrum* (Peterson *et al.*, 2004). A. Vésicules de *Glomus versiforme* B : Nombre important de vésicules *Glomus versiformes* dans une racine d'*Allium porrum*

#### 2.2.3.4 Les cellules auxiliaires (AC) :

Les cellules auxiliaires sont formées à partir des hyphes extraradical (HE) et leur formation ne se produit que pour certaines espèces de l'ordre des Diversisporales (Redecker *et al.*, 2013). Elles présentent des parois cellulaires minces et peuvent être trouvées isolément ou sous forme des grappes à l'extérieur des racines (Morton et Benny, 1990).

Les AC sont souvent ornés d'épines (par exemple, *Gigaspora albida*) ou de nodules (par exemple, *Scutellospora pellucida*) (Schüßler *et al.*, 2001). Il n'existe pas d'études les signalant comme des propagules, assumant ainsi une fonction de reproduction. Selon Morton et Benny (1990), les AC ont des fonctions nutritionnelles et de stockage (Souza, 2015).

### **2.2.3.5 Les spores :**

Sont des organes de réserves et de dissémination. Elles peuvent être produites en nombre variable, selon les espèces de CMA et l'espèce de plantes par exemple. Les spores constituent la principale structure anatomique qui sert à la détermination morphologique des espèces de CMA. La taille de ces spores est fluctuante et ce même au sein de la même espèce (Peyret-Guzzon, 2014). Le processus de formation des spores AMF se produit généralement dans les 3 à 4 semaines suivant le début de la colonisation mycorhizienne (Berbara *et al.*, 2006).

### **2.3 Les ectendomycorhizes:**

Les champignons ectomycorhiziens sont des formes intermédiaires, qui présentent à la fois des caractères ectomycorhiziens et endomycorhiziens (Nultsch, 1998), regroupant seulement quelques espèces de champignons sarcoïdes qui colonisent la plupart des espèces *Pinus* et *Larix* (Peterson et Massicotte, 2004).

La particularité des ectendomycorhizes est que lorsque les hyphes sont présents dans le réseau de Hartig, ils développent des ramifications qui transpercent les parois cellulaires de la plante. Lorsque les hyphes pénètrent à l'intérieur de la cellule, ils finissent par occuper tout le volume de la cellule (Garbaye, 2013). Il existe deux types d'ectendomycorhizes :

- Mycorhizes arbutoïdes en symbiose avec des plantes de la famille des bruyères.
- Mycorhizes monotropoïdes en symbiose avec des plantes d'une petite sous-famille de Monotropoidae qui appartient aux Ericales non chlorophylliennes (Gupta *et al.*, 2000). Les hyphes forment des grappes dans les cellules racinaires superficielles

## **3 Ecologie de la symbiose mycorhizienne :**

Les mycorhizes, même s'ils sont faciles à observer dans la nature ou après manipulation au laboratoire, ils n'existent pas partout, ni toujours (Boulard, 1968). Il existe des facteurs extérieurs liés à la plante et au champignon qui préviennent l'apparition de la symbiose mycorhizienne. Ces facteurs sont de nature écologique, biotique et abiotique.

### **3.1 Les facteurs biotiques:**

Environ 130 espèces connues des champignons endomycorhiziens colonisant plus de 300 000 espèces végétales (Bazinet, 1997). Malgré le fait que les champignons endomycorhiziens sont peu sélectifs envers les végétaux hôtes, certaines combinaisons sont plus performantes que d'autres. Les valeurs de dépendances et les pourcentages de colonisation mycorhizienne sont différents selon les partenaires, démontrant ainsi qu'il existe certaines interactions spécifiques entre les symbiotes (Bergeron, 1998). L'influence des facteurs génétiques, notamment le génotype de l'hôte, est significatif afin d'inciter les mycorhizes à coloniser les racines. D'autres facteurs qui peuvent avoir un effet sur la symbiose mycorhizienne sont :

- La structure et la morphologie des racines.
- La microflore dans le sol et aux alentours des racines.
- L'interaction avec les microorganismes du sol (Hampp *et al.*, 1995).

### **3.2 Les facteurs abiotiques:**

Bien que l'on retrouve la symbiose mycorhizienne dans presque tous les écosystèmes de la planète, les différentes caractéristiques de l'environnement semblent jouer un rôle important dans la sélection des espèces de champignons et la performance de ceux-ci dans les différents écosystèmes (Bergeron, 1998):

#### **3.2.1 La lumière:**

La lumière stimule généralement le développement des mycorhizes. Le manque de lumière provoque une réduction de l'étalement des hyphes internes, qui ne peuvent plus atteindre les cellules des racines et par conséquent le développement des hyphes extramatricielles dans le sol est très limité voire inexistant (Hampp *et al.*, 1995). Les meilleurs résultats de mycorhization sont obtenus avec une luminosité de 16 heures/jours (Boulard, 1968).

#### **3.2.2 La température:**

La température est un facteur important de la photosynthèse, une température inférieure à 20°C fait baisser la croissance de la plante. La température du sol joue un rôle dans les trois

stades du développement des mycorhizes. Pour le premier stade (germination), il existe un optimum de 20°C qui varie avec les espèces de mycorhizes (Hampp et al., 1995), pour le deuxième et le troisième stade (pénétration et prolifération), tous deux sont sensibles aux variations des températures du sol (Schneck et al., 1974; Schneck et al., 1975).

### **3.2.3 La teneur d'eau dans le sol:**

L'effet décisif sur la fréquence et le développement des mycorhizes est le niveau et les variations du plan d'eau pendant la saison de végétation (Boulard, 1968). Il a été démontré que les plantes qui poussent sous les conditions d'un stress hydrique présentent généralement des associations mycorhiziennes (Auge et Strodola, 1990).

### **3.2.4 Le pH du sol:**

Depuis longtemps déjà la plupart des chercheurs ont admis les répercussions liées aux valeurs du pH du sol sur la mycorhization des plantes supérieures (Boulard, 1974). Le pH du sol affecte la germination des spores et le développement du champignon mycorhizien. Selon Mukerji (1996), la mycorhization est faible avec des pH acides (3.4 et 4.4 par exemple) et bonne dans un pH de sols varie entre 5.6 et 7 (Hampp et al., 1995). La relation entre le pH du sol et la mycorhization est complexe et dépend des espèces de plantes et du type de sol.

### **3.2.5 La matière organique:**

Les complexes mycorhiziens sont beaucoup plus communs là où se trouve la matière organique (Boulard, 1968).

### **3.2.6 La salinité:**

Les CMA ont un rôle dans la protection des plantes contre le stress salin, ceci peut être attribué au fait que la croissance des mycorhizes est liée à l'approvisionnement en éléments minéraux (Hampp et al., 1995).

### **3.2.7 Saisonnalité:**

La formation de spores dépend des saisons, et c'est le contenu de la spore qui reflète ou non la colonisation de la racine (Ebberts et al., 1987).

### **3.2.8 Le sol:**

Le type de sol est l'un des facteurs prépondérant dans la répartition des mycorhizes. Certes les mycorhizes peuvent se rencontrer dans une vaste gamme de substrats (Schreiner et *al.*, 1997). Le sol calcaire est peu favorable à la constitution des mycorhizes (Boulard, 1968), alors qu'un pH de 8.3 est un facteur important pour la formation des carpophores (Boutekrabort et *al.*, 1990).

# **Chapitre 2 :**

## **Les mycorhizes en biotechnologie végétale**

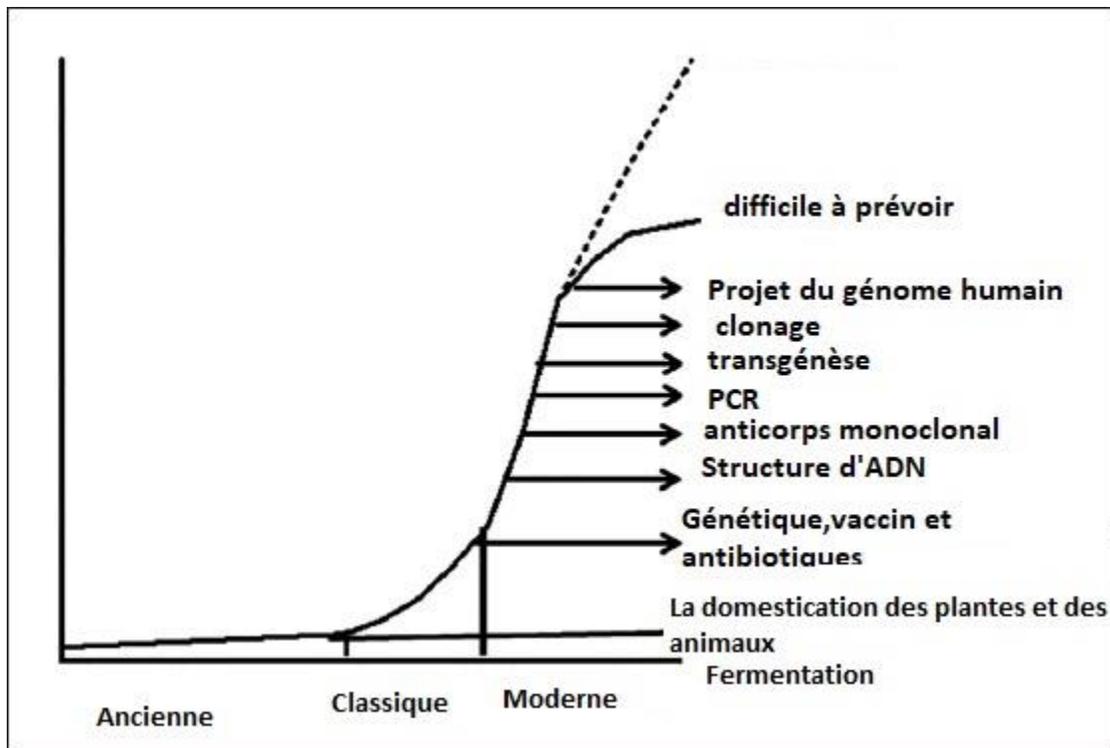
## GENERALITES SUR LA BIOTECHNOLOGIE

Le terme "biotechnologie" remonte à 1919, lorsqu'il a été inventé pour la première fois par l'ingénieur hongrois Karl Erkey. D'où le nom composé de la combinaison des mots grecs : bios - vie ; technologie technique; et logo - une étude Depuis lors, la définition la plus largement acceptée a été fournie par l'Organisation de Coopération et de Développement l'Economie (OCDE) en 1981(Verma, 2011).

L'OCDE définit la biotechnologie comme « l'application de principes scientifiques et techniques au traitement de matériaux par des agents biologiques pour fournir des biens et des services ; la nouvelle biotechnologie implique l'utilisation de processus cellulaires et moléculaires pour résoudre des problèmes ou fabriquer des produits» (Amarakoon et *al.*, 2017).

L'utilisation de processus, d'organismes ou de systèmes biologiques pour fabriquer des produits destinés à améliorer la vie humaine est appelée biotechnologie. En général, il peut être défini comme l'ingénierie d'organismes à usage humain. Elle peut également être définie comme l'ensemble des compétences requises pour utiliser les systèmes vivants ou l'influence des processus naturels pour produire des produits, des systèmes ou des environnements qui favorisent le développement humain (Bhatia, 2018).

La biotechnologie a un impact direct sur le développement de diverses disciplines scientifiques, telles que la génétique, la biologie moléculaire et le génie génétique et la biotechnologie agricole. L'évolution de la réglementation et l'émergence de nouvelles attentes sociétales ont incité les agriculteurs à faire évoluer leurs pratiques vers une production toujours plus durable, au service des populations et de l'environnement (Figure 6) (Varma, 2011).



**Figure 6 :** Histoire du développement de la biotechnologie (verma, 2011).

## 1 Généralités sur la biotechnologie végétale :

La biotechnologie végétale repose essentiellement sur des connaissances liées au fonctionnement du génome et des plantes. De nombreux chercheurs considèrent elle comme un perfectionnement des techniques d'amélioration génétique qui ont commencé-ils y a des millions d'années avec la culture de plantes sauvages pour la consommation humaine.

La biotechnologie végétale est un domaine précis dans lequel des techniques scientifiques servent à mettre au point de nouvelles variétés de plante. Elles s'appliquent sur des organes, des tissus, des cellules ou sur de l'ADN des végétaux dont le but est d'augmenter la productivité de l'agriculture et la fabrication de nouveaux produits par les plantes, comme par exemple des molécules thérapeutiques ou des sources renouvelables d'énergie , le typage de l'ADN et le clonage de gènes végétaux et animaux., la transgénèse ou les organismes génétiquement modifiés ( OGM ).

Le développement des technologies et l'émergence de nouvelles conditions sociétales ont incité les agriculteurs à faire évoluer leurs pratiques vers une production plus durable que jamais, au service de la population, de l'environnement et des territoires (Gerbore, 2020).

## **2 Importance des microorganismes dans la biotechnologie agricole :**

Le but de la biotechnologie agricole est de développer des inoculant microbiens pour améliorer la croissance des plantes et supprimer leurs maladies avec un objectif clé de réduire la dépendance aux engrais chimiques et aux pesticides (Adesemoye *et al.*, 2009). La croissance et la productivité des plantes sont principalement influencées par les microbes et les interactions plantes-racines (Kumari, 2018). La rhizosphère de la plante héberge des micro-organismes qui peuvent avoir un effet positif, négatif ou aucun effet visible sur la croissance de la plante (Berg, 2009). Bien que la plupart des microbes rhizosphériques soient nocifs et inhibent la croissance des plantes et des racines (Pereg et McMillan, 2015), les microbes peuvent être utilisés pour l'agriculture durable sans nuire à l'environnement. Ces micro-organismes sont utilisés comme étant des biofertilisants, des biopesticides, des biostimulants et dans la bioremédiation.

### **2.1 Biofertilisants:**

Un biofertilisant est un produit contenant des micro-organismes vivants qui contribue à améliorer la croissance des plantes. Il optimise les fonctions du sol et sa fertilité grâce à l'action des micro-organismes qu'il contient. Plusieurs types de biofertilisants peuvent être différenciés, en fonction des micro-organismes qui les composent. Actuellement, plusieurs micro-organismes identifiés ayant les propriétés les plus intéressantes pour une utilisation agricole et sont les suivants (Agarwal *et al.*, 2018) :

#### **2.1.1 Les bactéries fixatrices d'azote:**

Les bactéries fixatrices d'azote sont des bactéries dont la fonction principale est de capter, stocker et transformer l'azote présent dans le sol et dans l'air, pour pouvoir le restituer à la plante sous une forme assimilable et au bon moment. Il existe trois types de bactéries, les diazotrophes

(*Azotobacter*, *Pseudomonas*, *Azomonas*), les bactéries endophytes (*bradyrhizobium japonicum*) et les associations entre les bactéries endophytes et les bactéries diazotrophes (*Azospirillum sp*, *Klebsiella sp*, *G. diazotrophicus*, *Azoarcus sp*, *Hebaspirillum sp*).

Les trois types bactériens ont la capacité de synthétiser la nitrogénase qui permet de catalyser la réaction de transformation du diazote de l'air en azote assimilable par les plantes. Ce processus permet d'apporter de l'azote assimilable par les plantes de manière naturelle, en utilisant les ressources de la nature, et de diminuer ainsi l'apport d'intrants chimiques dans le sol (Guillaume, 2016).

### **2.1.2 Les bactéries solubilisatrices de phosphore :**

Les bactéries solubilisantes du phosphore permettent de solubiliser le phosphore présent dans le sol (organique et inorganique). Les bactéries inorganiques sont capables de libérer dans le sol du phosphore inorganique complexé par des minéraux (Ca, Mg, Fe, Al etc.), telles que *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Burkholderia*, *Micrococcus*, *Flavobacterium*.

Les bactéries organiques peuvent affecter la disponibilité du phosphore organique, principalement immobilisé sous forme de phytates. Ces molécules contiennent des ions phosphate, mais ils sont liés à d'autres atomes complexes et donc piégés. Des bactéries telles que *Rhizobium*, *Enterobacter*, *Serratia*, *Citrobacter*, *Proteus*, *Klebsiella*, *Pseudomonas* et même *Bacillus* sont capables de produire des enzymes appelées phytases. Ces enzymes permettront la libération d'ions phosphate à partir des phytates et seront ainsi disponibles pour les racines des plantes (Guillaume, 2016).

### **2.1.3 Les champignons mycorhiziens:**

Les champignons mycorhizes sont des champignons qui ont la particularité d'être en symbiose avec les racines de plantes (c'est-à-dire qu'il y a un accord commun entre les deux organismes) (Guillaume, 2016).

## 2.2 Les biopesticides:

Les biopesticides sont des substances chimiques et des agents antiparasitaires issus de ressources naturelles, aussi appelées pesticides biologiques, qui contrôlent le ravageur par des mécanismes non dangereux et de nature écologique.

Les biopesticides microbiens comprennent principalement des bactéries, des champignons, des virus, des protozoaires ou des algues comme agents actifs. Ces microbes sont les biopesticides les plus couramment utilisés, notamment les bioinsecticides (*Bacillus thuringiensis*), les biofongicides (*Trichoderma sps*). Ces biopesticides sont moins nocifs pour l'agriculture ainsi que pour les animaux et les êtres humains (Singh, 2019).

## 2.3 Les biostimulants:

Selon l'EBIC (European Biostimulants Industry Council) « les biostimulants se définissent comme des substances et/ou des microorganismes dont la fonction, lorsqu'appliqués aux plantes ou à la rhizosphère, est la stimulation des processus naturels qui améliorent l'absorption ou l'utilisation des nutriments, la tolérance aux stress abiotiques, la qualité ou le rendement de la culture, indépendamment de la présence de nutriments. Les trois catégories suivantes peuvent être utilisées pour les classer selon leurs origines :

- Biostimulants organique
- Biostimulants microbiens
- Biostimulants inorganiques

Les biostimulants peuvent utiliser seuls, par apport au sol ou dans le milieu de culture, par pulvérisation sur les plantes ou en enrobage de semences. En raison des quantités à apporter, souvent faibles, l'utilisation des biostimulants est fréquemment combinée avec l'apport d'autres fertilisants : c'est le cas déjà largement répandu des supports de culture enrichis en mycorhizes (Faessal, 2014).

### **3 Les effets bénéfiques des mycorhizes :**

Il existe actuellement un grand intérêt pour l'utilisation des mycorhizes en agriculture, autant intensive qu'extensive, ils créent une symbiose avantageuse, autant pour lui que pour la plante. Il apporte à la plante de l'eau et des nutriments du sol, ce qui se traduit par une augmentation des calibres, permet l'assimilation du phosphore organique et, en échange, reçoit des sucres essentiels à sa croissance, Il améliore l'état physiologique des plantes et la productivité des rendements de tout type de cultures de plantes, peu importe les conditions: culture hydroponique, culture sous serre, à l'air libre. Il stimule le développement racinaire et la croissance, augmente la zone d'exploration du sol et le volume racinaire, optimise l'assimilation des éléments fertilisants, favorise la résistance à de nombreux stress (hydriques, thermiques, salins, etc.), sécurise et optimise la levée des plants, permettant une homogénéité des plantations. De nombreuses entreprises ont dans leurs catalogues des produits à base de champignons mycorhiziens(Jochems, 2014).

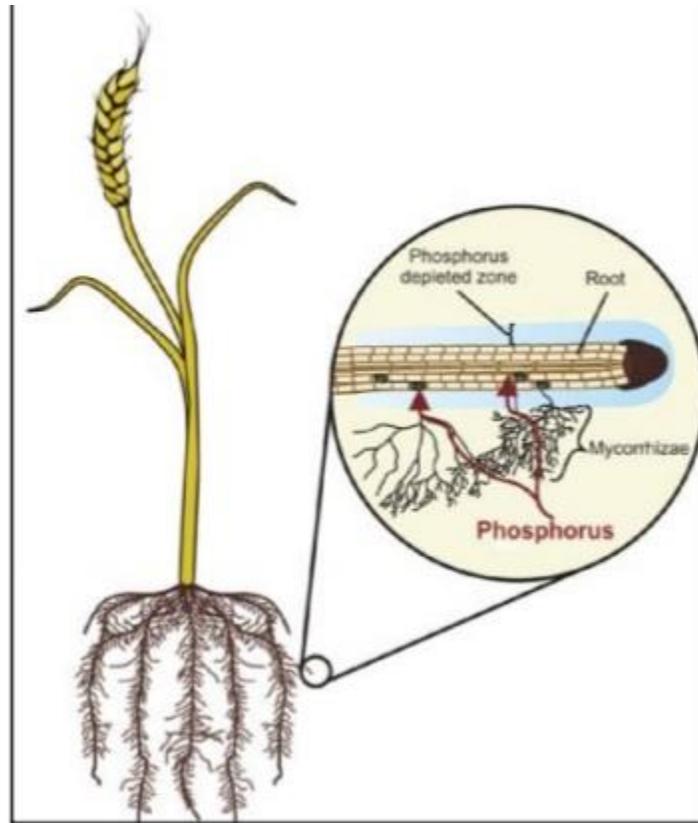
#### **3.1 Absorption des éléments nutritifs:**

C'est la fonction première des mycorhizes, ils contribuent à l'absorption des éléments nutritifs les plantes, notamment du phosphore, qui est un élément nutritif indispensable à la croissance des plantes, ainsi l'absorption de Manganèse (Mn) est généralement réduite lorsque les plantes sont mycorhizées, probablement à cause d'une modification de la microfaune rhizosphérique (Marschner, 1995). Par contre, Une assimilation accrue d'autres éléments comme le Cu, le Zn et le Fe est observée chez les plantes associées aux CMA (Marschner, 1995; Smith et Read, 1997). Les champignons ectomycorhiziens peuvent prélever le K et le Mg à partir du sol et à partir de roches (Wallander et Wickman, 1999). Il s'agit donc d'un avantage nutritif très significatif pour le développement des végétaux.

Le mycorhize permet à la plante de bénéficier d'une meilleure absorption du phosphore grâce à un réseau d'hyphes fongiques qui colonisent le sol et qui offrent une plus grande surface d'absorption avec le substrat (Finlay, 2004; Helgason et Monter, 2005 ; Hopkins, 2003; Plenchette et *al.*, 2005). Certains hyphes peuvent pousser à plus de 10 centimètres de la surface de la racine. Cette taille est près de 100 fois supérieure à celle des poils capillaires (Grant et *al.*,

2005). Le réseau d'hyphes s'étend ainsi au-delà de la zone d'appauvrissement en phosphore biodisponible, qui se forme rapidement autour des racines (figure 10), permettant à la plante d'accéder à un réservoir de phosphore plus important (Helgason et Fitter, 2005 ; Plenchette et *al.*, 2005). En raison de leur petit diamètre, les hyphes ont également accès à des micro-endroits qui ne peuvent pas être colonisés par des racines de plantes trop épaisses (Plenchette et *al.*, 2005).

En effet, les champignons mycorhiziens interagissent avec les microorganismes de la rhizosphère et favorisent le développement de bactéries qui sécrètent des acides organiques chargés de solubiliser le phosphore (Barea et *al.*, 2002). Dans des sols de pH neutre ou calcaire, ils peuvent acidifier le sol grâce aux acides organiques, favorisant ainsi solubilisation du phosphore. Dans un sol acide, ces champignons peuvent excréter des agents chélateurs qui libèrent le phosphore des molécules de fer et d'aluminium du sol. Aussi, certaines études affirment que les champignons mycorhiziens peuvent produire des phosphatases, des enzymes permettant de mobiliser le nutriment partir de sources biologiques (Grant et *al.*, 2005). En plus de favoriser l'absorption de phosphore de la plante, la symbiose mycorhizienne et l'association avec les bactéries du genre *Rhizobium* (fixation de l'azote), sont en fait indissociables. La plante n'aurait en effet pas suffisamment de ressources pour faire circuler l'azote jusqu'au nodule pour la transformation par les bactéries. Elle a besoin du soutien énergétique du mycorhize qui lui apporte le phosphore nécessaire au transport de l'azote (transport réalisé par des molécules spécialisées contenant beaucoup de phosphore (P)). On parle alors de « métasymbiose », association mutualiste entre la plante hôte et ses champignons et bactéries symbiotiques associés.



**Figure 7 :** Impact des mycorhizes sur l'absorption des éléments minéraux des plantes  
( Roy-Bolduc et Hijri, 2011).

### 3.2 L'absorption de l'eau:

L'augmentation de la surface d'absorption permet l'accès à l'eau dans les plus petits interstices du sol et ainsi de protéger la plante des stress hydriques. On estime à 1 000 le rapport longueur de mycélium sur longueur de racine. Lorsque le champignon détecte un manque d'eau, il envoie un signal chimique à la plante pour provoquer la fermeture des stomates au niveau des feuilles, afin de prévenir un dessèchement irréversible (Jochems, 2014).

### 3.3 Protection des racines contre les substances toxiques:

Les hyphes entourant les racines des plantes sont fréquemment en contact avec des substances toxiques (Sarand et *al.*, 1999; Martino et *al.*, 2000; Jacob, 2001; Adriaensen et *al.*,

2004; Bellion, 2006; 2008; Redon et *al.*, 2008) qui peuvent perturber leur fonctionnement, allant jusqu'à entraîner la mort de la plante. Cela peut-être, par exemple, des ions d'aluminium, des métaux lourds comme le nickel ou des molécules émises par d'autres plantes pour nuire à leurs compétitrices (interaction allélopathique). A cela se rajoutent les polluants émis par l'activité humaine, d'une part les métaux lourds (plomb, mercure et cadmium) et d'autre part une concentration local d'hydrocarbure pétrolier, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP, hautement cancérigène), les biphényles, les dioxines et les pesticides utilisés en agriculture qui sont aujourd'hui les plus importants.

Les champignons jouent alors un rôle de « filtre » en stockant les composants toxiques ou, dans d'autres cas, en neutralisant les molécules toxiques sous forme de complexes insolubles dans le sol rhizosphérique à l'extérieur de ces tissus. Les associations de plantes avec des CMA sont proposées comme une solution biologique potentielle pour améliorer la résistance des plantes à la toxicité des métaux et restaurer la fertilité des sols pollués par les métaux lourds (Vivas et *al.*, 2005). Les CMA interviennent dans les interactions entre la plante et les métaux toxiques du sol, en réduisant la toxicité de ces métaux (Pawlowska et Charvat, 2002 ;Meharg, 2003). Par conséquent, les CMA jouent un rôle écologique important dans la phyto-stabilisation des sols pollués par les éléments traces et potentiellement toxiques (Garg et Chandel, 2010)

### **3.4 L'agrégation des sols:**

Les champignons mycorhiziens agissent sur les sols par divers mécanismes qui améliorent la structure et la stabilité du substrat. Le réseau mycélien est une structure très dynamique qui contribue physiquement à l'assemblage et au maintien des agrégats du sol, entre autres parce que les hyphes du réseau croissent rapidement et se renouvellent constamment (Hamel et Plenchette, 2007). Même le mycélium mort participe à la préservation de la structure du sol, En effet, pour abandonner un site épuisé en nutriments, le champignon mycorhizien fait migrer le cytoplasme des hyphes présents dans ce milieu vers de nouveaux hyphes colonisant des sites plus riches. Il laisse ainsi sur place la paroi externe de son vieux mycélium vidé de son contenu. Ces structures ressemblant à des tuyaux vides permettent le soutien des agrégats et contribuent à la stabilité des sols, jusqu'à leur décomposition (Hamel et Plenchette, 2007; Fortin et *al.*, 2008). Le réseau mycélien influence aussi biochimiquement le sol par la sécrétion de

substances fongiques comme la glomaline. Cette glycoprotéine est difficilement décomposable et s'accumule dans les sols. Plusieurs études ont démontré le rôle structurant de la glomaline qui agit sur les particules du sol comme une colle (Rillig et Mummey, 2006). Elle forme les macroagrégats, des structures essentielles à la fertilité des sols qui retiennent les éléments nutritifs et favorisent les échanges gazeux (Fortin et *al.*, 2008). Enfin, par l'ensemble de ces mécanismes d'action favorisant l'agrégation du sol, les champignons mycorhiziens réduisent considérablement les risques de compaction et d'érosion, et favorisent la fertilité du sol (Jeffries et *al.*, 2003).

### **3.5 La protection contre les agents pathogènes :**

Un autre avantage conféré aux plantes hôtes par la mycorhization est une protection contre les pathogènes, principalement contre les champignons et les nématodes qui attaquent les racines des plantes (Helgason et Fitter, 2005; Dalpé, 2006; Fortin et *al.*, 2008). Plusieurs mécanismes expliquent ce phénomène. Premièrement, les avantages nutritionnels qu'offre la mycorhization permettent aux plantes hôtes d'être plus vigoureuses et de mieux résister aux attaques des pathogènes (Dalpé, 2006). Deuxièmement, il a été démontré que l'infection des racines de la plante hôte par les champignons mycorhiziens préconditionne la plante à faire face aux attaques de pathogènes et d'autres organismes nuisibles comme les brouteurs.

En effet, la mycorhization entraîne la plante dans un état actif d'immunisation qui lui permet d'être plus efficace dans ses réponses aux attaques des pathogènes (Ismail et Hijri, 2012; Jung et *al.*, 2012). Finalement, il a aussi été montré que certains champignons mycorhiziens, comme *Glomus irregulare*, peuvent contrôler la croissance des champignons pathogènes et réduire leur production de mycotoxine (Ismail et *al.*, 2013). Il semblerait aussi que les champignons mycorhiziens protègent la plante hôte contre les pathogènes en entraînant une compétition directe avec ces derniers pour les ressources énergétiques et pour les sites d'infection. À eux seuls, les hyphes du champignon mycorhizien peuvent constituer jusqu'à 80 % de la biomasse microbienne du sol. Ainsi, les hyphes qui colonisent les racines satureraient le milieu et laisseraient peu de sites potentiels pour l'infection par des pathogènes (Helgason et Fitter, 2005 ; Dalpé, 2006).

Il est à noter que le pouvoir protecteur du mycorhize contre les pathogènes a ses limites et dépend de plusieurs facteurs comme la plante, le champignon mycorhizien la virulence du pathogène. Les conditions environnementales (sol, humidité, température, etc.) influencent aussi la capacité du mycorhize à protéger la plante hôte contre les pathogènes (Dalpé, 2006).

### **3.6 Activité hormonale:**

La modification mycorhizienne joue un rôle dans la synthèse de composés complexes tels que : les vitamines et les hormones végétales (phytohormones) participent à la régulation et la stimulation de la croissance et du développement des plantes, en réponse notamment aux facteurs environnementaux et ce sont des moyens de communication existant entre le champignon et sa plante-hôte tels que la cytokynine, l'éthylène, l'acide jasmonique, l'auxine (Barker et Tagu, 2000) et les gibbérellines qui agissent sur la différenciation cellulaire (Strullu, 1991).

L'auxine est produite par la quasi-totalité des champignons ectomycorhiziens (Karabaghli et *al.*, 1997; Zaretsky et *al.*, 2006 ) et les plantes ligneuses; elle joue un rôle important à faibles doses transformant ainsi la morphologie des racines (Egli et Brunner, 2002; Fortin et *al.*, 2008). Chez les Pinaceae, les racines primaires colonisées montrent un cortex hypertrophié et des ramifications dichotomiques caractéristiques, liées aux quantités d'auxine que le champignon libère dans les tissus racinaires (Gea et *al.*, 1994; Fortin et *al.*, 2008; Hodge et *al.*, 2009).

L'acide jasmonique (Hause et *al.*, 2007; Hause et Schaarschmidt, 2009; Haneef Khan et *al.*, 2010), ainsi que l'éthylène (Gutierrez et *al.*, 2009) protègent la plantes contre des attaques par des pathogènes, interviennent dans le processus de colonisation par les champignons arbusculaires et entraînent des modifications biochimiques dans toutes les parties de la plante.

La concentration de ces phytohormones peut varier dans la plante selon la présence ou non du champignon mycorhizien. La production hormonale du champignon affecte généralement le port de la plante en favorisant la croissance de la partie aérienne par rapport à la partie racinaire. Les plantes mycorhizées, montrent aussi un accroissement de production de certaines enzymes comme, la peroxydase qui est l'enzyme courante, observée dans les tissus des plantes malades et blessées (Spanu et Boufante-Fasolo, 1998).

#### **4 Les inoculant mycorhiziens commerciaux :**

L'application d'inoculant mycorhiziens commerciaux dans l'agriculture vise à entraîner une meilleure mycorhization des cultures par l'introduction d'une ou de plusieurs souches étrangères de CMA qui ont été sélectionnées pour leur capacité à produire des effets bénéfiques sur les plantes (augmentation de la nutrition, réduction des maladies, etc.).

Les espèces qui sont couramment utilisées pour l'inoculum commercial sont du genre des *Glomus*. Ces espèces sont naturellement très répandues dans les écosystèmes et ont comme avantage de coloniser une grande variété de plantes hôtes (Dalpé and Monreal, 2004; Fortin et autres, 2008). Les souches généralement sélectionnées ont la particularité d'adopter une stratégie évolutive de type r (type reproductive), c'est-à-dire une croissance rapide et la production de beaucoup de spores. Cette stratégie permet aux souches introduites d'entrer très rapidement en symbiose avec la plante cultivée à la suite de l'inoculation.

Ainsi, les cultures peuvent bénéficier rapidement des effets positifs de la symbiose. Les inoculant mycorhiziens peuvent être appliqués dans les champs sous diverses formules (liquide ou solide) et sont généralement appliqués au moment du semis ou de la transplantation des plants dans les champs.

Depuis déjà plusieurs années, certains pays en voie de développement ont mis en pratique l'inoculation de leurs cultures par des souches sélectionnées à haute performance. Les effets mesurés sur les rendements des cultures et sur la baisse des demandes en intrants chimiques phosphatés de certains sont impressionnants.

Les mycorhizes sont commercialisées sous différentes formes : une poudre à saupoudrer directement dans le trou de plantation ou une solution hydrosoluble, qu'il vous suffit de diluer dans l'eau d'arrosage (Jochems, 2014).

**Chapitre 03 :**  
**Valorisation des endomycorhizes à arbuscule en**  
**biotechnologie végétales**  
**(Cas de MyKe Pro)**

## **VALORISATION DES ENDOMYCORHIZES A ARBUSCULE EN BIOTECHNOLOGIE VEGETALES (CAS DE MYKE PRO)**

### **Introduction :**

Les champignons mycorhizien sont connus depuis l'avant - guerre alors que des chercheurs travaillaient à améliorer la productivité des plantes. À cette époque, l'industrie agrochimique a débuté la production de nitrates dont les résultats sur les végétaux ont été fracassants. L'agriculture moderne est hautement consommatrice d'engrais chimiques et de pesticides augmentant ainsi le risque de pollution du sol et de l'eau. Le recours à l'agriculture à faible intrants par le biais de l'utilisation des microorganismes symbiotiques permet le maintien de la production et la préservation de l'environnement. En effet, puisque la protection de l'environnement devient de plus en plus importante et particulièrement dans le domaine agricole, les mycorhizes représentent ainsi une voie d'avenir efficace et naturelle pour l'agriculture (Hamel, 2011).

L'association mycorhizien est l'association la plus importante dans les différents écosystèmes de notre planète en termes d'individus concernés et en termes d'impact sur les écosystèmes. Il existe différents types de mycorhizes, les plus anciennes et les plus répandues : les Mycorhizes à Arbuscules. En effet, ces mycorhizes colonisent 72% des plantes terrestres, ils sont également les plus ancestrales puisqu'elles sont datées à plus de 450 millions d'années, cette datation a été estimée grâce à la découverte de spores fossiles

Cette symbiose bénéfique autant pour l'arbre que pour les champignons, parce que les filaments du champignon ont l'apparence d'un arbuste et qu'ils pénètrent à l'intérieur des racines. Les endomycorhizes à arbuscules s'observent non seulement sur les racines de certains arbres, tels que les érables, les frênes et les fruitiers, mais aussi sur près de 90 % des plantes herbacées, autant les espèces horticoles que potagères.

Actuellement, plusieurs recherches à travers le monde, ont porté sur la possibilité d'exploitation de ce genre de mycorhizes à grande échelle. D'ailleurs beaucoup entreprise ont commencées la production commerciale des AMF (Vosàtka, 2012; Igiehon et Babalola, 2017).

# **1 Exploitation des champignons mycorhiziens arbusculaires:**

Actuellement les champignons mycorhiziens arbusculaires font l'objet d'une exploitation industrielle et mis sur le marché un inoculant mycorhizien sous plusieurs formes (liquide, granulaire, poudre) pour essayer de répondre aux besoins des agriculteurs. L'inoculum sous forme solide ou en suspension liquide pourra se composer de différents types de propagules : spores, mycélium fongique, fragments de racines mycorhizées. Un ou plusieurs types de propagules peuvent être formulés dans un même inoculum endomycorhizien.

De plus, les inoculums de champignons endomycorhiziens peuvent contenir une ou plusieurs espèces fongiques mélangées. Les produits multi-espèces sont plus proches des conditions naturelles car dans les écosystèmes. La présence de plusieurs espèces fongiques permet à l'inoculum de répondre à une plus grande diversité de conditions de culture (Jochems, 2014).

## **1.1 Production d'inoculant mycorhiziens:**

Les champignons mycorhiziens arbusculaires sont des symbiotes obligatoires, c'est-à-dire qu'ils nécessitent un milieu vivant pour se multiplier. Bien que la culture des propagules de champignons mycorhiziens arbusculaires ne soit pas facile, différentes techniques de culture existent. Le genre *Glomus* présente des espèces qui sont prolifiques et relativement faciles à cultiver de façon aseptique sur des racines isolées (Jochems, 2014). Pour identifier le type d'inoculum fongique à utiliser des critères principaux être résumés de la façon suivante :

- le degré de l'impact de la souche fongique sélectionnée sur la croissance et l'état sanitaire des plantes utilisées dans les projets de plantation ;
- la capacité des propagules fongiques à conserver leur viabilité après différents temps de conservation et maintenir ainsi leur efficacité sur la croissance de la plante au moment de l'inoculation du substrat.
- le coût de la production et de la formulation de l'inoculum fongique qui doit être compatible avec les capacités socio-économiques des utilisateurs potentiels.

### **1.1.1 Production en pots ou en bacs :**

La culture en pot est le mode traditionnel de culture des champignons mycorhiziens arbusculaires. On la pratique quand on veut surtout isoler une nouvelle espèce ou souche de champignons mycorhiziens (Fortin et *al.*, 2008). On peut utiliser la méthode des tamisages pour sélectionner le matériel de départ. Après avoir purifié le matériel obtenu par tamisage sur un gradient de saccharose, ce qui permet de se débarrasser des particules non désirées, on choisit sous l'observation binoculaire une seule ou un groupe de spores pour mettre en culture. Juste avant de les mettre en culture, on désinfecte les spores que l'on dépose ensuite à une profondeur de 5cm dans un substrat stérile. Puis on place une plantule (poireau en général) dessus, et on fait une irrigation avec une solution appropriée. Douze (12) à quinze (15) semaines après il devrait y avoir colonisation de la racine. Pour initier une culture en pot, on peut également utiliser un fragment de racine mycorhizée.

Dans l'objectif d'obtenir suffisamment d'inoculum pour une utilisation au champ, on utilise de préférence des bacs de dimension variables. Toutefois, cette technique n'arrive pas à contourner le problème des organismes pathogènes (Jochems, 2014).

### **1.1.2 Production au champs:**

Dans le cas de sols stérilisés (solarisation sous couche de plastique), on peut produire en plein champ. Cependant, le contrôle de la microflore extérieure s'avère difficile; et la protection de l'inoculum mycorhizien contre les contaminants pose problème (Jochems, 2014).

### **1.1.3 Production au laboratoire (milieux solide et liquide):**

Avec les méthodes précédentes de production d'inoculant mycorhizien, on court le risque de d'avoir des microorganismes non désirés et possiblement des agents pathogènes. Mais avec la maîtrise de la culture de racines excisées, on arrive à faire la production aseptique des propagules de champignons mycorhiziens arbusculaires. La limite de cette technique est le nombre restreint d'espèces de champignon que l'on arrive à cultiver *in vitro* (Jochems, 2014).

### **1.1.4 Production industrielle:**

Toutes les techniques de production de propagules de champignons mycorhiziens décrites antérieurement ont des limitations liées soit à la quantité qu'on peut produire, soit à la possibilité de contamination de l'inoculum avec des agents pathogènes. La production industrielle d'inoculants mycorhiziens est une adaptation des techniques de production au laboratoire. Ainsi, des quantités importantes de propagules sont produites chaque année dans le monde. L'entreprise Premier Tech Biotechnologies au Canada, se spécialise dans la production et la commercialisation des inoculants mycorhiziens au niveau mondial. Aussi, d'autres entreprises (notamment à Cuba et en Inde) œuvrent dans ce domaine pour une agriculture rentable et durable (Jochems, 2014).

## **1.2 Les Formes d'inoculum:**

En fonction du mode d'application envisagée, l'utilisateur aura à choisir la forme d'inoculum la plus appropriée à ses besoins. Actuellement, il est possible de trouver des inocula mycorhiziens sous forme de granulés, poudre, tablettes, pralins ou suspensions liquides (tableau 03):

- Les micro granulés, entre 1 et 4 mm, sont facilement mélangés aux supports de culture pour la production de plants mycorhizes ou apportés dans le trou de plantation au plus près des racines.
- Les poudres, très fines (particules <250 µm) permettent de préparer une suspension pulvérisable sur les supports de culture ou injectable dans le sol au pied de végétaux déjà installés. Ce type d'inoculum pourra également s'utiliser en enrobage de semences.
- Les tablettes, permettent un dosage aisé de l'inoculum à apporter dans le trou au moment de la plantation des végétaux. L'inoculum apporté est localisé à un seul endroit et non réparti uniformément sur le chevelu racinaire.
- Associé à un pralin, l'inoculum est particulièrement adapté pour les végétaux à racines nues. En une seule opération, la plante est inoculée et ses racines protégées.
- Les suspensions, liquides conviennent pour l'enrobage des semences. Ces inoculum sont également pulvérisables sur les supports de culture ou apportés par injection dans le sol au pied de végétaux déjà en place.

Un inoculum mycorhizien doit être positionné près des racines. Pour les plants déjà en place, il faut éviter les produits préconisés en épandage à la surface du sol et privilégier le mode d'apport par injection ou par enfouissement. Enfin, il est également possible de trouver sur le marché des produits « 2 en 1 » :

- Les supports de culture déjà inoculés, prêts à l'emploi et particulièrement adaptés pour la culture hors sol.
- Les plants mycorhizés (vigne, châtaignier ...) prêts pour la plantation et dont la mycorhization aura été contrôlée avant la commercialisation.
- Les semences enrobées avec des propagules d'endomycorhizes (principalement des spores) qui permettent de semer et d'inoculer une parcelle en un seul passage.
- Des engrais et amendements organiques contenant des propagules d'endomycorhizes.

Aujourd'hui il y a plusieurs pays commercialisés leurs produits mycorhiziens sous différents marques, le tableau 3 montrent quelque exemple de ces produits.

**Tableau 3 : Quelques produits mycorhizien commerciaux .**

<b>Nom de produit</b>	<b>Asteria</b> (biostimulant ) 	<b>BACTOMYCOR</b> (preparation ) 	<b>Myke Pro</b> 	<b>Endoplant irrigation</b> 
<b>Nom d'entreprise et pays</b>	INOCULIM plus au France	IF TECH (au France)	Premier Tech Biotec- hnologie(PTB) au Canada	Micologia (au Spain)
<b>Souche utilisées</b>	des endomycorhizes de l'espèce <i>Glomus</i> <i>interaradices</i>	Bactérie bénéfique du genre <i>Azospirillum</i> Et comportend aussi des endomycorhizes de l'espèce <i>Glomus</i> <i>interaradices</i>	<i>Glomus interaradices</i>	<i>Glomus intraradices</i> , <i>Glomus mosseae</i>
<b>Les plantes concacrées</b>	Utilisable à 80 % des espèces végétales (céréales, fleurs, legumes, arbrfruitiers ....) c'est à dire avec toutes les plantes formant des endomycorhizes )	Vous pouvez utiliser BACTOMYCOR sur toute les plantes. En effet, plus de 90 % des familles botaniques sont capables de former des mycorhizes à arbuscules. Sur ces plantes vous observerez les effets combinés des deux micro-organismes utiles tandis que sur les plantes non mycorhizables, seules les bactéries promotrices de croissancæ0 s'exprimeront.	Chaque produit possède sa propreC formulation adaptée aux application spécifique des différents type de culture , les produit de MyKe Pro il conçu pour les marchés horticole et agricole.	Plantes : horticoles, des arbres fruitiers et des plantes ornementales. Ne pas appliquer dans les conifères, feuillu, bleuets, Carnation, choux, azalée, bleuet, laurier, orchidée, radis, betterave et rhododendrons.
<b>Les références</b>	<a href="http://WWW.astria.com">WWW.astria.com</a>	<a href="http://WWW.insectosphere.fr">WWW.insectosphere.fr</a>	<a href="http://WWW.Mykepro.com">WWW.Mykepro.com</a>	<a href="http://www.Micologia.com">www.Micologia.com</a>

## 2 Les bioformulation à base de *Glomus intraradices* :

Plusieurs références bibliographiques ont montré que la souche *Glomus intraradices* est la plus couramment utilisée dans les produits commerciaux.

### 2.1 Taxonomie de *Glomus intraradices*:

*Rhizophagus irregularis* (synonyme *Glomus irregulare*, précédemment connu comme *Glomus intraradices*) est un champignon mycorhizien arbusculaire appartenant au genre *Rhizophagus*. Il est utilisé comme un inoculât du sol en agriculture et en horticulture. D'après Blaszk et al., (2010) et Walker et Schussler (2010), la classification de ce champignon est comme suit :

Règne : Fungi  
Division : Mucoromycota  
Sous-division : Glomeromycotina  
Classe : Glomeromycetes  
Ordre : Glomerales  
Famille : Glomeraceae  
Genre : *Rhizophagus*  
Espèce : *Rhizophagus irregularis*

### 2.2 Importance de *Glomus intraradices* en biotechnologie végétale :

Parmi plus de 200 espèces de champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA), nous avons sélectionné le *Glomus intraradices* est une espèce modèle qui a été isolée par Valentin Furlan et André Fortin dans les années 80 dans une pépinière de Pont-Rouge, près de Québec. Elle a été sélectionnée pour ses plusieurs propriétés intéressantes, telle que la capacité d'adaptation à plusieurs types de sol et de conditions environnementales, la colonisation rapide d'une variété de plantes herbacées et ligneuses et une très bonne performance en champ pour une variété de

cultures. Il est également très efficace pour l'absorption d'eau et des nutriments aux plantes. Plus de sa capacité de cultivée *in vitro*, en laboratoire et à l'échelle industrielle (Gagné et Le Quéré, 2014). Cette souche a l'avantage de coloniser un nombre important de plantes hôtes et est aussi très résistante aux entreposages prolongés, ce qui facilite la commercialisation et la conservation du produit (Dalpé and Monreal, 2004).

### **3 Etude d'un produit mycorhizien (cas de MYKE pro) :**

Le principal producteur et vendeur d'inoculant mycorhiziens au Canada est l'entreprise québécoise Premier Tech Biotechnologie (PTB), qui est reconnue comme un leader mondial dans la production industrielle d'inoculant mycorhiziens (endomycorhizes), PTB commercialise ces produits sous la marque de commerce MYKE®PRO.

Myke Pro est un gamme des produits bioformulant à base des endomycorhizes à arbuscule (genre *Glomus intraradices*) qui augmente la croissance végétale, la résistance des plantes aux maladie et le rendement des cultures, Il conçu pour les marchés horticole et agricole, ces produits vous permettent de bénéficier des avantages des mycorhizes, il considèrent comme une solution efficace et respectueuse de l'environnement, chaque produit possède sa propre formulation adaptée aux application spécifiques des différent types de culture

Les deux objectifs de PTB est : D'abord, améliorer les inoculant mycorhiziens pour les rendre plus performants, dépendant de la variété et des cultures, puis développer une méthode pour quantifier la mycorhize dans le sol.

Les produit de Myke pro touchent les trois secteurs :

- Espaces verts et paysagement ( Paysagement , Entretien gazon , Entretien des arbres ) (Tableau 4).
- Agriculture (Grandes cultures, Céréales Oléoprotéagineuses cultures fourragères, Cultures industrielles, cultures spécialisées, pomme de terre cultures maraîchères, petits fruits arbres fruitiers (Tableau 5).
- Horticulture ornementale (pépinières ornementales, serriculture et floriculture, gazonnières) (Tableau 6).

**Tableau 4 : Les produits MyKe Pro de l'espaces verts et paysagement( Premier Tech,2022).**

Nom de produit	Formulation	Définition	Mode d'emploi
<p><b>MYKE® PRO PAYSAGIS</b></p> 	<p>Produit granulaire</p>	<p>C'est un inoculant mycorhizien utilisé pour la transplantation de la plupart des arbres, arbustes et plantes herbacées. Ce produit est spécialement conçu pour tous les sols, même ceux perturbés.</p>	<p><b>Arbres et arbustes</b></p> <p><b>Annuelles, vivaces et bulbes</b></p>
<p><b>MYKE® PRO GAZON • G</b></p> 	<p>Produit granulaire</p>	<p>C'est un inoculant endomycorhizien à appliquer lors du semis, lors de la pose de gazon en plaques ou pour l'entretien du gazon. Formulé en granules, il peut s'utiliser avec la plupart des équipements d'épandage. La densité élevée du produit permet de placer l'inoculant dans la zone de développement racinaire.</p>	<p><b>Semis</b> Avant l'ensemencement. Il peut également être utilisé lors d'un semis de fleurs sauvages.</p> <p><b>Gazon en plaques</b> Avant la pose de gazon en plaques.</p> <p><b>Épandage à la volée</b> Arroser suite à l'application du produit.</p>
<p><b>MYKE® PRO GAZON•WP</b></p> 	<p>Produit poudreux</p>	<p>C'est un inoculant endomycorhizienne poudreux idéal pour le mélange aux semences, pour l'application liquide ou pour l'hydroensemencement.</p>	<p><b>Semis</b> Avant l'ensemencement. Il peut également être utilisé lors d'un semis de fleurs sauvages.</p> <p><b>Gazon en plaques</b> Avant la pose de gazon en plaques.</p> <p><b>Épandage à la volée</b> Arroser suite à l'application du produit.</p>

**Tableau 5 :** Les produit myke pro disponible pour les grand culture /culture spécialisées (Premier Tech, 2022).

Produit	Mode d'emploi	Ingrédient
<p>Myke Pro pomme de terre L</p> 	<p>Humertage des plantons.</p> <p>-Application dans le sillon lors de la plantation .</p> <p>-Développé pour les culture de pomme de terre</p>	<i>Glomus intraradices</i>
<p>Myke pro culture spécialisées P</p> 	<p>-Compatible avec la plupart des cultures maraîchères et fruitières.</p> <p>- Ce produit est utilisé pour le mélange aux semences au moment du semis, la production de transplants en serre ou l'inoculation à la transplantation en champ.</p>	Inoculant endomycorhizien
<p>Myke Pro culture spécialisées G</p> 	<p>-Compatible avec la plupart des cultures maraîchères et fruitières.</p> <p>- Ce produit est utilisé en mélange au terreau pour la production de transplants en serre</p> <p>- L'application dans le sillon, la transplantation de petits fruits ou la plantation d'arbres fruitiers.</p>	Inoculant endomycorhizien
<p>Myke pro culture spécialisées P+G</p> 	<p>Idéal pour le mélange avec les semences de pois au moment du semis</p>	endomycorhizien et de rhizobium,

**Tableau 6** : les produits des secteurs horticole (Premier Tech, 2022).

Nom de produit	Mode d'emploi	Souche utilisées
<p>Myke Pro Pépinière-G</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Transplantation en contenant</li> <li>-Mélange aux substrats de culture</li> <li>-Transplantation en plein sol idéal pour la production et le repotage d'arbres (feuillus et conifères) et arbustes</li> </ul>	<p><i>Glomus intraradices</i> et <i>Pisolithus tinctorius</i></p>
<p>PÉPINIÈRE•WP</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Semis et boutures</li> <li>-transplantation en contenant</li> <li>-Racines nues (pralinage)</li> <li>- Mélange au substrat</li> <li>-Transplantation en plein sol Arbres établis</li> </ul> <p>_ la plupart des arbres (feuillus et conifères), arbustes et plantes herbacées.</p>	<p><i>Glomus intraradices</i> et <i>Pisolithus tinctorius</i></p>
<p>Serriculture-G</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Cubes en laine de roche ou oasis</li> <li>-Mélange aux substrats de culture</li> <li>-Transplantation en contenant</li> <li>-Transplantation en plein sol. Il conçu pour la culture en serre et pour la production maraîchère. La granulation fine se mélange bien à la plupart des terreaux et peut également s'appliquer dans les cubes en laine de roche.</li> </ul>	<p><i>Glomus intraradices</i></p>
<p>SERRICULTURE•WP</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Semis et boutures</li> <li>-Transplantation en contenant</li> <li>-Mélange au substrat végétaux établis</li> <li>-appliqué par la plupart des plantes herbacées, annuelles ou vivaces, légumes et arbres fruitiers.</li> </ul>	<p><i>Glomus intraradices</i></p>
<p>Myke pro PS3.</p> 	<p>Traitement de semance</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-compatible avec les germinées, - Idéal dans les Gazonnières</li> </ul>	<p><i>Glomus intraradices</i></p>

## **Traitement de deux articles scientifiques <<l'augmentation du rendement des pommes de terre décrit par Hamel dans des années 2010 et 2011**

### **4 Application de produit <<Myke pro pomme de terre .L >> :**

Tous les types de sols présentent un contenu varié en champignons mycorhiziens. Certaines espèces se reproduisent de façon plus efficace et d'autres ont des effets bénéfiques plus significatifs sur les plantes. Dans les sols agricoles, la population naturelle de champignons mycorhiziens diminue avec temps. Les principales raisons sont les suivantes :

- Le travail intense du sol brise le réseau d'hyphes
- La rotation avec des cultures non - hôtes tels le canola, le chou, la moutarde
- L'utilisation de hauts taux de phosphore et de produits chimiques. La forte présence de phosphore disponible fait en sorte que les mycorhizes ont très peu d'impact. Certains pesticides ont un effet néfaste sur les mycorhizes
- Les dommages physiques dus à la compaction du sol
- La distribution et l'efficacité des populations mycorhiziennes indigènes inégales.

Lors de la production de pommes de terre, une grande quantité de sol est travaillée, que ce soit par le sous - solage, la récolte ou le labour des cultures de rotation. De plus, dans bien des cas , aucune couverture végétale n'est présente durant l'hiver . Cette absence de plantes hôtes fait en sorte que les spores mais ne peuvent trouver de racines pour supporter leur développement. Tous ces facteurs limitent la survie du réseau d'hyphes présent dans le sol.

Lorsqu'on ajoute des spores d'un champignon mycorhizien reconnu pour ses effets bénéfiques, on réduit le délai entre la rencontre de l'hyphe et de la racine . En inoculant directement le planton, le contact se fait rapidement lors de la germination de la semence et des spores. Puis, le développement rapide du mycélium dans le sol permet à la plante de profiter des effets bénéfiques de la symbiose. Il en découle des champs en meilleure santé et des rendements améliorés (Hamel, 2011).

Premier Tech a la possibilité d'offrir des inoculants mycorhiziens sous différentes formulations et à différentes concentrations Les essais de l'été 2010 visaient à déterminer la formulation et avec quelle méthode d'application sont les mieux adaptées à la culture de la pomme de terre. Nous voulions aussi valider l'impact du Myke Pro au niveau du développement végétatif de la plante et de la production des tubercules (Hamel, 2011)

#### **4.1 Importance de mycorhizes pour la production de la pomme de terre:**

Le phosphore joue un rôle important en agriculture, mais il est souvent fixé dans le sol par l'argile, l'aluminium, le fer, le calcium (selon le pH) et différents complexes organiques. De ce fait, il est fréquemment indisponible pour les plantes. Les plants de pomme de terre ont des besoins élevés en phosphore et éprouvent bien des difficultés à extraire cet élément du sol. Pour combler les exigences des végétaux cultivés, un apport supplémentaire en phosphate est souvent requis. Malheureusement, moins de 15 % du phosphore provenant des engrais est utilisé par les plantes durant l'année d'application (Liu *et al.* 2007; Mycorrhizae incrop production). Les champignons mycorhiziens jouent un rôle très important dans l'absorption du phosphore par les végétaux. Le manque d'eau est un facteur parfois limitatif dans la production de la pomme de terre.

Le réseau d'hyphes créé lorsque le plant est inoculé, permet d'aller chercher de l'eau qui normalement ne serait pas accessible aux plantes. Ainsi, les plants de pomme de terre sont plus résistants à la sécheresse. De plus les mycorhizes retiennent ensemble les particules du sol ce qui permet de réduire le ruissellement et l'érosion. La plante fournit des glucides et d'autres nutriments aux champignons et ceux – ci utilisent les hydrates de carbone pour leur croissance ainsi que pour synthétiser et excréter des molécules comme la glomaline (glycoprotéine). La libération de glomaline dans le sol environnant se traduit par une meilleure structure du sol puisque les agrégats de sol entourés par les hyphes des mycorhizes se retrouvent enduits par cette protéine collante. L'amélioration de la structure du sol par les mycorhizes entraîne une meilleure pénétration de l'eau, freinant ainsi l'érosion et stabilisant le sol (Hamel, 2011).

#### **4.2 La Variété de pomme de terre utilisée :**

La variété utilisée était la “Gold Rush” puisque c'est l'une des plus cultivées au Québec. leur tubercules sont généralement lisses et uniformes avec très peu de défauts

externes ou internes. (Ministère de l'agriculture et de l'aménagement rural du Nouveau Brunswick, 1997).



**Figure 8 :** La pomme de terre type de variété Gold Rush

(Ministère de l'agriculture et de l'aménagement rural du Nouveau Brunswick, 2013).

#### **4.3 Etude des régions:**

Deux essais en champ ont été réalisés dans les régions de Lanaudière (Rawdon) tandis que la seconde se trouvait à Centre du Québec (Lyster) lors de la saison de culture 2010. toutes deux en sol sableux. À chacun des sites le même protocole a été mis en place. Les producteurs ont suivi les régies de fertilisation recommandées pour leurs champs respectifs.

#### **4.4 Les conditions:**

Les conditions climatiques ont été marquées par une sécheresse excessive au site de Lyster alors qu'à Rawdon, les conditions sèches de la première moitié de l'été se sont améliorées pendant le reste de la saison. Les opérations concernant l'entretien phytosanitaire

de même que la régie culturale (pesticides, fertilisants, buttage) des parcelles ont été confiées aux bons soins du propriétaire champ.

#### 4.5 La méthode:

Cinq traitements ont été appliqués (tableau 7), l'inoculant mycorhizien était mis en suspension dans l'eau et deux méthodes d'application ont été comparées, soit la brumisation (humectage) (figure 9) du planton et l'application dans le sillon de plantation (figure 10), en mélange avec la suspension du fongicide Quadris (est le seul produit pouvant être appliqué dans le sillon pour assurer une protection contre la rhizoctonie et la gale argentée transmises par le sol). Chaque méthode a été testée à 2 doses d'inoculant mycorhizien. Un témoin non inoculé complétait les traitements. Le dispositif était en blocs complets aléatoires avec six répétitions de 15 plantons par traitement.

Les rendements ont été mesurés pour chaque parcelle et les comparaisons ont été faites à l'aide d'une analyse de variance (ANOVA) (Hamel, 2010)

**Tableau 7** : les traitements appliqués (Hamel, 2010)

Traitements	information sur chaque traitement
1	Témoin sans mycorhizes
2	Humectage du planton avec inoculum liquide (dose 1)
3	Humectage du planton avec inoculom liquide (dose 2)
4	Application liquide dans le sillon lors de la plantation avec Quadris (dose 1).
5	Application liquide dans le sillon lors de la plantation avec Quadris Quadris (dose 2)



**Figure 9:** Le traitement des plantons à été effectué par brumisation (humectage)  
(Hamel, 2010).



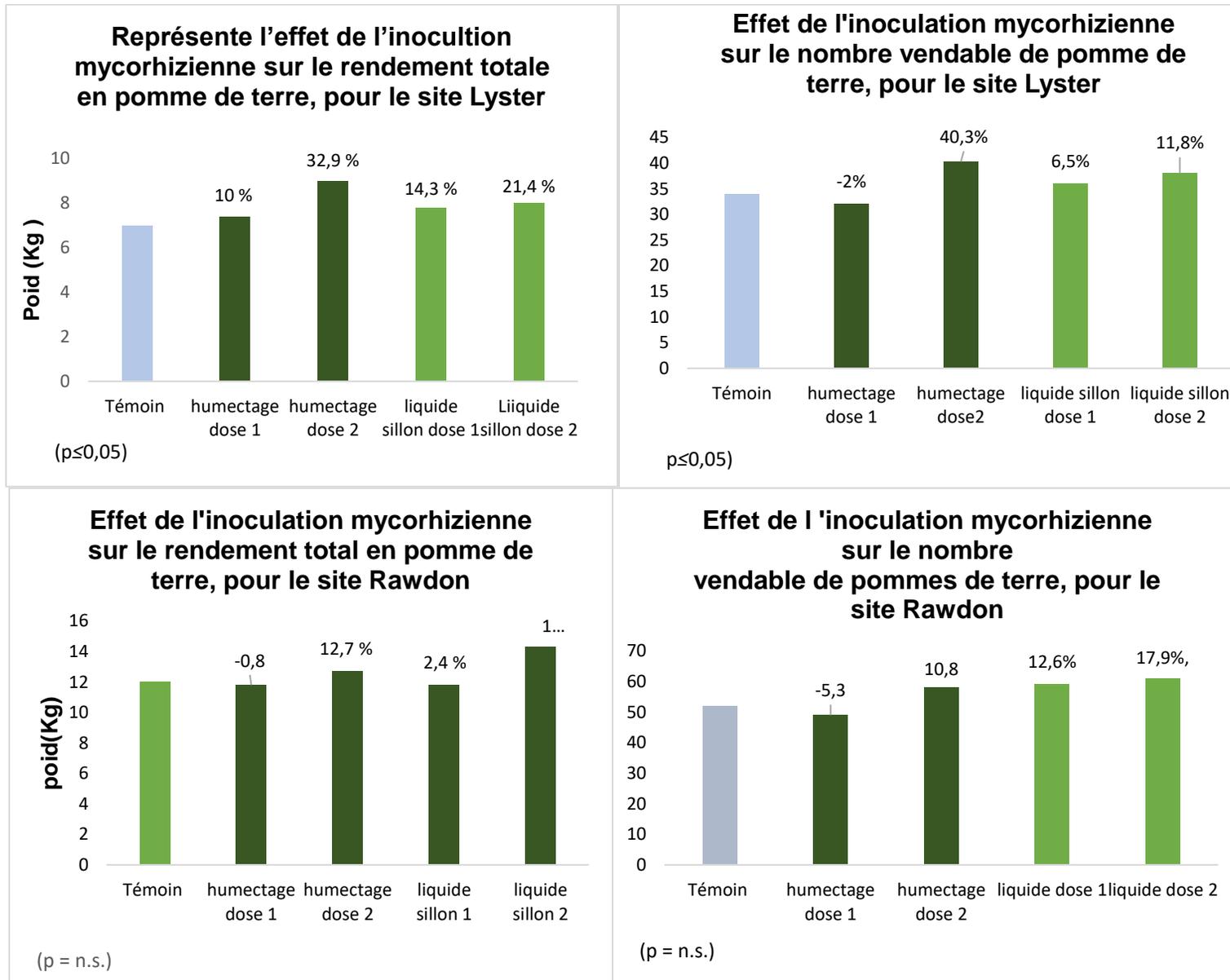
**Figure 10 :** le sillon de pomme de terre (ARVALIS-institut du végétal, 2006)

#### 4.6 Résultats:

Au site de Lyster, l'inoculation mycorhizienne a augmenté le rendement total entre 10 et 32,9%, selon le traitement, comparativement au témoin. L'augmentation de rendement

obtenue avec le traitement d'humectage à la dose 2 était significatif (32.9%;  $p=0.042$ ) Pour ce même traitement, 40.3% plus de tubercules vendables ont été récoltés par rapport au témoin ( $p=0,017$ ).

**Au site de Rawdon**, sauf pour le traitement d'humectage à la dose 1, on observe aussi une hausse du rendement total entre 2,4 et 14.3%. Ces hausses ne sont cependant pas statistiquement significatives (n.s).Elles sont toutefois associées à une augmentation appréciable du nombre de tubercules vendables, allant jusqu'à 17.9% (n.s.). Ces essais montrent que les deux méthodes d'inoculation peuvent être utilisées pour introduire le mycorhize (Hamel, 2011).



**Figure 11** : Effet de l'inoculation mycorrhizienne sur le rendement total en pomme de terre



**Figure 12:** Résultat de site Rawdon (Hamel, 2011).



**Figure 13:** Système racinaire beaucoup plus développé avec Myke Pro (Hamel, 2011).

## ***Conclusion :***

La mycorhization est une association symbiotique entre les racines des plantes et les champignons du sol. Il existe trois catégories des mycorhizes, sont les ectomycorhizes, les endomycorhizes et les ectendomycorhizes. Parmi ces types les endomycorhizes à arbuscule sont les plus répandue dans la rhizosphère car ils colonisent 72 % des plantes terrestres. L'infection des racines par ces champignons entraîne une amélioration de l'absorption hydrique et minérale et une meilleure tolérance aux stress biotique et abiotique des plantes.

Actuellement, il existe plus de 200 espèces des champignons mycorhizien arbusculaires (CMA). Parmi les CMA, *Glomus intraradices* est une espèce modèle qui a une capacité d'adaptation à différents types de sol et elle à une capacité de colonisation très rapide des racines. Elle a été exploitée dans plusieurs bioformulations commercialisés.

L'entreprise Premier Tech Biotechnologie (PTB) au Canada a commercialisée une gamme des produits à base de *Glomus intraradices* sous la marque MyKe Pro, conçu pour les marchés agricole et horticole sous différents formulation poudreux, granulaire et liquide. Application de MyKe Pro sur la culture de la pomme de terre en plein champ montre un bon développement de systèmes racinaires synonyme d'une meilleure absorption hydriques et minérale ce qui mene à une nette amélioration du rendement.

La commercialisation future des produits de CMA en tant qu'alternatives écologiques aux produits agrochimiques est basée sur une compréhension approfondie des interactions entre les CMA, la plante et la communauté microbienne tellurique. Une partie de ces recherches futures portera sur l'optimisation des conditions de croissance et l'augmentation de la durée de vie des produits CMA, non phytotoxiques pour les plantes cultivées, tolérant les conditions environnementales défavorables et un rendement plus élevé.

## Références bibliographiques :

Adesemoye, A. O., Torbert, H. A., & Kloepper, J. W. (2009). Plant growth-promoting rhizobacteria allow reduced application rates of chemical fertilizers. *Microbial ecology*, 58(4), 921-929.(2000), 126p.

Agnolucci, M., Turrini, A., Giovannetti, M. (2019). Molecular and functional characterization of beneficial bacteria associated with AMF spores. *In Methods in Rhizosphere Biology Research* (pp. 61-79). Springer, Singapore.

Apple M. E., 2010. Aspects of mycorrhizae in desert plants. In: Desert Plants, Eds., Ramawat K.G., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 121-134.

ARVALIS - Institut du végétal, 2006. Implantation de la culture. Adapter les choix techniques au calibre recherché. Dossier pommes de terre, Perspectives Agricoles, n°321, mars 2006.

Bâ, A., Duponnois, R., Diabaté, M. et Dreyfus, B. (2011). *Les champignons ectomycorhiziens des arbres forestiers en Afrique de l'Ouest*. Marseille: IRD. 254P.

Barea, J-M., Azcón, R. and Azcón-Aguilar, C. (2002). Mycorrhizosphere interactions to improve plant fitness and soil quality. *Antonie van Leeuwenhoek*, vol. 81, p. 343-351.

Barker S.J 1., Tagu D., 2000. *The roles of auxins and cytokinins in mycorrhizal symbioses*. J. Plant Growth Regul., 19:144-154.

Ben cherif, K., (2077). Etude de la mycorhization de *Tamarix articulata* Vahl. Universite Saad Dahlab de Blida.

Berbara R.L.L, Souza F.A., Fonseca, H.M.A.C. (2006). Fungos micorrízicos arbusculares: muito além da nutrição. In: FENANDES, M. S. (ed). Nutrição Mineral de plantas. SBCS, Viçosa, pp 54–79. In Souza, T. (2015). *Handbook of arbuscular mycorrhizal fungi*. Cham: Springer, 153P.

Béreau, M., Louisanna, E., Grandcourt, A., Garbaye, J. (2003). Symbiose mycorhizienne et nutrition minérale. *Description et dynamique des milieux forestiers*. Rev. For. Fr. LV., Numéro spécial: 74 - 83.

Berg, G. (2009). Plant–microbe interactions promoting plant growth and health: perspectives for controlled use of microorganisms in agriculture. *Applied microbiology and biotechnology*, 84(1), 11-18.

Bhatia, S. (2018). Histoire, portée et développement de la biotechnologie. *Introduction à la biotechnologie pharmaceutique*, 1P.

Blasius, D., Feil, W., Kottke, I., Oberwinkler, F. (1986). Hartig net structure and formation in fully ensheathed ectomycorrhizas. *Nordic Journal of Botany* 6, 837–842. In Balestrini, R.,

Kottke, I. (2016). Structure and development of ectomycorrhizal roots. *Molecular mycorrhizal symbiosis*, 47-61.

Boulard.,1968.Les mycorhizes.Monographie botanique et Biologie végétale. Masson,Paris.

Châtaigner, J.M. et Duponnois, R. (2017). Les microorganismes du sol : des outils biologiques pour satisfaire les objectifs du développement durable (ODD). F.F.E. Annales des Mines - Réalités industrielles, 1: 94 - 97.ois, 2017)

conifères sur des sites forestiers après coupes à blanc’’, Mémoire présenté pour Dalpé, Y. (2005). Les mycorhizes : un outil de protection des plantes mais non une panacée. *Phytoprotection*, vol. 86, p. 53-59.

Dalpé, Y. (2006). Mycorhizes et bénéfiques marginaux. *Québec Vert*, p. 8-9.

Dalpé, Y. and Monreal, M. (2004). Arbuscular mycorrhiza inoculum to support sustainable cropping systems. In Plant Management Network. Crop Management. <http://www.plantmanagementnetwork.org/pub/cm/review/2004/amfungi/> (Page consultée le 8 novembre 2013).

Das, A., Varma, A. (2009). *Symbiosis: the art of living*. In *Symbiotic Fungi* (pp. 1-28). Springer, Berlin, Heidelberg.

Dearnaley, J., Perotto, S., Selosse, M. A. (2016). Structure and development of orchid mycorrhizas. *Molecular mycorrhizal symbiosis*, 63-86.

Dechamplain N., Gosselin L., 2002. Les champignons mycorhiziens. PISTES, Université Laval, 12p.

Déziél, M. H., ‘‘Influence de l’inoculation endomycorhizienne au champignon sur le Diténgou, F. A. B eguiristain T, Lapeyrie F. (2000). Root hair elongation is inhibited by hypaphorine, the indole alkaloid from the ectomycorrhizal fungus *Pisolithus tinctorius*, and restored by indole-3-acetic acid. *Planta*, 211(5), 722-728. In Gregory, P. J. (2008). *Plant roots: growth, activity and interactions with the soil*. John Wiley & Sons, 318P.

Duponnois, R., Hafidi, M., Ndoeye, I., Ramanankierana, H., Bà, A. M. (2013). Des champignons symbiotiques contre la désertification: écosystèmes méditerranéens, tropicaux et insulaires, 511P

Egli S., Brunner I., 2002. Les mycorhizes: Une fascinante biocénose en forêt. *Not. Prat.*, 35 : 1-8.

Faessel, L., Gomy C., Nassr N., Tostivint C., Hipper C., Dechanteloup A., (2014) *Produits de stimulation en agriculture visant à améliorer les fonctionnalités biologiques des sols et des plantes [archive]. Étude des connaissances disponibles et recommandations stratégiques*, rapport d’étude réalisé par Bio by Deloitte et RITTMO Agroenvironnement pour le ministère de l’Agriculture, de l’Agroalimentaire et de la Forêt, 148 pages.

Finlay, R. (2004). Mycorrhizal fungi and their multifunctional roles. *Mycologist*, vol. 18, p. 91-96.

Fortin J.A., Plenchette C., Piché Y., 2008. Les mycorhizes. *La nouvelle révolution verte*. Eds. MultiMondes et Quae, Québec, Versailles, 131p.

Fortin, J. A., Plenchette, C. et Piché, Y. (2008). Les mycorhizes : La nouvelle révolution verte. Québec, Éditions MultiMondes, 138 p.

Gagné, A., ‘‘Etude moléculaire du cortège ectomycorhizien de plantations de

Gagné, S. et Le Quéré, D. (2014). Discussion au sujet de l'inoculation des cultures au Myke Pro au Canada et au Québec. Communication orale. Entrevue menée par Laurence Jochems- Tanguay avec Serge Gagné, Directeur Innovation, Recherche et Développement de Premier Tech et Dominique Le Quéré, Conseillère essais externes de Premier Tech, 10 janvier 2014, Rivière-du-Loup.

Garbaye, J. (2013). La symbiose mycorhizienne : Une association entre les plantes et les champignons. 6<sup>ème</sup> éd. Paris: Editions Quae. 280 P.

Gea L., Normand L., Vian L., Gay G., 1994. Structural aspects of ectomycorrhiza of *Pinus pinaster* (Ait.) Sol. formed by an IAA-overproducer mutant of *Hebeloma cylindrosporum Romagnési*. *New Phytol.*, 128: 659-670.

Gerbore, J., & Dreux-Zigha, F. T. (2020). Ces biotechnologies qui révolutionnent notre société.

Grant, C., Bittman, S., Montreal, M., Plenchette, C. and Morel, C. (2005). Soil and fertilizer phosphorus: Effects on plant P supply and mycorrhizal development. *Canadian Journal of Plant Science*, vol. 85, p. 3-14.

Gregory, P. J. (2008). *Plant roots: growth, activity and interactions with the soil*. John Wiley & Sons, 318P.

Guillaume, L., 2016; <http://www.biofertilisants.fr>

Gupta, V., Satyanarayana, T., Garg, S. (2000). General aspects of mycorrhiza. *In Mycorrhizal biology* (pp. 27-44). Springer

Gutiérrez O.A., Wubben M.J., Howard M., Roberts B., Hanlon E., Wilkinson J.R., 2009. The Role of Phytohormones Ethylene and Auxin in Plant–Nematode Interactions. *Russ. J. Plant Physl.*, 56 (1): 1-5.

Hall, I. R. (1977). Species and mycorrhizal infections of New Zealand Endogonaceae. *Transactions of the British Mycological Society*, 68(3), 341-356. In Souza, T. (2015). *Handbook of arbuscular mycorrhizal fungi*. Cham: Springer.

Hall, I.R. (1977). Species and mycorrhizal infections of New Zealand Endogonaceae. *Transactions of British Mycological Research*, 341-356. In Duponnois, R., Hafidi, M., Ndoye, I., Ramanankierana, H., Bà, A. M. (2013). *Des champignons symbiotiques contre la désertification: écosystèmes méditerranéens, tropicaux et insulaires*, 511P.

Hamel, D. and Plenchette, C. (2007). *Mycorrhizae in Crop Production*. Street, Binghamton, NY, Haworth Food & Agricultural Products Press, New York, 326 p.

Haneef Khan M.d.H., Meghvansi M.K., Panwar V., Gogoi H.K., Singh L., 2010. Arbuscular mycorrhizal fungi-induced signalling in plant defence against phytopathogens. *J. Phytol.*, 2 (7): 53-69.

Hause B., Mrosk C., Isayenkov S., Strack D., 2007. Jasmonates in arbuscular mycorrhizal interactions. *Phytochemistry*, 68: 101-110.

Hause B., Schaarschmidt S., 2009. The role of jasmonates in mutualistic symbioses between plants and soil-born microorganisms. *Phytochemistry*, 70: 1589-1599. -Healy R.A., 2003. *Mattirolomyces tiffanyae*, a new truffle.

Helgason, T. and Fitter, A. (2005). The ecology and evolution of the arbuscular mycorrhizal fungi. *Mycologist*, vol. 19, p. 96-101.

Hopkins, W.G. (2003). *Physiologie végétale*. Deuxième édition, Bruxelles, De Boeck Université, 352 p.

Ismail, Y. and Hijri, M. (2012). Arbuscular mycorrhisation with *Glomus irregulare* induces expression of potato PR homologues genes in response to infection by *Fusarium sambucinum*. *Functional Plant Biology*, vol. 39, n° 3, p. 236-245.

Ismail, Y., McCormick, S. and Hijri, M. (2013). The arbuscular mycorrhizal fungus, *Glomus irregulare*, controls the mycotoxin production of *Fusarium sambucinum* in pathogenesis of potato. Yaacov Okon édition, Federation of European Microbiological Societies, 6 p. 348. (Collection FEMS Microbiology Letters).

Jeffries, P., Gianinazzi, S., Perotto, S., Turnau, K. and Barea, J. M. (2003). The contribution of arbuscular mycorrhizal fungi in sustainable maintenance of plant health and soil fertility. *Biology and Fertility of Soils*, vol. 37, p. 1-16.

Jochems- Tanguay, L. Directeur Innovation, Recherche et Développement de Premier Tech et Dominique Le Quéré, Conseillère essais externes de Premier Tech, 10 janvier 2014, Rivière-du-Loup.

Jung, S. C., Martinez-Medina, A., Lopez-Raez, J. A. and Pozo, M. J. (2012). Mycorrhiza-Induced Resistance and Priming of Plant Defenses. *Journal of Chemical Ecology*, vol. 38, p. 651- 664.

Karabaghli C., Sotta B., Gay G., 1997. Hormones fongiques, ectomycorhizes et rhizogénèse. *Rev. For. Fr.* XLIX., 99-109.

Krüger, M., Krüger, C., Walker, C., Stockinger, H., Schüßler, A. (2012). Phylogenetic reference data for systematics and phylotaxonomy of arbuscular mycorrhizal fungi

Kumari S., Jha A.K., Kumar R et Rajnikant., 2018 - Role of Microbial Biotechnology in Sustainable Agriculture and Environment. *Chem Sci Rev Lett*, 7(25), 184-189 [en ligne]. Disponible sur: "[https://chesci.com/wp-content/uploads/2018/04/V7i25\\_28\\_CS112049012\\_Sonia\\_184-189.pdf](https://chesci.com/wp-content/uploads/2018/04/V7i25_28_CS112049012_Sonia_184-189.pdf) "(consulté le 28/03/2021).

l'obtention du grade de maître ès sciences (M. Sc.), l'Université Laval – Canada,

Laminou M.O., 2009. Fixation des dunes dans le Sud-Est du Niger: Evaluation de l'efficacité de la barrière mécanique, espèces ligneuses adaptées et potentiels d'inoculation mycorrhizienne. Thèse Doctorat, Gembloux Agro.Bio.tech., Univ. Liege, Belgique, 142p.

Marschner H., 1995. Nutrient availability in soils. In: Mineral nutrition of higher plants, Eds., Academic Press, London, UK, p. 483-507.

Massicotte, H. B., Peterson, R. L., Ackerley, C. A., Piché, Y. (1986). Structure and ontogeny of *Alnus crispa*-*Alpova diplophloeus* ectomycorrhizae. Canadian journal of botany, 64(1), 177-192. In Gregory, P. J. (2008). Plant roots: growth, activity and interactions with the soil. John Wiley & Sons, 318P.

Ministère de l'agriculture et de l'aménagement rural du Nouveau Brunswick, 1997, <https://inspection.canada.ca/protection-des-vegetaux/pommes-de-terre/varietes-de-pomme-de-terre/goldrush/fra/1312587385737/1312587385738>. Variétés de Pommes de Terre au Canada, AGDEX 161/33, 135 p.

Morton, J.B, Benny, G.L. (1990). Revised classification of arbuscular mycorrhizal fungi (Zygomycetes): a new order, Glomales, two new suborders, Glomineae and Gigasporineae, and two new families, Acaulosporaceae and Gigasporaceae, with an emendation of Glomaceae. Mycotaxon 37:471–491. In Souza, T. (2015). Handbook of arbuscular mycorrhizal fungi. Cham: Springer, 153P.

Morton, J.B. et Benny, G.L., "Revised classification of arbuscular mycorrhizal fungi (Zygomycetes): A new order, Glomales, two new suborders, Glomineae and Gigasporineae, with an emendation of Glomaceae". Mycotaxon, n° 37, (1990), 471- 491.

Morton, J.B., "Redescription of *Glomus caledonium* based on correspondence of spore morphological characters in type specimens and a living reference culture", Mycorrhiza, n°6, (1996), 161-166.

Morton, J.B., Benny, J. (1990). Revised classification of arbuscular mycorrhizal fungi (Zygomycetes): a new order, Glomales, two new suborders, Glomineae and Gigasporineae, and two new families, Acaulosporaceae and Gigasporaceae, with an emendation of Glomaceae. Mycotaxon, 37: 471-491. In Duponnois, R., Hafidi, M., Ndoye, I., Ramanankierana, H., Bà, A. M. (2013). Des champignons symbiotiques contre la désertification: écosystèmes méditerranéens, tropicaux et insulaires, 511P.

Mukerji, K.G. Sharma, M. (1996). Mycorrhizal relationships in forest ecosystem, in : Forests: A Global Perspective, Majumdar, S. K., Miller, E. W., & Brenner, F. J. , eds., The Pennsylvania Acad. Sci. USA, pp.95-125. In Raina, S., Chamola, B. P., Mukerji, K. G. (2000). Evolution of mycorrhiza. In Mycorrhizal Biology (pp. 1-25). Springer, Boston, MA.

Nadeem, S. M., Khan, M. Y., Waqas, M. R., Binyamin, R., Akhtar, S., Zahir, Z. A. (2017). Arbuscular mycorrhizas: An overview. In Arbuscular Mycorrhizas and Stress Tolerance of Plants (pp. 1-24). Springer, Singapore.

Parniske, M. (2008). Arbuscular mycorrhiza: the mother of plant root endosymbioses. *Nature Reviews Microbiology*, 6(10), 763-775. In Nadeem, S. M., Khan, M. Y., Waqas, M. R., Binyamin, R., Akhtar, S., Zahir, Z. A. (2017). Arbuscular mycorrhizas: An overview. In *Arbuscular Mycorrhizas and Stress Tolerance of Plants* (pp. 1-24). Springer, Singapore.

Pereg, L., & McMillan, M. (2015). Scoping the potential uses of beneficial microorganisms for increasing productivity in cotton cropping systems. *Soil Biology and Biochemistry*, 80, 349-358.

Peterson, R. L., Massicotte, H. B., Melville, L. H. (2004). *Mycorrhizas: anatomy and cell biology*. NRC Research Press, 173P.

Peterson, R. L., Massicotte, H. B., Melville, L. H. (2004). *Mycorrhizas: anatomy and cell biology*. NRC Research Press, 173P.

Peyret-Guzzon, M. (2014). Etudes moléculaires de la diversité des communautés et populations de champignons mycorrhiziens à arbuscules (Glomeromycota). Thèse de doctorat. Université de Bourgogne, France. 191P.

Plenchette, C. and Clermont-Dauphin, C., Meynard, J. M., Fortin J. A. (2005). Managing arbuscular mycorrhizal fungi in cropping systems. *Canadian Journal of Plant Science*, vol. 65, p. 31- 40.

pour l'obtention du grade de maître ès science (M. Sc), Université Laval - Canada,

Powell, J., Klironomos, J. (2007). The ecology of plant-microbial mutualisms. In *Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry* (pp. 257-281). Academic Press.

Raina, S., Chamola, B. P., Mukerji, K. G. (2000). Evolution of mycorrhiza. In *Mycorrhizal* .

Raviv M., 2010. The use of mycorrhiza in organically-grown crops under semi arid conditions: a review of benefits, constraints and future challenges. *Symbiosis*, 52: 65-74.

Read, D. J. (1996). The structure and function of the ericoid mycorrhizal root. *Annals of Botany*, 77(4), 365-374. In Gregory, P. J. (2008). *Plant roots: growth, activity and interactions with the soil*. John Wiley & Sons, 318P.

Redecker, D., Schüßler, A., Stockinger, H., Stürmer, S. L., Morton, J. B., Walker, C. (2013). An evidence-based consensus for the classification of arbuscular mycorrhizal fungi Glomeromycota). *Mycorrhiza*, 23(7), 515-531. In Souza, T. (2015). *Handbook of arbuscular mycorrhizal fungi*. Cham: Springer, 153P.

Redecker, D., Schüßler, A., Stockinger, H., Stürmer, S. L., Morton, J. B., Walker, C. (2013). An evidence-based consensus for the classification of arbuscular mycorrhizal fungi (Glomeromycota). *Mycorrhiza*, 23(7), 515-531. In Souza, T. (2015). *Handbook of arbuscular mycorrhizal fungi*. Cham: Springer, 153P.

rendement et la quantité de la pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.)''. Mémoire

Rillig, M. C. and Mummey, D. L. (2006). Tansley review: Mycorrhizas and soil structure. *New Phytologist*, vol. 171, p. 41-53.

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.

Saad, D. (2009). Etude des endomycorhizes de la variété Sigoise d'olivier (*Olea europea* L.) et essai de leur application à des boutures semi – ligneuses. Mémoire de Magister, en Biotechnologie, Faculté des Sciences, Université d'Oran, Oran, Algérie. P. 33.

Sahraoui, A. L. (2013). La Mycorhize à arbuscules: quels bénéfices pour l'homme et son environnement dans on contexte de développement durable?. *Synthèse: Revue des Sciences et de la Technologie*, 26, 06-19.

Savoie J.M., Largeteau M.L., 2011. Production of edible mushrooms in forests: trends in development of a mycosilviculture. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 89: 971- 979.

Schüßler, A., Schwarzott, D., and Walker, C. (2001). A new fungal phylum, the Glomeromycota: phylogeny and evolution. *Mycol. Res.* 105: 1413–1421. In Peterson, R. L., Massicotte, H. B., Melville, L. H. (2004). *Mycorrhizas: anatomy and cell biology*. NRC Research Press, 173P.

Schüßler, A., Schwarzott, D., Walker, C. (2001). A new fungal phylum, the Glomeromycota: phylogeny and evolution. *Mycological research*, 105(12), 1413-1421. In Souza, T. (2015). *Handbook of arbuscular mycorrhizal fungi*. Cham: Springer, 153P.

Selosse, M. A., Boullard, B., Richardson, D. (2011). Noël Bernard (1874–1911): orchids to symbiosis in a dozen years, one century ago. *Symbiosis*, 54(2), 61-68. In Dearnaley, J., Perotto, S., Selosse, M. A. (2016). Structure and development of orchid mycorrhizas. *Molecular mycorrhizal symbiosis*, 63-86.

Selosse, M. A., Le Tacon, F. (2001). Les stratégies symbiotiques de conquête du milieu terrestre par les végétaux. *L'Année Biologique*, 40, 3-20.

Shah, M. A. (2014). *Mycorrhizas: novel dimensions in the changing world*. Springer India, 87P.

Singh, R. (2019). *Microbial Biotechnology: A Promising Implement for Sustainable Agriculture*. In *New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering* (pp. 107-114). Elsevier.

Smith S.E., Read D.J., 1997. *Mycorrhizal symbiosis*. Academic Press, London, UK, 605p.

Smith, S.E., Read, D.J. (1997) *Mycorrhizal Symbiosis*, 2nd edn. Academic Press, London, 605P. In Gregory, P. J. (2008). *Plant roots: growth, activity and interactions with the soil*. John Wiley & Sons, 318P.

Smith, S.E., Read, D.J. (1997). *Mycorrhizal Symbiosis*. Academic Press, London, 605P. In Peterson, R. L., Massicotte, H. B., Melville, L. H. (2004). *Mycorrhizas: anatomy and cell biology*. NRC Research Press, 173P.

Soualmia, A. (2010). Biodiversité et isolement des symbiotes mycorrhiziens et symbiotes fixateurs d'azote d'*Alnus glutinosa* (L.Gaertn) et d'*Acacia melanoxylon* (R.) de la station du lac Tonga

(Nord-Est Algérien). Mémoire de magister, en écologie végétale et environnement, Faculté des sciences, Université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie. 125p.

Souza, T. (2015). Handbook of arbuscular mycorrhizal fungi. Cham: Springer, 153P.

Strullu D.G., 1991. Les mycorhizes des arbres et plantes cultivées. Technique et Documentation-Lavoisier, Paris. 3<sup>ème</sup> Edition, Paris, 250p.

Strullu D.G., 1989. Mycorhizes et culture *in vitro*. In : La culture *in vitro* et ses applications horticoles, AUGÉ R., BEACHESNE G., BOCCON-GIBOD J., DECOURTYE L., DIGAT B., JALOUZOT R., MINIER R., MORAND J.C., REYNOIRD J.P., STRULLU D.G., VIDALIE H.; Technique et Documentation – Lavoisier, Paris, 145-165.

Stumer, S.L et Morton, J.B., "Developmental patterns defining morphological characters in spores of species in *Glomus* (Glomales, Zygomycetes)", *Mycologia*, n° 89, (1997), 72-81.

Taylor, A. F. S. Alexander, I. (2005). The ectomycorrhizal symbiosis: life in the real world. *Mycologist*, 19: 102-112. In Duponnois, R., Hafidi, M., Ndoye, I., Ramanankierana, H., Bà, A. M. (2013). Des champignons symbiotiques contre la désertification: écosystèmes méditerranéens, tropicaux et insulaires, 511P.

Tedersoo, L., May, T.W. Smith, M.E. (2010). Ectomycorrhizal lifestyle in fungi: global diversity, distribution and evolution of phylogenetic lineages. *Mycorrhiza* 20: 217-263. In Duponnois, R., Hafidi, M., Ndoye, I., Ramanankierana, H., Bà, A. M. (2013). Des champignons symbiotiques contre la désertification: écosystèmes méditerranéens, tropicaux et insulaires, 511P.

Verma, A. S., Agrahari, S., Rastogi, S., & Singh, A. (2011). Biotechnology in the realm of history. *Journal of Pharmacy and Bioallied Sciences*, 3(3), 321.

Vosátka, M., Látr, A., Gianinazzi, S. et Albrechtová, J. (2012). Development of arbuscular mycorrhizal biotechnology and industry: current achievements and bottlenecks. *Symbiosis*, vol. 58, p. 29-37.

Wallander H., Wickman T., 1999. Biotite and microcline as potassium sources in ectomycorrhizal and non-mycorrhizal *Pinus sylvestris* seedlings. *Mycorrhiza*, 9: 25-32.

Zaretsky M., Sitrit Y., Mills D., Roth-Bejerano N., Kagan-Zur V., 2006. Differential expression of fungal genes at preinfection and mycorrhiza establishment between *Terfezia boudieri* isolates and *Cistus incanus* hairy root clones. *New Phytol.*, 171: 837-846.