

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et populaire

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Université M'Hamed Bougara de Boumerdes

جامعة محمد بوقرة بومرداس

Faculté des Sciences

En vue de l'obtention du Diplôme de Master II en Agronomie

Option: Production végétale



Thème :

Synthèse bibliographique sur la symbiose  
mycorhizienne des cultures céréalières

**Réalisé par :**

- AZZOUNI ZOHOUR
- KHABABA RANIA

**Encadré par :**

- Mme : TAIBI HASSIBA

**Jury de soutenance :**

Mme. CHEBOUTI Nadjiba

Professeure

UMBB

Présidente

Mme. ABDELAOUI Karima

M.A.A.

UMBB

Examinatrice

Mme. TAIBI-HADJYOUCEF Hassiba. M.A.A.

UMBB

Promotrice

Année universitaire 2019-2020

## **Remerciement**

Tout d'abord nous adressons nos remerciements à Allah le tout puissant qui nous a donné la santé, la volonté et la patience durant toutes ces années d'études et pour la réalisation de ce modeste travail que nous espérons être utile.

Nous tenons à exprimer nos profondes et respectueuses gratitude, et nos remerciements les plus sincères à notre directrice de travail Mme Taibi Hadjyoucef pour ses conseils, ses orientations professionnelles ainsi que sa patience, son soutien moral et la qualité de son suivi durant toute la période de ce travail.

Nous tenons également à remercier très sincèrement Madame la présidente Chabouti Nadjia qui nous a fait l'honneur et le plaisir de régenter ce jury.

Nous adressons nos vifs remerciements à Madame Abdellaoui Pour avoir accepté d'examiner et de juger ce travail

Nos remerciements s'adressent également à tous nos professeurs pour leurs générosités, et leur grande patience pour assurer notre formation durant ces deux années.

Enfin, nos remerciements les plus sincères et les plus chaleureux vont à nos familles et nos amis qui nous ont encouragés, soutenus et ont crus en nous en toutes circonstances

## *Dédicace*

---

### **Dédicace**

*Je dédie ce modeste travail accompagné d'une profonde reconnaissance à :*

*Mon dieu l'unique maître des terres et des cieux.*

*À la personne la plus chère à mes yeux Hafidha, la femme qui m'a appris le vrai sens de l'amour, qui m'a éduqué avec tout son amour, patience, soutien conseils et appuis continuels, ma très chère maman ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force, quoique je fasse ou que je dise, je ne saurais point te remercier comme il se doit.*

*À l'homme le plus gentil et le plus généreux au monde Nasseredine, qui m'a appris le vrai sens de la vie, qui m'a encouragé et soutenu durant chaque étape de ma vie, mon très cher père merci pour ton amour, ton encouragement permanent, ta générosité et ta confiance, je te dois le mérite pour ce que je suis devenue aujourd'hui. Que dieu vous préserve et vous accorde santé et longue vie.*

*À mes très chers frères, Chakib et Mohamed qui ont toujours été là pour moi, merci d'être à mes côtés.*

*À les plus adorables tantes au monde Fouzia Osmani et Malika Amrouche, votre soutien fut une lumière dans tout mon parcours, aucun mot ne saurait exprimer l'amour, la considération et le respect que j'ai toujours eu pour vous.*

*À la mémoire de mes chères grand-mères Fatima zohra et Chelbiya, que dieu le tout puissant les accueille en son vaste paradis.*

*A ma binôme ZOHOUR , merci pour ta générosité et pour les bons moments qu'on a passés ensemble durant ces deux années d'étude*

*à mes copines Chanez, Bouthaina, Sabrina, Hadjer et Faten ce n'est pas vous que je vais remercier mais je remercie le bon Dieu d'avoir croisé nos chemins, vous êtes pour moi des sœurs pour qui je pourrai compter toute ma vie, en témoignage de l'amitié qui nous unit, les bons souvenirs, les fous rires, les moments précieux que nous avons passés, je vous remercie de m'aimer telle que je suis avec mes défauts et qualités et je vous souhaite une vie pleine de santé et bonheur.*

*Je dédie ce travail à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à ma réussite,*

*À tous ceux que j'aime. Merci.*

*Rania*

## *Dédicace*

---

### **Dédicace**

*Tout d'abord, je tiens à remercier DIEU de m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.*

*Je dédie cette thèse :*

*A mes chers parents, toute l'encre du monde ne pourrait suffire pour exprimer mes sentiments envers vous*

*. Vous avez toujours été mon école de patience, de confiance et surtout d'espoir et d'amour.*

*Vous êtes et vous resterez pour moi ma référence, la lumière qui illumine mon chemin. Ce travail est le résultat de l'esprit de sacrifice dont vous avez fait preuve, de l'encouragement et le soutien que vous ne cessez de manifester, j'espère que vous y trouverez les fruits de votre semence*

*A ma chère sœur Yasmine pour son encouragement permanent, et son soutien moral, aucune dédicace ne peut exprimer mon amour et ma gratitude de t'avoir comme sœur*

*A mes chers frères, Chakib et Issam pour leur appui et leur encouragement,*

*A mon mari, Pour l'amour et l'affection qui nous unissent. Je ne saurais exprimer ma profonde reconnaissance pour le soutien continu dont tu as toujours fait preuve. Tu m'as toujours encouragé, incité à faire de mon mieux, ton soutien m'a permis de réaliser le rêve tant attendu. Je te dédie ce travail avec mes vœux de réussite, de prospérité et de bonheur*

*A mon petit fils Abd el rahim , C'est à toi mon adorable ange ,ma joie , mon petit trésor que maman dédie ce travail pour te dire que tu resteras pour toujours le rayon du soleil qui égaye ma vie . Je t'aime mon bébé et je te souhaite tous le bonheur du monde*

*A tata Khalida , merci pour son soutien et son encouragement et sa présence surtout*

*A mon binôme Rania, merci beaucoup pour ta patience*

*A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,*

*A mes chères amies Amel, Amina, Dounia, Fella , Houda,Rima ,en souvenir des moments heureux passés ensemble, avec mes vœux sincères de réussite, bonheur, santé et de prospérité.*

*Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infallible,*

*Merci d'être toujours là pour moi*

**ZOHOUR**

# Liste des abréviations

---

## SOMMAIRE :

|                        |    |
|------------------------|----|
| Remerciements          |    |
| Dédicaces              |    |
| Liste des abréviations |    |
| Liste des figures      |    |
| Liste des tableaux     |    |
| INTRODUCTION.....      | 01 |

## Partie I : les mycorhizes

|   |    |
|---|----|
| 1.1-Définition.....   | 04 |
| 1.2-Les différents types de mycorhizes et leur organisation .....                               | 04 |
| 1.2.1-Les principales caractéristiques des endomycorhizes arbusculaires et ectomycorhizes ..... | 05 |
| 1.2.1.1-Les ectomycorhizes .....  | 05 |
| 1.2.1.2-Les endomycorhizes.....   | 07 |
| 1.3 -L'établissement de la symbiose mycorhizienne a arbuscules .....                            | 08 |
| 1.3 .1-Les différents stades de pénétration .....   | 08 |
| 1.3 .2-les structures spécifiques des CMA.....  | 10 |
| 1.3 .2.1-les hyphes .....   | 10 |
| 1.3.2 .2-les arbuscules .....   | 11 |
| 1.3.2.3-les vésicules .....   | 11 |
| 1.3 .3-fonctionnement de la symbiose mycorhizienne arbusculaire.....                            | 12 |
| 1.4-classification des mycorhizes .....   | 14 |
| 1.5-Rôle des mycorhizes .....   | 17 |
| 1.5.1- Absorption des éléments minéraux .....   | 17 |
| 1.5.2- Absorption de l'eau.....   | 17 |
| 1.5.3- Protection des racines contre les substances toxiques .....                              | 18 |
| 1.5.4-Agrégation des sols .....   | 19 |
| 1.5.5-Régulation de la croissance .....   | 19 |
| 1.5.6-Resistance au stress .....  | 19 |
| 1.5.7- la lutte biologique .....  | 20 |
| 1.5.8- l'augmentation des rendements.....   | 21 |
| 1 .6-L'installation des mycorhizes.....   | 22 |

## Liste des abréviations

|  |    |
|--|----|
| 1 .6.1-la mycorhization naturelle.....           | 22 |
| 1.6.2-la mycorhization artificielle.....         | 22 |
| 1 .6.3-Pratiques favorables aux mycorhizes ..... | 23 |

## Partie II : Les céréales

|   |    |
|---|----|
| 2.1-Généralités.....  | 24 |
| 2 .2-Caractéristiques morphologiques des céréales.....            | 25 |
| 2 .2.1-L'appareil végétatif des céréales .....                    | 25 |
| 2.2.2-Les racines.....  | 25 |
| 2.2.3-Les tiges.....  | 26 |
| 2.2.4-Les Feuille .....   | 27 |
| 2.2.5-L'appareil reproducteur.....                                | 27 |
| 2 .2.5 .1-L'épi.....  | 27 |
| 2 .2.5 .2-Le Grain.....   | 28 |
| 2.3-Importance économique des céréales.....                       | 29 |
| 2.3.1- Au niveau mondial.....                                     | 29 |
| 2.3.2-En Algérie.....   | 29 |
| 2 .4-La culture des céréales.....                                 | 32 |
| 2 .5-Le cycle de développement des céréales.....                  | 33 |
| 2 .5.1-Croissance et développement.....                           | 34 |
| 2 .5.1.1-Le cycle végétatif.....                                  | 34 |
| 2 .6-EXIGENCES culturelles des céréales.....                      | 36 |
| 2 .6.1-EXIGENCES pédoclimatiques.....                             | 36 |
| 2 .6 .2-Les conduites culturelles.....                            | 36 |
| 2 .7-Les contraintes limitant la productivité céréalière.....     | 41 |
| 2 .7.1-Les contraintes abiotiques.....                            | 41 |
| 2 .7.2-Les contraintes biotiques.....                             | 41 |
| 2 .7.3-Les principaux problèmes phytosanitaires des céréales..... | 41 |

## Partie III : la mycorhization chez les céréales

|   |    |
|---|----|
| 3.1- Les structure de l'association endomycorhizienne observées chez les céréales | 45 |
| 3.1.1- Les hyphes intra-racinaires .....  | 45 |

## Liste des abréviations

---

|  |           |
|--|-----------|
| <b>3.1.2- Les arbuscules .....</b>   | <b>45</b> |
| <b>3.1.3- Les vésicules .....</b>  | <b>45</b> |
| <b>3.1.4- Les mycéliums fongiques .....</b>  | <b>45</b> |
| <b>3.1.5- Les spores .....</b>   | <b>47</b> |
| <br>   |           |
| <b>3.2- La biodiversité des CMA au niveau des cultures céréalières:</b>                          | <b>47</b> |
| <b>3.3- L'inoculation par des souches de CMA .....</b>   | <b>48</b> |
| <b>3.4- Méthodes de quantification de CMA chez les céréales.....</b>                             | <b>50</b> |
| <b>3.5- Effet des inoculations mycorhiziennes sur les espèces céréalières .....</b>              | <b>50</b> |
| <b>3.5.1-Paramètres morphologiques .....</b>   | <b>50</b> |
| <b>3.5.2Paramètres physiologiques .....</b>  | <b>51</b> |
| <b>3.5.3-Bio protection contre les stress environnementaux .....</b>                             | <b>52</b> |
| <b>3.5.3.1-Stress abiotiques .....</b>   | <b>52</b> |
| <b>3.5.3.2- Les stress biotiques .....</b>   | <b>53</b> |
| <b>3.6-Les mécanismes de défense induits par le champignon<br/>mycorhizien arbusculaire.....</b> | <b>53</b> |
| <b>3.7-La réponse différentielle des espèces céréalières à la symbiose mycorhizienne</b>         | <b>54</b> |
| <br>   |           |
| <b>Conclusion.....</b>   | <b>56</b> |
| <b>Résumés .....</b>   | <b>57</b> |
| <b>Références bibliographiques</b>   |           |

## Liste des abréviations

---

### Liste des abréviations

(SAU) : superficie agricole utile.

(VAM) : mycorhize à arbuscules et à vésicules.

(AV) : arbuscule et vésicule.

(PPA) : pré-pénétration apparatus, appareil de pré-pénétration.

(CMA) : champignon mycorhizien arbusculaire.

(MA) : mycorhize arbusculaire.

(+MA) : mycorhizé.

(-MA) : non mycorhizé.

(HAP) : hydrocarbure aromatique polycyclique.

Kg/ha : kilogramme / hectare.

M : mètre.

Mg : milligramme.

Cm : centimètre.

C° : degré Celsius.

T° : température.

PH : potentiel hydrogène.

% : pourcentage.

Kg/q : kilogramme/ quintal.

PMG : poids de mille grains.

ATP : molécule d'adénosine triphosphate.

m<sup>2</sup> : mètre carré.

m<sup>3</sup> / ha : mètre cube / hectare.

T/ ha : tonne / hectare.

µm : micromètre.

(LSU) : large sous unité.

K : potassium.

P : phosphore.

N : azote.

## Liste des abréviations

---

$\text{Ca}^{2+}$  : l'ion de calcium.

$\text{CO}_2$  : dioxyde de Carbone.

$\text{H}_2\text{O}_2$  : Le peroxyde d'hydrogène

$\text{NH}_3$ : ammoniac.

$\text{NH}_4^+$  : l'ion ammonium.

$\text{K}_2\text{O}$  : oxyde de potassium.

$\text{P}_2\text{O}_5$  : pentoxyde de phosphore

$\text{NaCl}$  : le chlorure de sodium.

gs : conductance stomatique.

SD : densité stomatique.

(JA) : acide jasmonique.

(ABA) : acide absicique.

(AS) : acide salicylique.

(Pi) : phosphate inorganique.

(ETM) : éléments traces métallique.

(RIM) : résistance induite par les mycorhizes.

(PAL) : phénylalanine ammonia-lyase.

(LTP) : lipid transfer protien.

MADR : ministère de l'agriculture et du développement rural.

ONFAA : observation nationale des filières agricoles et agroalimentaires.

ENOD 11 : early nodulin 11.

AEGISSYM :aegisym microgranules.

## LISTE DES FIGURES

### LISTE DES FIGURES

|   |    |
|---|----|
| <b>Figure n° 1</b> : Principaux types mycorhiziens représentés sur une coupe transversale de racines.....                         | 04 |
| <b>Figure n°2</b> : Ectomycorhize formée entre une racine de <i>Pinus radiata</i> et de <i>Suillus brevipes</i> .....             | 05 |
| <b>Figure n°3</b> : Coupe de mycorhize schématisant la pénétration du champignon dans la racine.....                              | 07 |
| <b>Figure n°4</b> : Schéma des différentes étapes de colonisation des champignons Mychoriziens arbusculaires.....                 | 08 |
| <b>Figure n° 5</b> : schématisation de l'établissement de la symbiose mycorhizienne (A) et de cycle de vie des CMA (B).....       | 10 |
| <b>Figure n° 6</b> :Arbuscule de <i>glomus</i> développé dans une cellule racinaire.....  | 11 |
| <b>Figure n°7</b> : Les vésicules formées dans la couche superficielle de la racine .....   | 12 |
| <b>Figure n°8</b> :Les différentes structures spécifiques des CMA .....   | 12 |
| <b>Figure n°9</b> : Caractéristiques morphologiques des spores de CMA .....   | 15 |
| <b>Figure n°10</b> : Illustration de la diversité de couleur et de forme des spores Et des hyphes suspenseurs de CMA isolés ..... | 16 |
| <b>Figure n°11</b> : comparaison des plantules mycorhizées et plantules non mycorhizées .....                                     | 16 |
| <b>Figure n°12</b> : Céréale de printemps .....   | 24 |
| <b>Figure n°13</b> : Céréales d'été .....   | 25 |
| <b>Figure n°14</b> : Le maïs.....   | 25 |
| <b>Figure n°15</b> : Racines des poacées graminées (système racinaire fasciculé et pivotant) ....                                 | 26 |
| <b>Figure n°16</b> : Shéma d'une tige de céréale .....  | 26 |
| <b>Figure n°17</b> :L'appareil reproducteur.....  | 27 |
| <b>Figure n°18</b> : L'épi.....   | 28 |
| <b>Figure n°19</b> : La fleur.....  | 28 |
| <b>Figure n°20</b> : Le grain.....  | 29 |
| <b>Figure n°21</b> : Carte schématique représentant les zones céréalières de l'Algérie .....                                      | 30 |
| <b>Figure n°22</b> : La production nationale de blé dur, blé tendre et de l'orge en 2015 .....                                    | 31 |
| <b>Figure n°23</b> : La superficie emblavée et récolté par (ha) 1 blé dur 2 blé tendre et 3 orge (2013/2015).....                 | 31 |
| <b>Figure n°24</b> : Graphe représentant la production céréalière en Algérie entre (2000/2018)..                                  | 32 |
| <b>Figure n°25</b> : Cinq grandes zones agro climatiques en Algérie .....   | 33 |
| <b>Figure n°26</b> : Cycle de développement des céréales.....   | 34 |
| <b>Figure n°27</b> : Hyphe ramifié en spirale dans les racines de blé inoculé par les <i>Acaulosporangées</i> .....               | 46 |
| <b>Figure n°28</b> : Ramification des arbuscules le long racine inoculée par <i>Glomus sp</i> .....                               | 46 |
| <b>Figure n°29</b> : Arbuscule dans les racines de blé inoculées par <i>Scutellospora</i> .....                                   | 47 |
| <b>Figure n°30</b> : Schéma légendé des spores mycorhiziens.....  | 47 |
| <b>Figure n°31</b> : Les bio fertilisants.....  | 48 |
| <b>Figure n°32</b> : Mycorhization d'un essai de céréales .....   | 49 |

## Liste des tableaux

---

### Liste des tableaux :

|  |    |
|--|----|
| <b>Tableau n°1</b> : Les caractéristiques spécifiques aux endomycorhizes à vésicules et aux ectomycorhizes .....   | 06 |
| <b>Tableau n°2</b> : Les principaux genres de champignons formant des endomycorhizes à vésicules et à arbuscules.....  | 16 |
| <b>Tableau n°3</b> : Les pratiques défavorables aux mycorhizes et les solutions proposés.....  | 23 |
| <b>Tableau n°4</b> : La production céréalière en Algérie entre (2000/2018).....  | 32 |
| <b>Tableau n°5</b> : Les exigences pédoclimatique .....  | 36 |
| <b>Tableau n°6</b> : Les différentes conduites culturales.....   | 37 |
| <b>Tableau n°7</b> : Les espèces mychoriziens (CMA) recensées sur céréales au niveau de plusieurs zones agro<br>écologiques.....   | 48 |
| <b>Tableau n°8</b> :Importance des associations mycorhiziennes pour certaines grandes<br>cultures.....   | 49 |
| <b>Tableau n°9</b> : Tableau récapitulatif des contraintes étudiées à travers l'inoculation des<br>espèces céréalières par des espèces mycorhiziennes arbusculaires..... | 51 |



**INTRODUCTION  
GENERALE**

## **Introduction générale**

De nos jours il est devenu essentiel d'adopter de nouvelles approches pour réaliser un développement durable et assurer le renouvellement des ressources naturelles, pour cela les agronomes et producteurs sont de plus en plus conscients que la base d'une agriculture durable est le maintien d'un écosystème riche et diversifié dans le sol et ils ont pensé se retourner vers la nature pour chercher l'intérêt économique chez les microorganismes à travers les associations qu'ils forment avec leurs plantes hôtes.

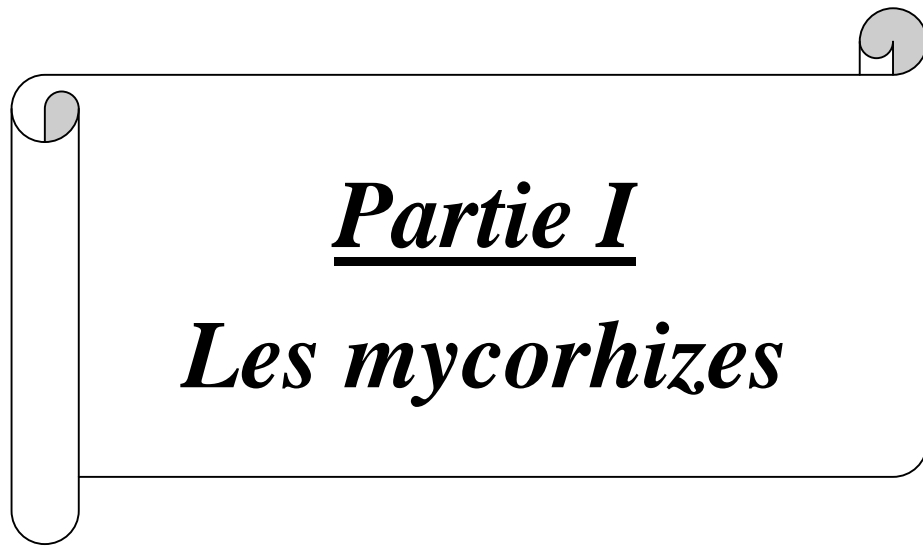
A l'heure du développement durable les mycorhizes apparaissent comme un élément de base des différents services éco systémiques rendus par la nature à l'homme, dans ce contexte la présence et/ou l'utilisation des mycorhizes représentent un des enjeux majeurs pour une agriculture plus durable visant à réduire l'usage des pesticides et permettant une augmentation de la production végétale.

La mycorhize signifie une association symbiotique entre les racines d'une plante et un champignon du sol. Ce type de symbiose date de plus de 450 millions d'années. D'ailleurs les experts croient que ce sont les mycorhizes qui ont permis l'établissement des végétaux sur la terre ferme, les racines primitives des premiers végétaux terrestres étant peu adaptées aux conditions plus sèches des sols. Actuellement, on estime que plus de 80 % des espèces végétales sont colonisées par les différents groupes de mycorhizes. On retrouve les ectomycorhizes chez la plupart des arbres forestiers, les éricoïdes chez les éricacées, les orchidoïdes chez les orchidacées et les mycorhizes arbusculaires chez la plupart des plantes herbacées dont les cultures céréalières qui sont les plus consommées à l'échelle mondiale et qui constituent même l'alimentation de base des pays en développement et plus particulièrement dans les pays maghrébins, ils sont également considérées parmi les principales filières de la production agricole en Algérie. (Lounès-hadj Sahraoui, 2013)

La production des céréales occupe environ 80% de la superficie agricole utile (SAU) du pays, la superficie emblavée annuellement en céréales se situe entre 3 et 3,5 million d'ha, la superficie annuellement récoltée représente 63% des emblavures elle apparait donc comme une spéculation dominante, et ces dernières ont des problèmes d'installation dues au stress environnementaux biotiques et abiotiques tels que la sécheresse, le froid, les pathogènes racinaires, et la carence en éléments fertilisants.(Djermoune, 2009)

C'est dans ce cadre d'idées que s'insère notre travail qui constitue une synthèse bibliographique sur les travaux réalisés sur la mycorhization des céréales. Cette synthèse a

visé plusieurs aspects depuis la définition et la caractérisation des mycorhizes jusqu'à l'évaluation du taux de mycorhization et leur utilisation comme inoculum bio fertilisant facilitant l'absorption de l'eau et des éléments minéraux, la croissance, la tolérance au stress biotiques et abiotiques et la résistance aux infections pathogènes. Ces études recensées à l'échelle mondiale ont eu pour objectifs d'améliorer l'installation des cultures céréalières d'améliorer leur productivité et de réduire leur dépendance aux engrais chimiques des céréales à partir des études et travaux qui ont été fait sur.



**Partie I**

***Les mycorhizes***

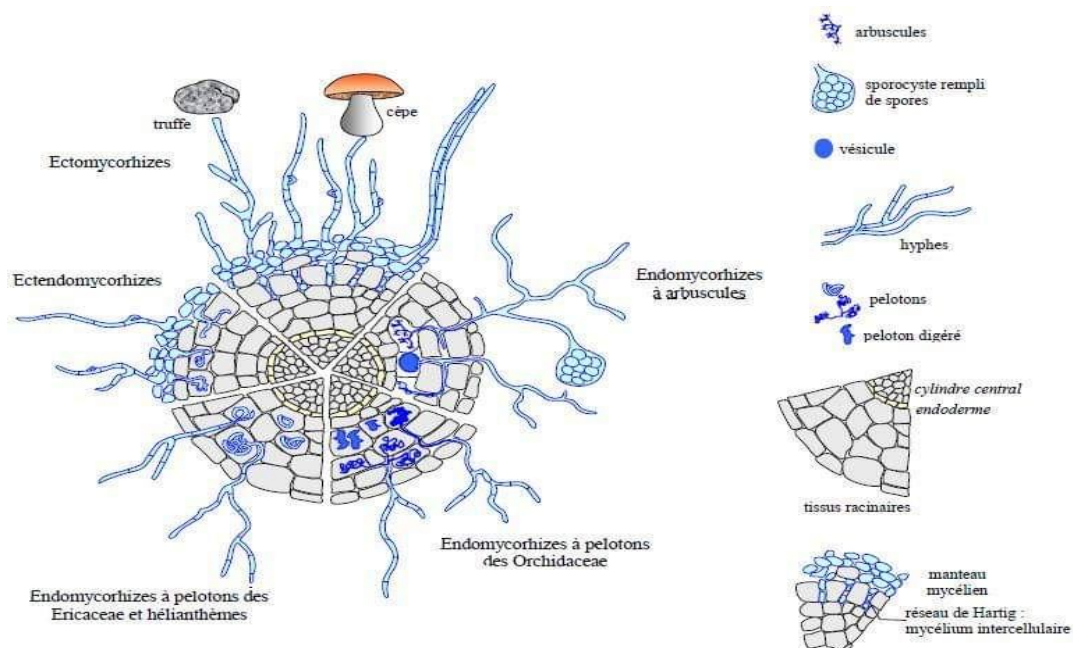
## Partie I : Les mycorhizes :

### 1.1. Définition :

Les mycorhizes (du grec myco, champignon et rhiza, racine) sont des organes mixtes formés par des racines de plantes hôtes et des champignons symbiotes du sol (Davet, 1995 ; Cet organe constitue la résultante de la symbiose mutualiste mycorhizienne existante entre une grande majorité des espèces de plantes et une diversité d'espèces de champignons. Presque toutes les cultures agricoles sont capables de ce type d'association, à part les plantes de la famille des Brassicaceae (choux, colza, moutarde...). (B. Brunel ; 2011)

### 1.2. Les différents types de mycorhizes et leur organisation :

D'après Duhoux et Nicole (2004) Il existe plusieurs types de mycorhizes, distincts par leur morphologie et le type de champignons qui les engendrent. Les deux types les plus importants sont les ectomycorhizes (associations entre des arbres et des champignons Basidiomycètes) et les endomycorhizes vésiculaires à arbuscules, présents chez à peu près 70% des espèces de plantes, dont la plupart des cultures. On distingue aussi ; les ectendomycorhizes, qui sont des formes intermédiaires entre les deux groupes précédents parmi eux on cite les mycorhizes de type arbutoïde (du nom de l'arbousier *Arbutus unedo*) formant des hyphes sous forme de pelotons intracellulaires. Un autre type d'endomycorhizes est observé chez des Orchidaceae, des Monotropaeae et des Ericaceae.



**Figure n°1** : Principaux types mycorhiziens représentés sur une coupe transversale de racines d'après (le Tacon ; 1985)

### 1.2.1. Les principales caractéristiques des endomycorhizes arbusculaires et des ectomycorhizes :

**1.2.1.1. Les ectomycorhizes :** Les ectomycorhizes sont ainsi appelées du fait que leurs champignons se développent autour des racines en formant un manchon feutré de filaments très abondants donnant des racines courtes très caractéristiques et facilement visibles à l'œil nu (Girard et *al.*, 2005). A partir de ce manteau, des filaments mycéliens progressent dans le sol pour former le réseau extra-matriciel, d'autres hyphes pénètrent à l'intérieur de la racine en séparant les cellules au niveau de la lamelle moyenne formant ainsi le réseau de Hartig ( ; Strullu, 1991).



**Figure n°2 :** Ectomycorhizes formée entre une racine de *Pinus radiata* et de *Suillus brevipes* - Brundrett. 2008.

**Le manteau fongique :** le plus souvent, le manteau fongique enveloppe complètement l'apex racinaire d'abord avec la coiffe, puis avec l'assise pilifère, la racine alors ne produit plus de poils absorbants. Il peut représenter jusqu'à 40% du poids sec de la racine (Durieu, 1993).

**Le réseau de Hartig :** le réseau de Hartig se forme entre les cellules de l'assise pilifère et les premières cellules corticales. Ce réseau représente le site d'échanges entre les champignons et les cellules corticales de la racine (Duhoux et Nicole, 2004 ; ; Strullu, 1991).

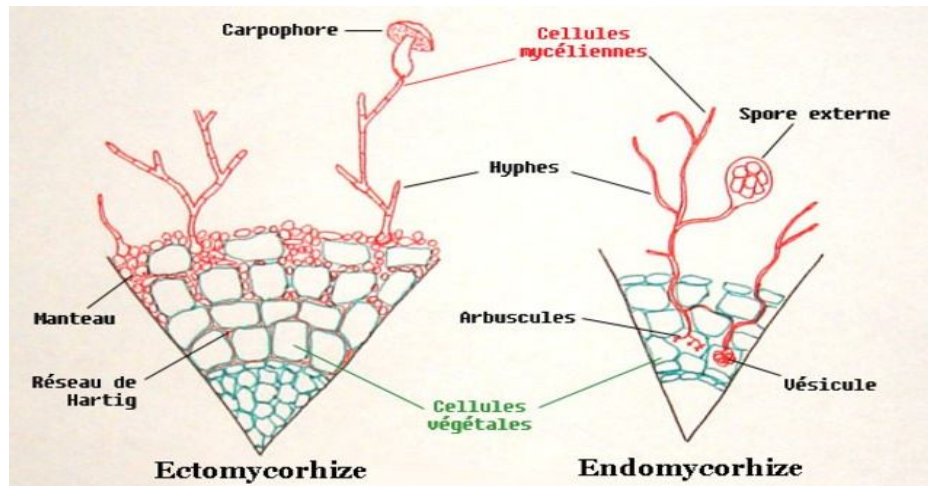
**Le réseau extra-matriciel :** selon Duhoux et Nicole (2004), ce réseau est un ensemble de filaments qui explorent le sol pour assurer la nutrition minérale de la plante hôte. La contamination a lieu après la germination des spores stimulées par les exsudats racinaires, ou simplement de racine à racine. Un même arbre peut être infecté par plusieurs champignons ectomycorhizogènes différents. Les espèces qui s'installent les premières sont en général les moins spécialisées, elles sont remplacées progressivement par des espèces plus spécialisées, et un même arbre peut avoir à la fois des ecto et des endomycorhizes.

La symbiose ectomycorhizienne est surtout le fait des plantes ligneuses. L'interaction concerne seulement 3 à 5 % des plantes à graines, mais la vaste répartition géographique de ces espèces en fait un atout écologique et parfois économique important pour les essences forestières concernées. De nombreux arbres ou arbustes forment une symbiose ectomycorhizienne. On l'observe chez les Gymnospermes : des Pinaceae (sapin, mélèze, épicéa, pin, etc.) et chez les Angiospermes, principalement des dicotylédones comme les Fagaceae (hêtre, chêne, châtaignier), les Myrtaceae (Eucalyptus) et des familles de plantes tropicales (Dipterocarpaceae et des Caesalpinoideae) (Duhoux et Nicole, 2004). Cependant les ectomycorhizes ne sont pas réservés exclusivement aux arbres. On en retrouve aussi sur les plantes herbacées (Polygonacées, Cypéracées) dans les régions arctiques. On ne connaît pas d'ectomycorhizes chez les monocotylédones (Davet, 1995). Contrairement aux endomycorhizes, les ectomycorhizes sont nombreuses (environ 5000 espèces fongiques qui forment des associations avec plus de 2000 partenaires) et appartiennent aux Ascomycotina ou Basidiomycotina (familles des Amanitaceae, Tricholomataceae, Rhizopogonaceae et Boletaceae) dont les cycles sexués sont généralement bien connus (Vidhyasekaran, 2004).

**Tableau n°1 :** Les caractéristiques spécifiques aux endomycorhizes à vésicules et aux ectomycorhizes.

| Caractéristiques      | Types de mycorhizes   |   |
|-----------------------|---|---|
|                       | Endomycorhizes à arbuscules (AM)                            | Ectomycorhizes                                      |
| Champignon            |   |   |
| Hyphes cloisonnés     | -   | +   |
| Hyphes non cloisonnés | +   | -   |
| Intracellulaire       | +   | -   |
| Manteau               | -   | +   |
| Réseau de Hartig      | -   | +   |
| Vésicules             | + ou -  | -   |
| Arbuscules            | +   | -   |
| Taxonomie             | Zygomycètes<br>Gloméromycètes                               | =<br>Basidiomycètes<br>Ascomycètes<br>Zygomycètes   |
| Plantes               | Bryophytes<br>Ptéridophytes<br>Gymnospermes<br>Angiospermes | Rares Ptéridophytes<br>Gymnospermes<br>Angiospermes |

Source : (Davet, 1995 ;).

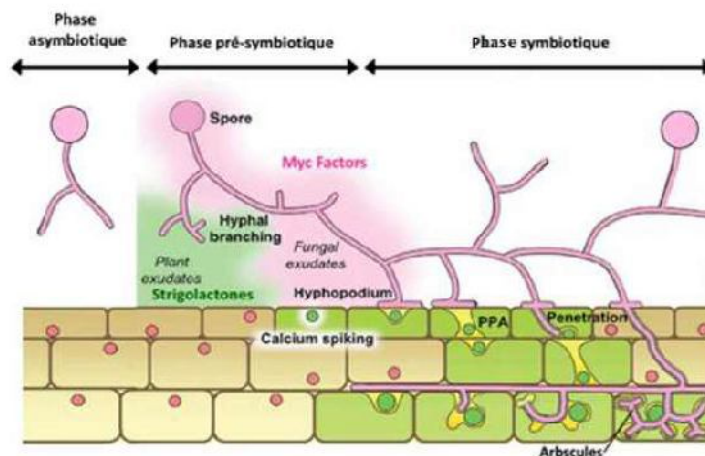


**Figure n°3 :** Coupe de mycorhize schématisant la pénétration du champignon dans la racine

Source :(futura planète,2001)

**1.2.1.2. Les endomycorhizes :** D'après Davet, 1995, les endomycorhizes à vésicules et à arbuscules (VAM) sont les plus communes et probablement les plus anciennes des mycorhizes. Présentes chez la plupart des grandes familles botaniques (à l'exception des Chénopodiacées et des Cruciféracées), elles concernent presque toutes les plantes cultivées et se rencontrent aussi bien sur les arbres forestiers que sur 85% des plantes herbacées (). C'est ainsi qu'aujourd'hui, les endomycorhizes à vésicules et à arbuscules (VAM) se trouvent sous tous les climats dans tous les écosystèmes et ce, indépendamment du type de sol, de la végétation ou des conditions de croissance).

### 1.3. L'établissement de la symbiose mycorhizienne a arbuscules :



**Figure n°4 :** schéma des différentes étapes de colonisation des champignons mycorhiziens arbusculaires adapté d'après (Bonfante et al ; 2010)

### 1.3.1. Les différents stades de pénétration :

Sawers et *al.*(2008) ont montré que l'établissement de la symbiose mycorhizienne induit chez la plante des modifications anatomiques et physiologiques, en partie dues à l'expression de gènes chez la plante codant des molécules inexistantes chez une autre plante non mycorhizée. Avant toute formation, les mycorhizes se retrouvent sous forme de spores puis subissent plusieurs phases de développement (Figure n°4).

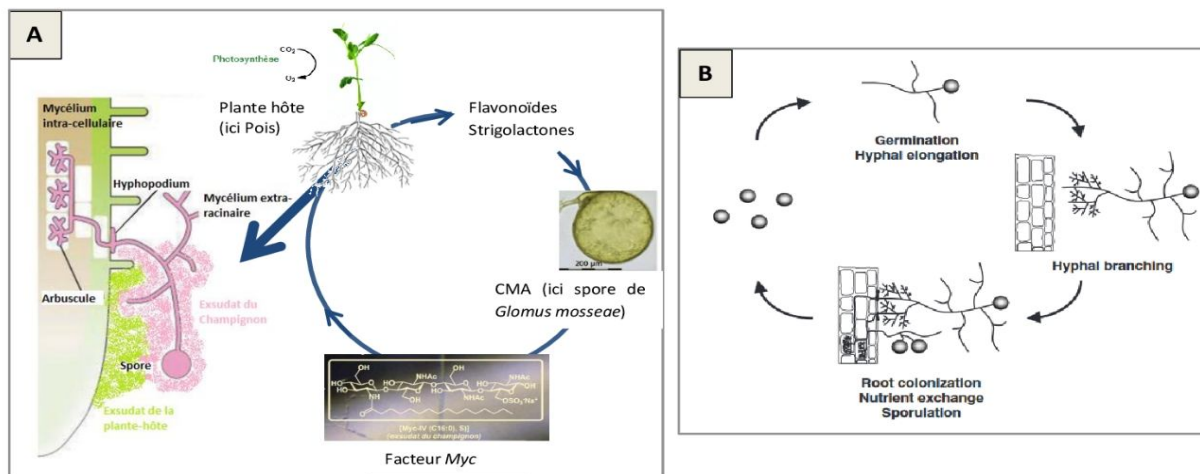
**Phase a-symbiotique :** Avant tout contact, en conditions favorables, les spores peuvent germer et former un tube germinatif et survivre jusqu'à rencontrer un hôte. Si aucune rencontre n'est réalisée, les spores se scindent et reviennent en spores initiales (Figure n°4).

**Phase pré-symbiotique :** L'établissement de la symbiose entre la plante et le CMA s'effectue via un échange de signaux moléculaires. La reconnaissance entre le champignon et la plante-hôte met en jeu les exsudats racinaires et fongiques, les flavonoïdes et les strigolactones, des substances chimiques émises par la plante-hôte, vont stimuler l'activité métabolique du champignon (Stevenin, 2011 ; Gavériaux, 2012). Elles vont induire chez le CMA l'expression du gène *Myc* puis de facteurs *Myc*. Ces facteurs *Myc* vont induire des déformations dans les cellules de l'hôte pour l'établissement de la symbiose, ainsi que la croissance des hyphes colonisant les racines (Stevenin, 2011). Une spore de champignon germe, le mycélium croît en direction de la racine, et lorsque le champignon perçoit la présence d'une plante hôte, il manifeste une réaction typique de ramification intense des hyphes appelée « branching » (Figure n°4).

**Phase symbiotique :** Les hyphes adhèrent ensuite aux parois externes des cellules de la racine, formant un hyphopodium, avant de les perforer en sécrétant des enzymes qui vont détruire la cellulose. La formation d'un hyphopode, est hautement contrôlée par la concentration en phosphate et, plus cette concentration est grande, moins d'hyphopodes sont formés (Balzergue et *al.* 2011). Lorsque les conditions sont favorables, notamment avec un taux réduit de phosphate et l'hyphopode fixé, la plante se prépare à la pénétration du champignon en développant un appareil de pré-pénétration (PrePenetration Apparatus - PPA) (Genre et *al.* 2005). Cet appareil forme un "tunnel" où les hyphes du champignon peuvent alors y pénétrer et atteindre le cortex racinaire. (Camille Devineau 2015). Une fois à l'intérieur de la cellule, les hyphes se ramifient par dichotomie en donnant des hyphes ayant un diamètre de plus en plus petit ; à partir d'un hyphe initial de 10 µm de diamètre, les dernières ramifications peuvent atteindre moins de 1µm de diamètre. L'ensemble de ces ramifications

prend une forme de petit arbre : les arbuscules, lieux des échanges symbiotiques, qui donnent le nom à ces champignons (Gavériaux, 2012 ; Garbaye, 2013).

Akiyama et *al.*(2007) ont trouvé qu'après différenciation des structures intra-racinaires, le champignon produit des spores à partir de son mycélium extra-racinaire. Les spores ainsi formées développent des tubes germinatifs qui peuvent s'étendre sur plusieurs centimètres dans le sens des racines actives et donne une infection primaire des racines ; et Tommerup, (1984) a trouvé que chez certaines espèces, des vésicules intra-radiculaires, se différencient dans le cortex racinaire et possèdent des propriétés analogues à celles des spores. Les segments des racines morts ou vivant peuvent être une source d'inoculum pour les racines nouvellement développées.



**Figure n°5** : schématisation de l'établissement de la symbiose mycorhizienne (A) et de cycle de vie des CMA (B) (Akiyama, 2007)

### 1.3.2. Les structures spécifiques des CMA :

#### 1.3.2.1. les Hyphes :

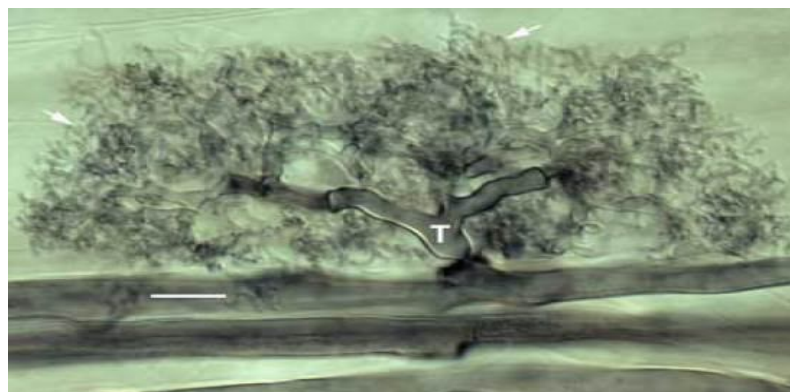
Selon Y. Dalpé., (2005) les hyphes sont des filaments coenocytique qui colonisent à la fois le sol et les racines en établissant un pont entre la rhizosphère et la plante.

D'un point de vue morphologique, les hyphes des CMA sont coenocytiques (hyphes dépourvus de septa) (Reinhardt, 2007). La plupart des noyaux bougent ainsi librement dans les hyphes bien que certains situés en position latérale semblent immobiles (Bago et *al* ,1999) Les hyphes intra-radiculaires sont reliés aux arbuscules et se prolongent de façon extra-radiculaires dans le sol. Elles se propagent dans le sol créant ainsi un réseau mycélien qui peut atteindre des longueurs importantes allant jusqu'à plusieurs dizaines de mètres par gramme de

sol (Leake et al, 2004). La capacité des différents CMA à former ces réseaux mycéliens peut différer (Voets et al ; 2006). Les CMA étant des biotrophes obligatoires, l'exploration du sol par le réseau mycélien participe à la survie du champignon car cela leur permet de rencontrer d'autres plantes hôtes. De plus, le réseau mycélien absorbe les éléments nutritifs de sol (azote, phosphore) agissant comme une extension du système racinaire des plantes dans le sol (Newman et Reddell, 1987) fonction sine qua non au statut symbiotique des CMA. En fonction de leur activité principale, on peut distinguer plusieurs types d'hyphes extraracinaires :

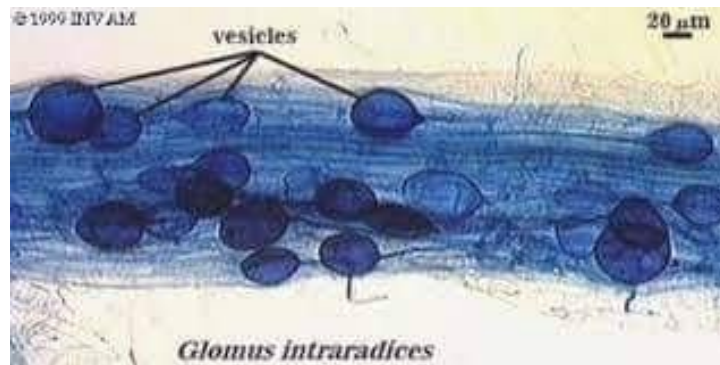
- Les hyphes d'absorption, très ramifiées et minces, elles prélèvent les molécules du sol
- Les hyphes conducteurs ayant un diamètre plus important et un cytoplasme peu abondant
- Les hyphes d'infection qui peuvent coloniser de nouvelles racines
- Les hyphes sporogènes qui donneront naissances aux spores. (M. Peyret-guzzon ;2014)

**1.3 .2.2. Les arbuscules :** les arbuscules sont constitués de structures fongiques très ramifiées (Duhoux et Nicole, 2004). Enveloppé par une membrane péri arbusculaire formée par l'hôte, dont la composition est légèrement différente de celle de la membrane plasmique dont elle dérive. Selon Gianinazzi-Pearson, (1992) cette interface est le siège d'échanges actifs, matérialisés par l'existence d'une activité ATPase élevée ; et d'après Davet, (1995) les cellules envahies contiennent davantage de plastides et de mitochondries et leur noyau devient enflé et multilobé, mais elles reprennent un aspect normal après la sénescence et la disparition de l'arbuscule. La durée de vie des arbuscules est de quelques jours : quand l'arbuscule dégénère, sans lyser la cellule occupée, cette même cellule peut être à nouveau envahie par un autre arbuscule (Duhoux et Nicole, 2004).



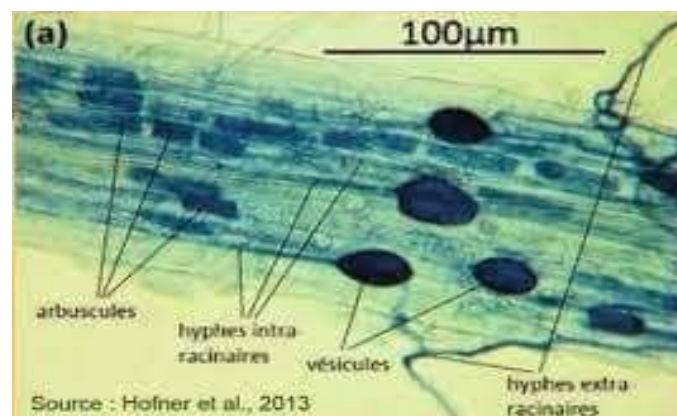
**Figure n°6 :** arbuscule de *Glomus* développé dans une cellule racinaire.  
Source: (Brundrett ; 2008).

**1.3.2.3. Les vésicules** : les vésicules sont formées en général dans les couches superficielles de la racine. C'est la nature du champignon qui induit cette morphogénèse ; certains champignons, comme *Scutellospora* ou *Gigaspora* n'en forment jamais. Les vésicules ont des parois épaisses, de forme variée et sont, là aussi, caractéristiques de l'espèce fongique. Elles jouaient probablement un rôle dans le stockage des réserves et dans la propagation du champignon (Duhoux et Nicole, 2004).



**Figure n°7** : les vésicules formées dans la couche superficielle de la racine (site 1)

L'infection par un champignon à arbuscules et à vésicules n'entraîne pas de modification apparente de l'aspect extérieur des racines, ce qui explique sans doute l'universalité de cette association. L'association des plantes avec des champignons endomycorhizes à vésicules et à arbuscules se traduit par une ramification racinaire très abondante (Davet, 1995). Le mycélium issu de l'établissement de la symbiose peut mesurer de 10 à 100 m par gramme de sol (McGonigle, Miller, 1999). Constituant ainsi une biomasse d'hyphes mycorhiziens variant entre 54 à 900 kg par hectare (Zhu, Miller, 2003)



**Figure n°8** : les différentes structures spécifiques des CMA (site 2).

### 1.3.3. Fonctionnement de la symbiose mycorhizienne arbusculaires :

Selon Logi et *al.*, (1998) la symbiose mycorhizienne arbusculaires (MA) joue un rôle important dans le cycle des nutriments dans les écosystèmes terrestres. Néanmoins la nature souterraine et une partie de la biomasse fongique étant incluse à l'intérieur des racines font que certains aspects du fonctionnement de cette symbiose restent encore inconnus même si de gros progrès dans la compréhension de ces mécanismes ont été faits avec le développement des techniques de biologie moléculaire et d'analyse génétique. L'établissement de la symbiose MA commence par la colonisation d'une racine compatible par les hyphes produites par propagule de champignon MA (spores asexuées ou racines déjà mycorhizées). Si l'hyphe ne rencontre pas de racine après 2 à 4 semaines de croissance le champignon ne peut pas se développer et compléter son cycle de vie. Dans ce cas, les spores peuvent se remettre en dormance après rétraction du protoplasme et réallocation des ressources en attendant de meilleures conditions.

Suite à ce stade a symbiotique du champignon, le premier stade de la colonisation mycorhizienne est la formation d'un appressorium à la surface de la racine à partir duquel le champignon peut pénétrer dans l'épiderme et le cortex racinaire pour former les structures intracellulaires spécialisées que sont les pelotons et les arbuscules (Requena et *al.*, 2007). Lors du stade pré-symbiotique, c'est un dialogue chimique entre le champignon et la racine compatible qui permet la rencontre des deux partenaires. Des exsudats racinaires (branching factor) de la plante hôte induisent la germination des spores, la croissance et la ramification de l'hyphe (Buée et *al.* 2000), ce qui augmente les chances du champignon d'entrer en contact avec une racine. Ce composé induisant la ramification de l'hyphe a été isolée et identifié par (Akiyama et *al.*, 2005) comme étant une strigolactone, mais ce n'est pas le seul composé induisant cette réaction, les flavonoïdes peuvent aussi avoir des effets sur croissance du champignon même si cet effet est variable selon le couple plante-champignon (Scervino et *al.*, 2005). Par contre, ces signaux chimiques ne semblent pas concerner la formation des appressoria qui serait plutôt liée à un signal thigmotropique (induit par le contact). En effet, la seule présence physique de cellules épidermiques suffit à la formation d'appressoria (Nagahashi et Douds, 1997). La perception de ces signaux chimiques et physiques par le champignon laisse supposer l'existence de récepteurs sur la membrane plasmique du champignon pour la transmission du signal et dont Ca<sup>2+</sup> pourrait jouer le rôle de 2<sup>e</sup> messenger (Requena et *al.* , 2007). Par ailleurs, Kosta et *al.*, (2003) ont montré que le champignon aussi émet une molécule signal qui active un gène de réponse à la symbiose (ENOD11) chez la plante hôte. Dans cette communication complexe entre le champignon MA et la plante, il faut

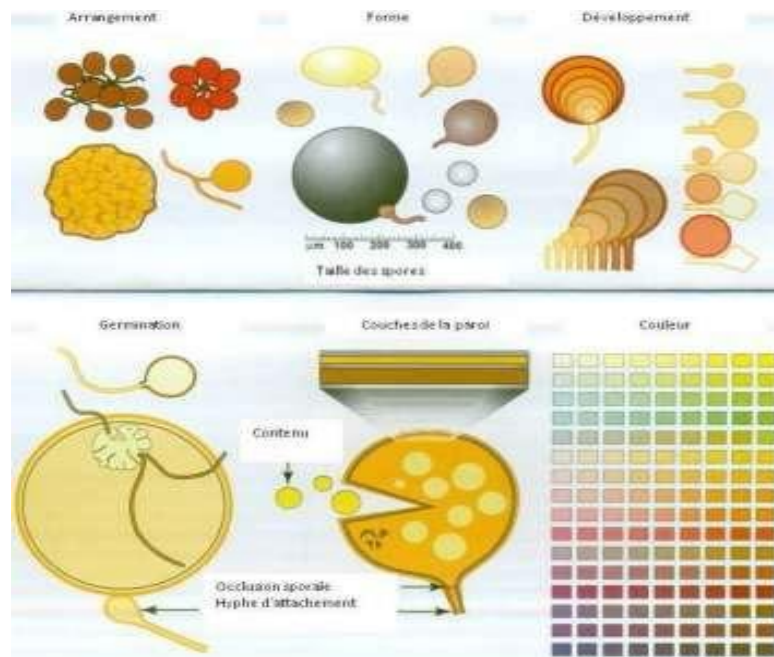
aussi citer les phytohormones (cytokinines, gibbérellines, éthylène, acide abscissique, auxines et acide jasmonique), dont les concentrations dans les plantes peuvent varier selon la présence ou non du champignon, mais dont les fonctions ne sont pas toujours bien connues (Hause et al ; 2006). Les structures intracellulaires que sont les arbuscules constituent le lieu d'échanges de nutriments entre la plante et le champignon. Au niveau de ces structures bien ramifiées, le champignon reçoit des produits carbonés issus de la photosynthèse (sucres et lipides) lui permettant de croître et de former du mycélium à l'extérieur des racines (extra radiculaires) à la recherche d'éléments nutritifs (phosphore, azote) qu'il transporte jusqu'à la plante.

Le cycle de champignon est complété lorsqu'il forme de nouvelles spores dans ce mycélium externe. L'échange et le transport des nutriments mettent en jeu un certain nombre de transporteurs membranaires. Le transport des phosphates par des plantes mycorhizées a ainsi particulièrement été étudié (Requena, 2005 ; Javot et al. 2007) et un certain nombre de transporteurs de phosphate ont pu être identifiés sur la membrane péri-arbusculaire (Harrison et al 2002 ; Poulsen et al., 2005) ainsi que sur le mycélium extra radiculaire (Maldonado-Mendoza et al. 2001 ; Benedetto et al. 2005). Enfin, récemment, une attention particulière s'est portée sur le rôle des aquaporines en ce qui concerne le transport de l'eau et des nutriments entre les deux partenaires de la symbiose mycorhizienne arbusculaire (Uehlein et al., 2007). Les aquaporines, présentes dans de nombreux systèmes biologiques, constituent un système de diffusion facilitée à travers les membranes qui sont ainsi perméables à différentes molécules de petites tailles ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ ) pouvant être échangées entre le champignon et les racines (P.Redon ; 2009).

#### **1.4. Classification des mycorhizes :**

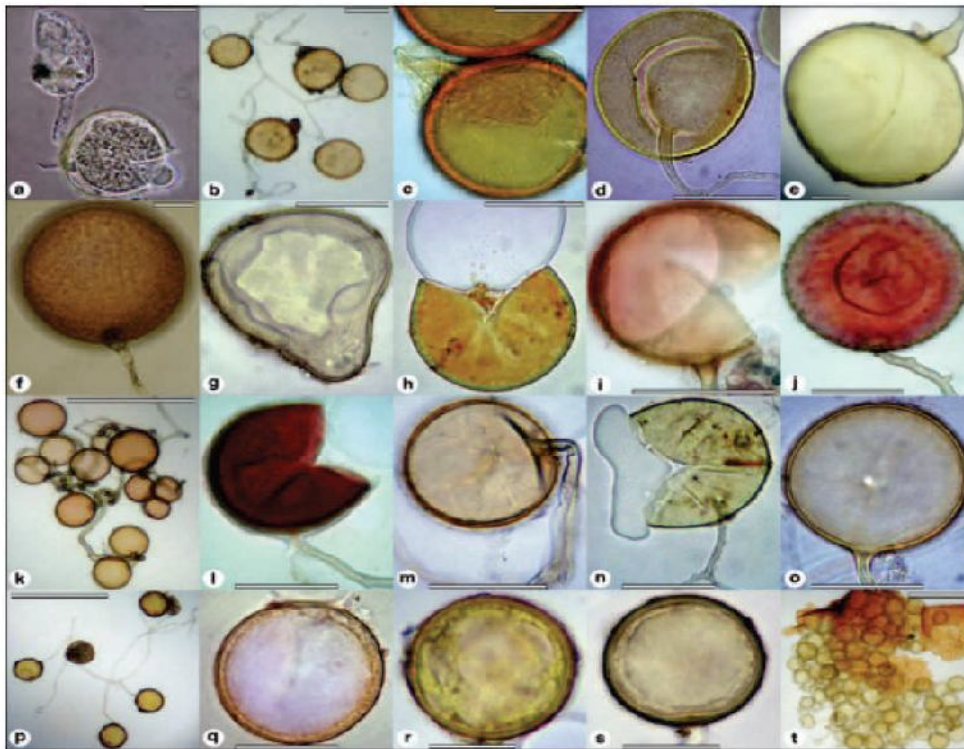
Les champignons mycorhiziens arbusculaires appartiennent à l'ancien ordre des Glomales (Zygomycètes) et sont aujourd'hui regroupés dans le phylum monophylétique des Glomeromycota ou Glomeromycètes (Hibbett et al, 2007 ; Schwarzott et al., 2001).

Selon Redecker et Raad., (2006) la première classification de ces champignons arbusculaires était basée principalement sur la morphologie des spores (couleur, forme et taille des sporocarpes ; couleur, nombre, épaisseur et types d'ornementation des membranes sporales ; structures des hyphes associées ; forme et type d'occlusions, qui ont permis de décrire un nombre plus important d'espèces de CMA (Ces espèces appartiennent à cinq genres bien distincts (Glomus, Sclerocystis, Acaulospora, Gigaspora, Scutellospora) (Mohammedi 2018)



**Figure n° 9 :** Caractéristiques morphologiques des spores de CMA  
(Brundrett et al.1994).

Le développement d'outils moléculaires ces dernières années a fait évoluer cette classification vers d'autres embranchements polyphylétiques. La taxonomie actuelle est basée sur des analyses moléculaires, en particulier sur l'analyse de la petite sous-unité de l'ARN ribosomique 18S qui a permis déconstruire l'arbre phylogénétique des Gloméromycota. Malgré certains ajustement, celle-ci tend actuellement vers une stabilisation et le phylum regroupe à ce jour 250 espèces comprenant 18 genres et 4 ordres : les Glomérales, les Diversisporales et deux lignées plusanciennes : les Paraglomérales et les Archeosporales (Schüßler et Walker, 2011, Redecker et al, 2013). Cependant, on sait que la biodiversité mondiale des CMA est probablement sous-estimée (Wang et Li, 2013). En effet, la taxonomie actuelle est basée sur des espèces isolées à partir de spores alors que des techniques émergentes permettent d'obtenir des séquences à partir de racines ou du sol, donnant accès à d'autres espèces non sporogènes ou difficilement détectables (Öpik et al. 2013). Ainsi, 204 groupes phylogénétiques de CMA ont été trouvés, augmentant le nombre de taxons virtuels des gloméromycètes à 341 (Öpik et al. 2013).



**Figure n°10** : Illustration de la diversité de couleur et de forme des spores et des hyphes suspenseurs de CMA isolés (Stover et al. 2012). Barres d'échelle : 60  $\mu\text{m}$  sauf pour r : 25  $\mu\text{m}$  et k, p, t : 250  $\mu\text{m}$ .

**Tableau n°2** : les principaux genres de champignons formant des endomycorhizes à vésicules et à arbuscules

| Ordre           | Sous Ordres  | Familles        | Genres   |
|-----------------|--------------|-----------------|--|
| <b>Glomales</b> | Gigasporinae | Gigasporaceae   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gigaspora</li> <li>• Scutellospora</li> </ul>   |
|                 | Glomineae    | Glomaceae       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Glomus</li> <li>• Sclerocystis</li> </ul>       |
|                 |              | Acaulosporaceae | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Acaulospora</li> <li>• Entrophospora</li> </ul> |

**Source** :(Duhoux et Nicole, 2004).

## **1.5. Rôle des mycorhizes :**

### **1.5.1. Absorption des éléments minéraux :**

Les mycorhizes favorisent l'absorption par les racines des éléments minéraux notamment le phosphore, le cuivre, le calcium, le potassium, le zinc, etc. de la rhizosphère et du sol, et améliore ainsi la nutrition de la plus part des espèces végétales et permettent de mieux absorber l'eau et de résister aussi aux stress hydrique ainsi qu'aux maladies. (Futura planète, 2001)

D'après B. Brunel, (2011) le phosphore soluble est peu disponible dans le sol, les mycorhizes jouent un rôle essentiel dans la mise à disposition de cet élément pour la plante, elles libèrent du Pi (phosphate inorganique) à partir de formes insolubles du sol et sont plus efficaces pour son absorption que la plante elle-même, les mycorhizes sont également un lieu de stockage de polyphosphates qui seront dégradés et transférés à l'hôte en cas de besoin.

Selon O. Lauvaud, (2016) les champignons mycorhiziens donnent également accès aux plantes à d'autres minéraux, l'azote en premier. Les mycorhizes s'associent à des bactéries du sol pour dissoudre des minéraux et rendre accessible le phosphore aux plantes. Cette capacité de réguler le flux de phosphore du sol à la plante est la principale fonction du mycorhize dans les échanges symbiotiques. Dans le cas des légumineuses, 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 « méta symbiose », association mutualiste entre la plante hôte et ses champignons et bactéries symbiotiques associés.

### **1.5.2. Absorption de l'eau :**

C'est la seconde fonction des mycorhizes. 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.



A

B

**Figure n°11 :** comparaison des plantules mycorhizées et plantules non mycorhizées (A citron) (site3) (B poireau) (Kuszala et al; 2010)

### 1.5.3. Protection des racines contre les substances toxiques :

Les racines sont fréquemment en contact avec des substances toxiques 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 leur compétitivité (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 diphényles, les dioxines et les pesticides utilisés en agriculture qui sont aujourd'hui les plus importants.

Shetty et ses collaborateurs (1994) ont montré que les herbacées mycorhizés pouvaient coloniser d'anciens sites de mines pollués contrairement aux non mycorhizés, suggérant ainsi que la tolérance vis-à-vis des polluants métalliques (ou d'autres effets bénéfiques) étaient conférée par la symbiose mycorhizienne.

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 (région du sol formée et influencée par les racines et les micro-organismes) à l'extérieur de ces tissus.

#### 1.5.4. Agrégation des sols :

Elle est favorisée par la croissance continue du mycélium de quelques millimètres par jour qui contribue à agglomérer les particules entre elles et à renforcer la cohésion de l'ensemble. Cet effet structurant est dû entre autre à l'exsudation de mucilage (substance visqueuse sécrétée en particulier par les micro-organismes qui facilite l'agglomération des bactéries) qui joue le rôle de colle.

Les hyphes externes des Gloméromycota sécrètent de la glomaline en grande quantité, une glycoprotéine (protéine contenant du sucre, glucose en partie), qui contribue à l'adhésion des constituants du sol. La glomaline est hydrophobe, ce qui confère une résistance des agrégats à l'eau ; de par son caractère hydrophobe la glomaline est lentement biodégradable par les bactéries et les champignons du sol. Elle est également thermo tolérante, résistante aux fortes chaleurs superficielles du sol subies en été dans les pays chauds. De plus, ce réseau se renouvelle continuellement, et le champignon a la capacité d'abandonner la colonisation d'un secteur devenu trop pauvre en nutriments. Le cytoplasme (partie interne du mycélium) migre vers les parties encore en croissance, ne laissant que la paroi vide du mycélium. Le mycélium mort contribue aux stocks de matières organiques et de liant physique participant à l'agrégation des sols. L'abondance des mycorhizes, en augmentant la stabilité des sols, favorise la rétention de l'eau et assure la phytoremédiation et la décontamination. La glomaline joue un rôle essentiel dans la formation et la stabilité de la structure des sols.

#### 1.5.5. Régulation de la croissance :

Les régulateurs de croissance sont des hormones végétales ou phytohormones. Ce sont des petites molécules qui affectent le développement ou la croissance de tissus ou organe. Ils sont regroupés en cinq familles principales (Les auxines, Les cytokinines, Les gibbérellines, L'acide abscissique, L'éthylène). (Olivier Lauvaud et *al*, 2016)

L'action globale des hormones produites par le champignon mycorhizien arbusculaire affecte le port général de la plante, dont la croissance des parties aériennes est souvent favorisée par rapport à celles des racines. Le champignon remplace partiellement les racines et cela à un moindre coût énergétique. (N.Hamza, 2014))

#### 1.5.6. Résistance au stress :

Les plantes sont souvent cultivées dans des conditions défavorables à cause des stress abiotiques (Salinité, sécheresse, alcalinité) et biotiques fréquemment rencontrés en culture

protégée. Les plantes exposées à ces types de stress présentent divers troubles physiologiques et biochimiques conduisant à un retard de croissance et une perte sévère du rendement. Une façon d'éviter ou de réduire les pertes de production causées par les mauvaises conditions chimiques du sol ou à cause de stress biotiques serait par l'association des champignons mycorhiziens à arbuscules capables de réduire les symptômes du stress en complément des mécanismes protecteurs intrinsèques de la plante. Trois expériences de culture en pot sous serre ont été conduites afin d'étudier la réponse des plantes mycorhizées par un inoculum commercial AEGISSYM contenant *Glomus intraradices* et *Glomus mosseae* sur la croissance, le rendement et la composition minérale de trois espèces de cucurbitacées.

Les résultats de ces trois expériences ont montré une augmentation de la tolérance au stress des plantes mycorhizées prouvée par une amélioration de la croissance et du rendement des plantes mycorhizées face au stress salin et alcalin contrairement aux plantes non mycorhizées, cette amélioration est liée à des teneurs plus élevées en éléments majeurs et oligo-éléments. (G. Colla et al., 2012)

#### **1.5.7. La lutte biologique :**

Selon Daplé, (2006), une plante mycorhizée, saine et vigoureuse résiste beaucoup mieux aux infections. Cette protection n'est toutefois efficace que lorsqu'une symbiose fonctionnelle est établie préalablement à l'attaque du parasite. La colonisation mycorhizienne entraîne chez certaines plantes une augmentation significative de la ramification des racines fines. C'est le cas pour plusieurs espèces ligneuses et herbacées dont l'érable, le peuplier, la chicorée, la tomate et le fraisier. Cette ramification intense s'accompagne d'une augmentation des exsudats racinaires, responsables, à leur tour, de modifications des microflore et d'interactions avec les parasites. De plus, le même auteur a constaté que la colonisation mycorhizienne se traduit généralement par des activités métaboliques accrues. Selon les plantes, on observera des transformations anatomiques telles que la lignification des parois cellulaires de la plante, le dépôt de cellulose et occasionnellement, une altération des parois fongiques. On a également observé chez la plante mycorhizée l'induction ou la suppression de mécanismes de défense liés aux phytoalexines et à diverses enzymes dont les peroxydases, chitinases et bglucanase.

La bio-protection peut provenir de l'effet compétitif car une fois bien établi, les champignons mycorhiziens peuvent constituer jusqu'à 80% de la masse microbienne d'un sol. Cette dominance leur permet d'accaparer les sites d'infection disponibles à la surface racinaire et

d'affaiblir ainsi l'activité du parasite. Il en découle un affaiblissement réciproque de la flore microbienne compétitive parallèlement à une protection indirecte de la plante (Daplé, 2006).

De même les mycorhizes peuvent interagir avec une certaines composantes de la microflore à la manière d'agent de lutte biologique. C'est le cas notamment du *Glicladium virens* Mill et de *Bacillus subtilis* (Ehrenbrg) Cohn. En effet, lorsqu'ils sont prodigués à une plante parasitée, Ils stimulent à la fois la colonisation racinaire mycorhizienne et réduisent l'incidence de la maladie. C'est dans ce sens que plusieurs inoculants mychoriziens commerciaux résultent de la combinaison de deux ou de plusieurs microorganismes ayant des fonctions complémentaires afin d'exploiter en synergie leurs pouvoirs respectifs de stimulateurs de croissance et d'agents de lutte biologique (Dalpé, 2006).

### **1.5.8.L'augmentation des rendements :**

Selon Gagné et MCNicoll, (2010) Les inoculants mychoriziens constituent une nouvelle technologie qui permet d'optimiser les rendements des cultures. A titre d'exemple, des essais d'inoculation ont été réalisés avec les maïs pendant 3 années successives (entre 2007 et 2009) dans certains états américains. Sur les 37 sites d'essais, les résultats ont démontré des augmentations moyennes de rendements de 4,2 % lorsque les parcelles étaient inoculées comparativement aux parcelles non inoculées ; dans le cas de la lentille, des essais expérimentaux réalisés en 2007 et en 2009 dans l'ouest canadien ont montré des augmentations de rendement variant de 13,5 à 35% suite à l'inoculation mycorhizienne. Ces exemples démontrent le potentiel réel des inoculants mychoriziens à augmenter les rendements des cultures (Ouldkaci et Sai, 2016).

### **Bénéfices pour le champignon :**

Première question : pourquoi le champignon s'installe-t-il dans la racine ? Tout simplement parce qu'il y trouve plusieurs intérêts :

A l'intérieur de la racine, il est à l'abri des agressions extérieures : variations de température, prédateurs, pathogènes, etc. La plante lui fournit, en quantités importantes, des composés carbonés directement assimilables, essentiels à la vie du champignon qu'il est incapable de synthétiser lui-même (les champignons sont des organismes hétérotrophes, car dépourvus de chlorophylle et n'effectuant pas de photosynthèse) ; La plante apporte également au champignon de petites quantités d'acides aminés et de vitamines (B1). (Clémentine Des femmes ; 2014)

## **1.6. L'installation des mycorhizes :**

La mycorhization peut être naturelle ou artificielle par apport de bio fertilisant mychoriziens ; selon LE TACON, (1978) la mycorhization artificielle par un champignon très efficace et compétitif permet d'obtenir des gains importants de croissance par rapport à la mycorhization naturelle

### **1.6.1. La mycorhization naturelle :**

D'après Margaret L. Ronsheim, (2012) cette association est généralement non spécifique, les spores d'un champignon mycorhizien ou mycorhizogène sont disséminées par le vent (anémochorie), par la pluie (hydrochorie), ou par les déjections d'animaux (endozochorie), germent, et donnent les hyphes du mycélium qui colonisent les racines d'une plante. Ces hyphes radiculaires se distinguent des hyphes extra-radiculaires qui se développent également à l'extérieur de la racine sur plusieurs centimètres, explorant le sol alentour du système racinaire de la plante hôte. Ce que l'on appelle couramment champignon, que l'on cueille avec son pied et chapeau, n'est que la « fructification » du mycélium, le sporophore, où se déroule la reproduction sexuée. Les hyphes se présentent comme de fins filaments, capables d'explorer un très grand volume de sol (mille mètres de filaments mycéliens pour un mètre de racine).

### **1.6.2. La mycorhization artificielle :**

Selon Clémentine Des femmes, (2018) la mycorhization, contrairement à l'apport d'engrais, se pratique une seule fois dans la vie de la plante. Lorsque le champignon s'est installé, la symbiose perdure jusqu'à la mort du végétal (ou du champignon : cela peut arriver). Inutile, donc, de répéter les apports de produits à base de mycorhizes : en principe, une seule fois suffit. Le moment idéal pour mycorhizes est celui de la plantation, en particulier si le sujet est à racines nues (rosiers, arbres fruitiers, arbres d'ornement, arbustes) : on peut appliquer le produit contenant le champignon directement au contact des racines, comme un pralinage. Il faut alors insister sur les zones de la motte qui contiennent les racines "actives", à savoir l'extérieur de la motte et sa partie inférieure. Bien sûr, on peut aussi mycorhizée les plantes achetées en mini-mottes, en godets, en pots ou containers : on dépose le produit au fond du trou de plantation et on en saupoudre le pourtour de la motte, après avoir démêlé un peu le chevelu racinaire. On procède de même au moment du repotage des plantes vertes et des arbustes en bacs. Pour les bulbes à fleurs, le produit est à saupoudrer environ 5 cm sous le bulbe, lors de la mise en terre. Enfin, pour les semis, on mélange le produit au substrat, à proximité des graines. Pour les végétaux déjà installés en pleine terre, il est plus difficile

d'intervenir, mais pas impossible : une méthode consiste à creuser des trous verticaux (type forage) à l'aplomb du feuillage (et non au pied de la plante), là où les racines sont actives, et à y déposer l'inoculum, puis reboucher. Certaines marques proposent également des produits en poudre à diluer dans l'eau d'arrosage. Dans tous les cas, après un apport d'inoculum mycorhizien, on arrose et bien évidemment, on évite l'utilisation de fongicides, en particulier dans les semaines qui suivent l'inoculation ! Lorsque vous transplantez un arbuste ou un arbre, en particulier un conifère, il est important de conserver autour des racines un maximum de terre du site d'origine, afin de déplacer du même coup d'indispensables champignons symbiotiques ! C'est particulièrement vrai lors du prélèvement de jeunes plants dans la nature, par exemple pour en faire des bonsaïs : les chances de reprise seront bien meilleures si vous prélevez avec les racines une belle motte de terre.

### **1.6.3. Pratiques favorables aux mycorhizes :**

Des pratiques très favorables au maintien de populations mycorhiziennes sont à favoriser. Par exemple l'agroforesterie (mélanges d'arbres/arbustes et cultures annuelles ou pluriannuelles). Les mycorhizes ont besoin de stabilité dans le sol ; elles sont impactées par certaines pratiques répertoriées dans le tableau suivant (O. Lavaud et *al*, 2018)

**Tableau n°3** : les pratiques défavorables aux mycorhizes et les solutions proposés.

| Pratiques défavorables                      | Pistes de solutions   |
|---|---|
| Labour                                      | Non travail du sol (le moins profond possible, lorsque c'est nécessaire uniquement, par ex. pour contrôler les adventices) + couverture des sols (paillage) pour gérer l'enherbement, éviter de retourner le sol  |
| Fertilisation minérale (excès de phosphore) | Sol vivant, engrais verts   |
| Monoculture                                 | Associations de culture, rotations (brassicacées) diversifiées, prairies temporaires.   |
| Pesticides (dont fongicides)                | Plantes en bonne santé, décoctions de plantes   |
| Jachères en sol nu                          | Sols protégés toute l'année : soit par des végétaux en décomposition (restes de légumes, y compris racines intactes 5-10 cm d'épaisseur), soit par des plantes vivantes (« engrais verts ») ; [si maladies très présentes sur la végétation Olivier les met au compost, et utilise ce compost sur des zones où il n'y a pas de légumes] |

Source : (Olivier Lavaud et *al*, 2018)



**Partie II**  
***Les céréales***

## Partie II : Les céréales

### 2.1. Généralités :

Les céréales sont des espèces généralement cultivées pour leur grain, dont l'albumen amylicé, réduit en farine, est consommable par l'homme ou par les animaux domestiques. La plupart des céréales appartiennent à la famille des Graminées (ou Poacées). Ce sont ; le blé, l'orge, l'avoine, le seigle qui appartiennent à la sous-famille des Festucoïdées et le maïs, le riz, le millet et le sorgho qui appartiennent à la sous-famille des Panicoïdées. Enfin, le sarrasin appartient à celle des Polygonacées. (Guide céréales par C. Moule ; 1971)

Ces espèces céréalières diffèrent entre elles par leur morphologie ainsi que leur aspect nutritionnel, nous distinguons ainsi les céréales complètes pour lesquelles le grain est consommé dans sa totalité (albumen, germe et enveloppe), ils sont ainsi caractérisés par leur richesse en nutriments, en fibres alimentaires, en vitamines et en éléments minéraux. (Farine de blé complète). Les céréales raffinées ou blanches à elles sont dépourvues de l'enveloppe et du germe de leur grain. En fonction de leur cycle de croissance, les céréales peuvent être des :

1. Céréales d'hiver : semées à l'automne, comme le blé.
2. Céréales de printemps : semées au début du printemps et récoltées en été, comme l'orge de brasserie.
3. Céréales d'été : implantées en avril-mai et récoltées à l'automne, comme le maïs.



**Figure n°12** : céréales de printemps (Jean-Baptiste ,2013).



**Figure n°13** : céréales d'été (Florent ; 2012).



**Figure n°14** : le maïs (Claire ,2017).

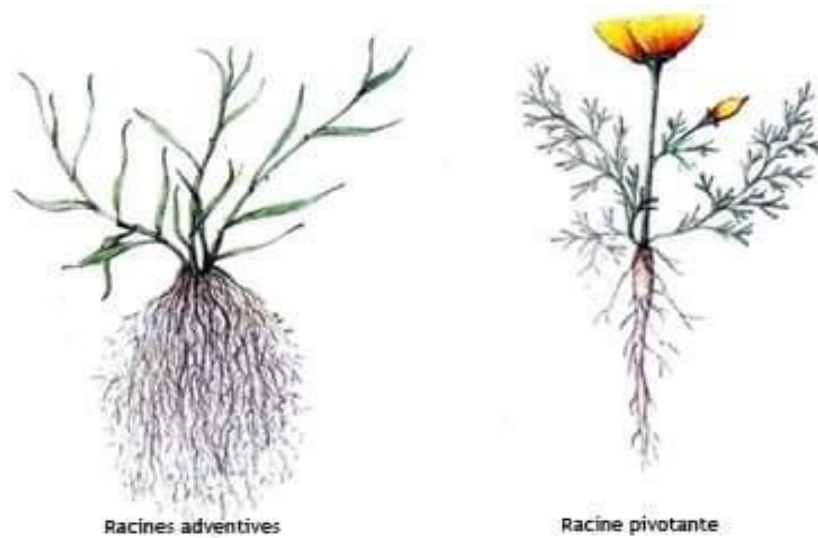
## **2.2. Caractéristiques morphologiques des céréales :**

**2.2.1. L'appareil végétatif des céréales :** est constitué d'un système aérien formé d'unités biologiques ou talles feuillées partant d'une zone située à la base de la plante : le plateau de tallage. Le système racinaire est de type fasciculé, son importance et sa profondeur variant d'une espèce à une autre. Comparativement au blé, chez l'orge il est plus superficiel et moins important alors que chez l'avoine il est plus puissant et plus profond.

**2.2.2. Les racines :** deux sortes de racines :

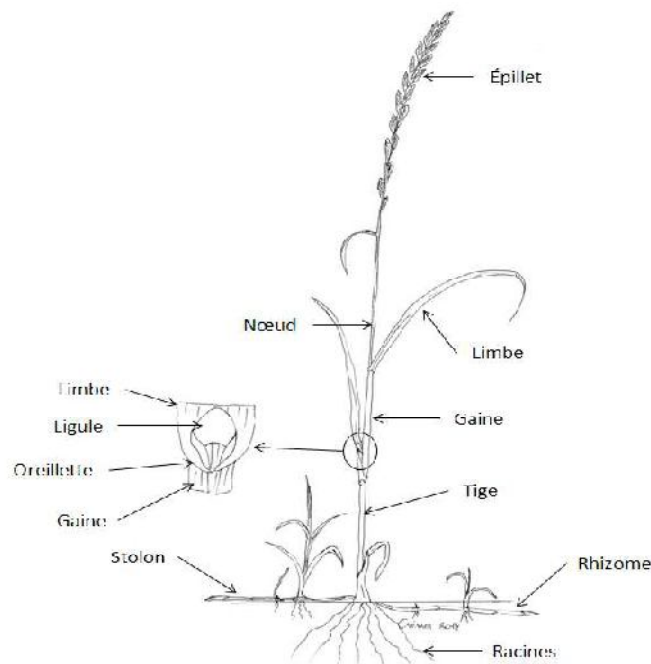
**a. Les racines primaires :** ou séminales issues de la semence qui se développent au moment de la germination : la radicule qui débouche la 1<sup>er</sup> ; puis la 1<sup>ère</sup> paire de racines qui va sortir en même temps ; et la 2<sup>ème</sup> paire racinaires. Ces racines qui sont constitués que de tissus primaire vont nourrir la plantule jusqu'au stade tallage.

**b. Un système racinaire fasciculé :** assez développé, (racines adventifs ou coronaires) ; qui sont produites par le développement de nouvelles talles, elles peuvent atteindre jusqu'à 1m50.



**Figure n°15** : Racine des poacées graminées (système racinaire fasciculé et pivotant)  
source : (Botarela, 2012).

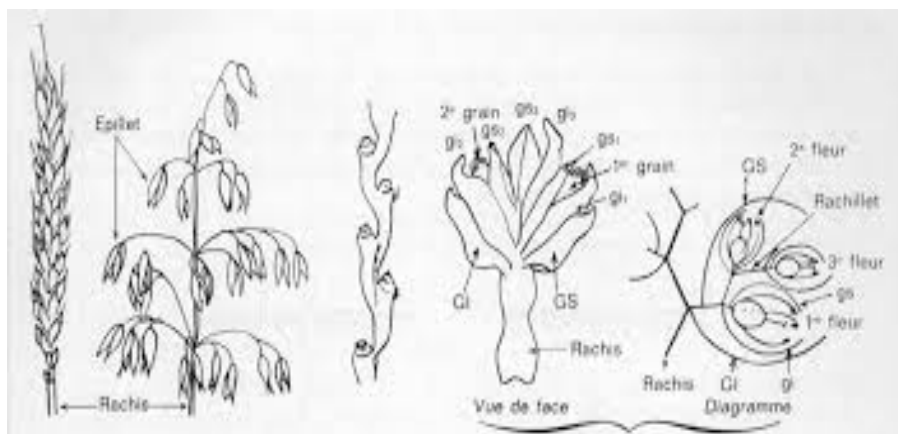
**2.2.3. Les tiges** : Elles sont constituées de chaumes, cylindriques, souvent creux par résorption de la moelle centrale mais chez le blé dur est pleine. Ils se présentent comme des tubes cannelés, avec de longs et nombreux faisceaux conducteurs de sève. Ces faisceaux sont régulièrement entrecroisés et renferment des fibres à parois épaisses, assurant la solidité de la structure. Les chaumes sont interrompus par des nœuds qui sont une succession de zones d'où émerge une longue feuille.



**Figure n°16** : schéma d'une tige de céréale (Libramont 2014).

**2.2.4. Les Feuilles :** La tige s'engaine puis s'allonge en un limbe étroit à nervures parallèles lancéolées, issues chaque une d'un nœud ; la gaine est un cylindre qui permet d'attacher le limbe au nœud le plus bas son rôle est chlorophyllien et permet la conservation de l'eau et de l'air avant l'allongement des tiges, les gaines protégeant également l'apex qui se trouve en cercle concentrique sur le plateau de tallage. Les oreillette ou stipules sont des organes membranaires dépourvues de chlorophylle dont le rôle n'est pas encore bien déterminé (elles forment des joints empêchant particulièrement l'eau de pluie ou de rosé de s'infiltrer à l'intérieur de la gaine) ; la ligule est un organe membranaire qui se forme à l'adjonction entre le limbe et la gaine. Chez toutes les graminées la présence et la forme des oreillettes ou stipules et de la ligule, permet de déterminer l'espèce avant l'apparition de l'épi. (Soltner et Prats, 1990).

**2.2.5. L'appareil reproducteur :** comprend deux types d'inflorescences ; un épi (blé, orge, seigle) et une panicule (avoine, riz, sorgho) avec l'épillet comme unité morphologique de base.

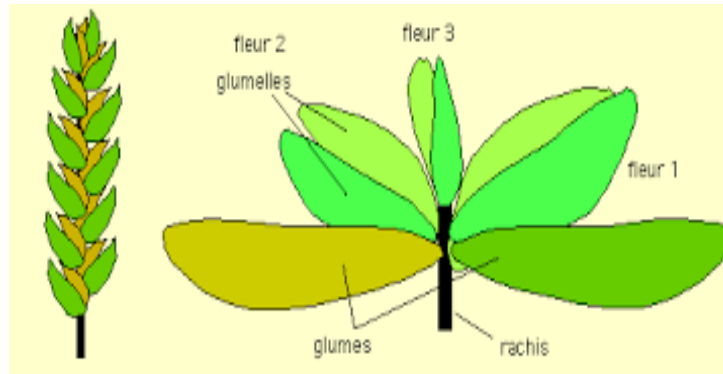


**Figure n°17 :** L'appareil reproducteur (Moule 1971).

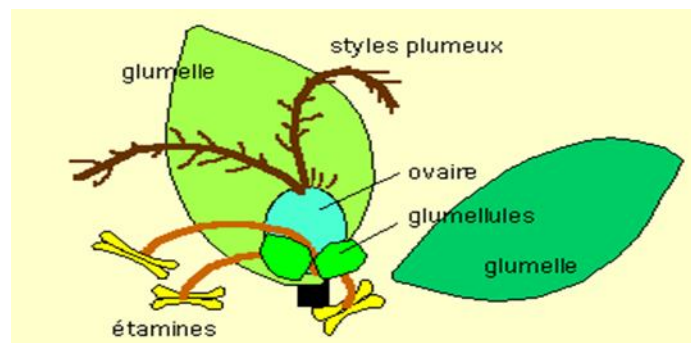
**2.2.6 .1. L'épi :** L'inflorescence du blé dur est un épi muni d'un rachis portant des épillets séparés par de courts entre nœuds .Chaque épillet comporte deux glumes (bractées) renfermant de deux à cinq fleurs distiques sur une rachéole (figure n°16).

Un épillet regroupe de deux à cinq fleurs, et souvent trois fleurs à l'intérieur de deux glumes. Chaque fleur est dépourvue de pétales, et est entourée de deux glumelles (pièces écailleuses non colorées). Elle contient trois étamines qui ont la forme en x (pièces mâles), un ovaire surmonté de deux styles plumeux dichotomique (les pièces femelles) (figure n°17). La fleur du blé est dite cléistogame (Prats, 1966). C'est-à-dire que, le plus souvent, le pollen est relâché avant que les étamines ne sortent de la fleur. Il s'attache alors aux stigmates, où peut

se produire la fécondation. À cause du caractère cléistogame de la fleur, l'autofécondation est le mode de reproduction le plus fréquent chez les blés : ce sont les anthérozoïdes issus du pollen d'une fleur qui fécondent l'oosphère et la cellule centrale du sac embryonnaire de l'ovaire de cette même fleur (les cellules sexuelles femelles sont protégées dans un sac embryonnaire fermé au sein d'un ovule).



**Figure n°18** :L'épi (Michèle et al. 2006).

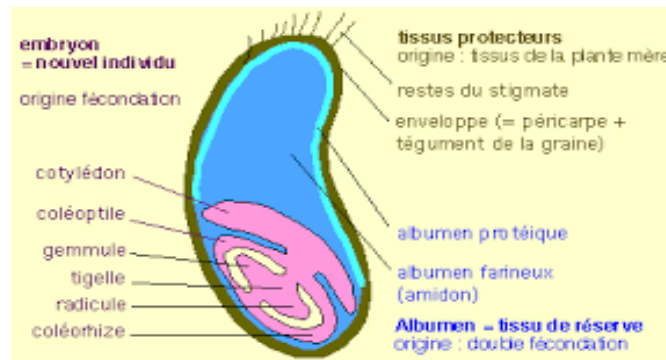


**Figure n°19** : la fleur (Michèle et al, 2006).

### 2.2.7. Le Grain :

Le grain est obtenu après fécondation de l'ovule, l'ovaire se transforme donc en un grain et les enveloppes du fruit sont soudées à celles de la graine. C'est pourquoi le grain est appelé caryopse (Soltner, 2005) constitué d'un albumen représentant 80% à 85% du grain, d'enveloppes de la graine et du fruit (13% à 17% du grain) tandis que le germe ne constitue que de 3%. Au cours de la mouture, les enveloppes (téguments) sont parfois séparées du grain (embryon+ albumen) et commercialisées en tant que son. Le grain contient 65 à 70 pour cent d'amidon ainsi qu'une substance protéique (le gluten) dispersée parmi les grains d'amidon. Cette viscoélasticité permet de faire du pain de qualité : les bulles de CO<sub>2</sub> dégagées lors de la dégradation anaérobie de l'amidon par les levures sont piégées dans le réseau de gluten à la fois tenace et élastique (la pâte "lève").

L'embryon ou germe est la partie essentielle de la graine permettant la reproduction de la plante : en se développant il devient à son tour une jeune plante. Du fait qu'il contient beaucoup de matières grasses (environ 15%) ou d'huiles et qu'il pourrait donc rancir, le germe est souvent éliminé lors du nettoyage des grains. Les embryons de céréales sont vendus dans les boutiques de diététique car ils sont considérés comme très sains en raison de leur haute teneur en sels minéraux, vitamines, protéines et huiles.



**Figure n°20** : le grain (Michèle et al ,2006).

### 2.3. Importance économique des céréales

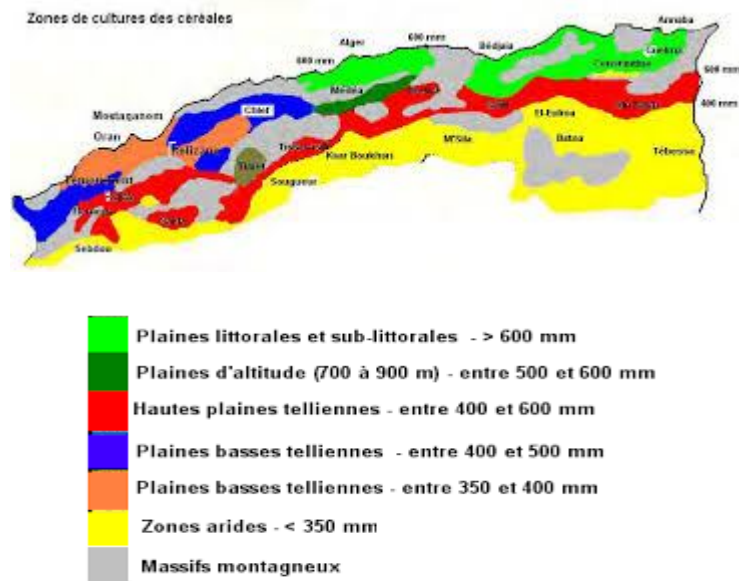
#### 2.3.1. Au niveau mondial :

Selon Simon et al,(1989) le blé vient en tête des productions céréalières et présente environ un tiers du total mondial, l'orge est classé le quatrième après le blé, le riz et le maïs, il est produit à 60% en Europ. Les pays exportateurs présentent une surproduction céréalière et tendent à réduire leur excédent. Par contre, les pays d'Afrique du nord sont dépendant et importent les céréales notamment le blé dur et tendre, alors que leur demande en céréales secondaires (orge) est en relation avec l'élevage.

#### 2.3.2.En Algérie :

D'après Cimmyt, (1991) les céréales constituent la base alimentaire des algériens ; la majorité des calories de la ration alimentaire proviennent essentiellement des céréales, la consommation moyenne annuelle est de 207 kg/habitant de blé (pain. Couscous, pates etc.).

La culture des céréales occupe une superficie importante, annuelle Variant entre 3 et 3.5 millions d'hectares. (BenBelkacem, 2003). Plus de deux tiers de ces surfaces sont situées dans les régions intérieures (Belaid, 1986 ; Feliachi, 2002), pratiquement dans toutes les régions des hauts plateaux situées dans les zones semi-arides et subhumides (isohyète 300 à 450 mm) et des grandes plaines intérieures littorales et sub-littorales (isohyète450 à 600 mm/an)

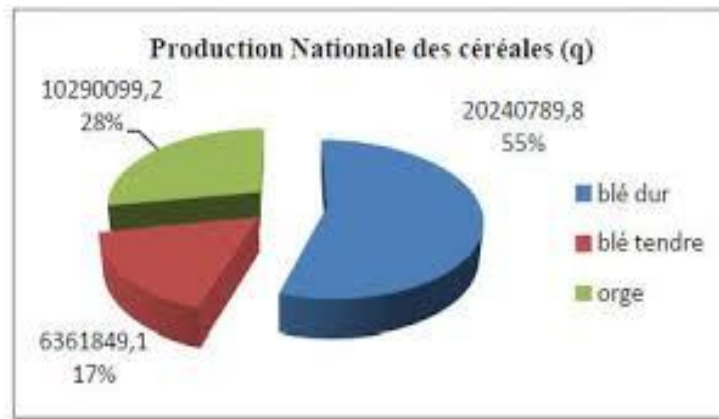


**Figure n°21 :** Carte schématique représentant les zones céréalières de l'Algérie (Belaid, 1986)

Selon les statistiques du ministère de l'agriculture et du développement rural (MADR, 2006) l'orge, le blé dur et le blé tendre occupent à eux seuls 97.60 % de la superficie totale, alors que 2,40 % seulement représente la surface occupée par l'avoine.

Les productions céréalières en Algérie demeurent toujours irrégulières et semblent être étroitement liées à un certain nombre de facteurs tant abiotiques (irrégularité dans les précipitations pluviales, techniques agricoles ; etc.) que biotiques (potentiel génétique, maladies, ravageurs, etc.)(M.Benabdellah ; 2016)

D'après ONFAA, (2015) le total de la production nationale des céréales est de 3,6 millions de tonnes, soit 2 millions de tonnes de blé dur, 1 million de tonnes d'orge et 6361849 tonnes de blé tendre (Figure n°20). Quinze (15) wilayas (Chlef, O.E.Bouaghi, Bouira, Tlemcen, Tiaret, S.B.Abbes, Guelma, Constantine, Medea, Mascara, Souk-Ahras, Mila, Ain-Defla, A.Temouchent, Relizane) ont enregistré une production dépassant la barre d'1 million de quintaux, (H. Mallek ; 2017).

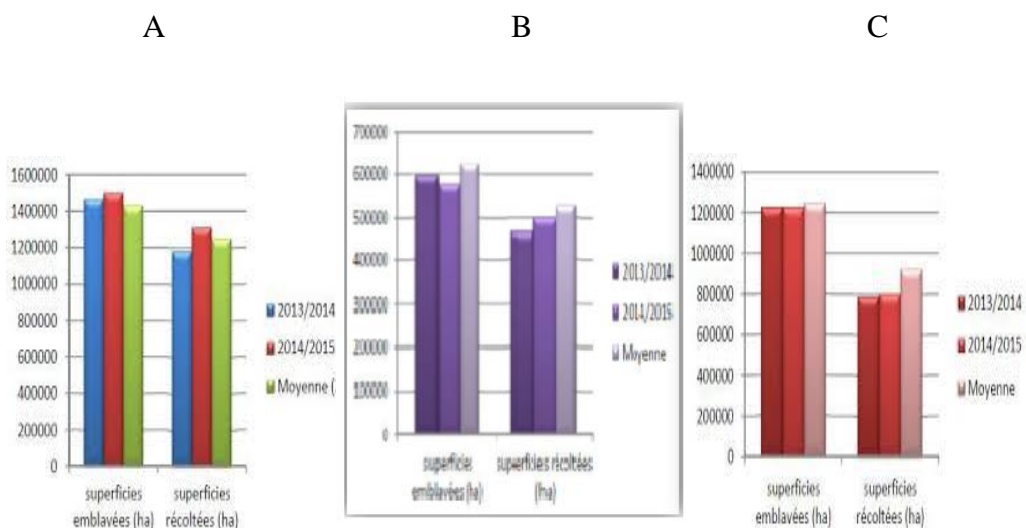


**Figure n°22 :** la production nationale de blé dur et blé tendre et l’orge en 2015 (ONFAA ,2015).

Les superficies emblavées et récoltées en blé dur, blé tendre et en orge sont illustrées dans la figure (n°21) concernant le blé dur, elles ont connu une augmentation de 2,4% et 10,05 respectivement en 2014 /2015 comparativement à la campagne écoulée (figure n°21 a).

En blé tendre, les superficies emblavées ont connu une régression de 3,68% en 2014/2015 par rapport à la campagne précédente, par contre les superficies récoltées ont augmenté de 6,3% par rapport à la même période (figure n°21 b).

Pour l’orge, une légère diminution de 0,01% des superficies emblavées a été enregistrée comparativement à la campagne précédente .par contre les superficies récoltées ont augmenté de 1,5% par rapport à la même période (figure n°21).



**Figure n°23 :** la superficie emblavée et récolté par (ha) blé dur A, blé tendre B et orge C (2013/2015) (H. Mallek ; 2017).

Tableau n°4 : la production céréalière en Algérie entre (2000/2018)

| années                | 2000 /2005    | 2005/2006    | 2007/2011    | 2015/2016    | 2017/2018   |
|-----------------------|---------------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| production céréalière | 35 ,5millions | 40,1millions | 36,3millions | 34,7millions | 60,5millios |

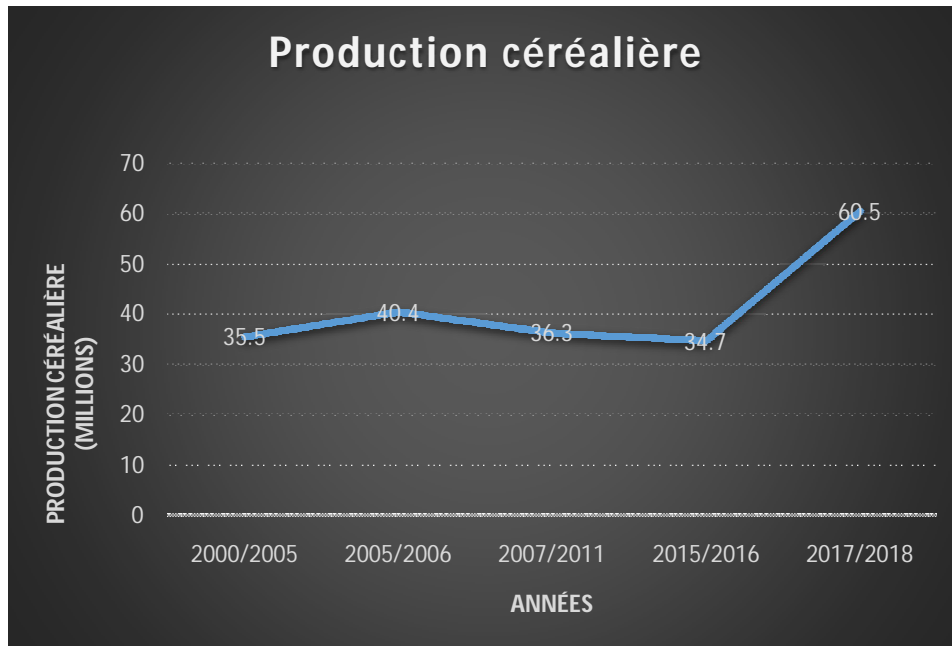
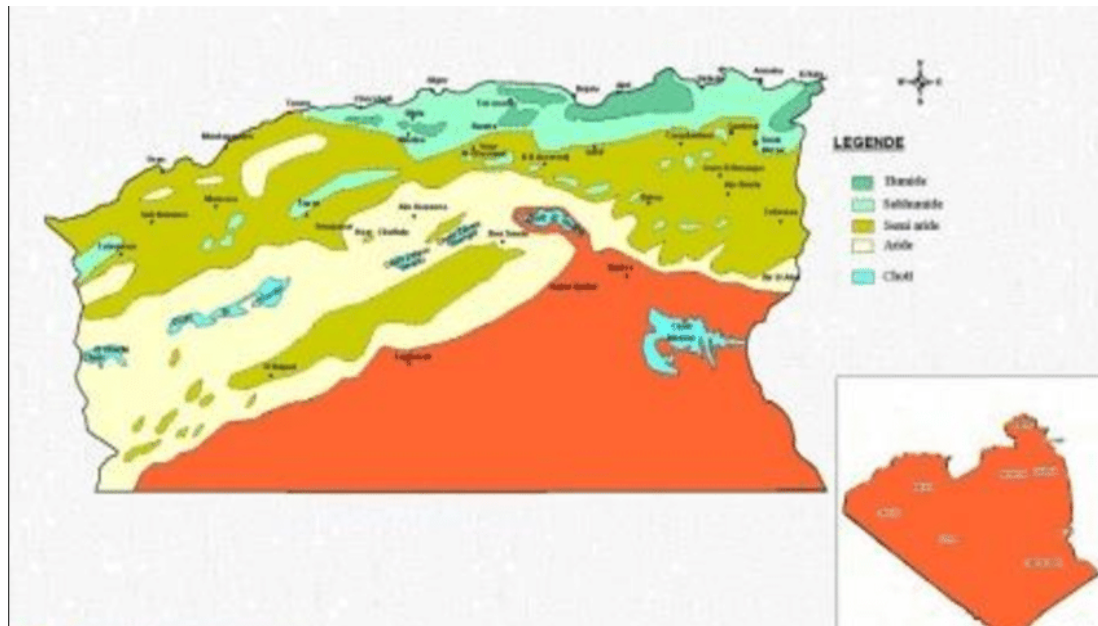


Figure n°24: graphe représentant la production céréalière en Algérie entre (2000/2018)

#### 2.4. La culture des céréales :

La culture des céréales est très ancienne on trouve des traces de blé, de seigle, d'avoine, d'orge à 6 rangs dès le Néolithique. Le riz, le millet, le sorgho, le blé étaient cultivés 2 700 ans avant notre ère en Chine ; les Égyptiens de l'ancienne Égypte connaissaient le blé et le sorgho. Les céréales ont d'autre part joué un rôle capital dans le développement de l'humanité : par ailleurs notons que l'aire de culture des céréales en Algérie est constituée par cinq (05) grandes zones agro climatiques distinctes.



**Figure n°25** : cinq grandes zones agro climatiques en Algérie (Nedjraoui Dalila et al 2008).

### 2.5. Le cycle de développement des céréales :

Le cycle de développement d'une céréale diffère selon l'époque à laquelle la céréale est plantée. Nous identifions ainsi :

**a. Les céréales d'hiver** : qui sont semées à l'automne, et doivent subir des périodes de froid pour produire des grains et sont récoltées en juin-juillet (ex : blé tendre, orge, avoine seigle, triticale, avoine).

**b. Les céréales de printemps** : qui sont semées en début de printemps et la récolte se fait durant l'été (ex : orge de brasserie, blé dur)

**c. Les céréales d'été** : sont implantées généralement en avril-mai et récoltées à l'automne (ex : maïs, sorgho). Site 4

## 2.5.1. Croissance et développement :

### II .5.1.1. Le cycle végétal :

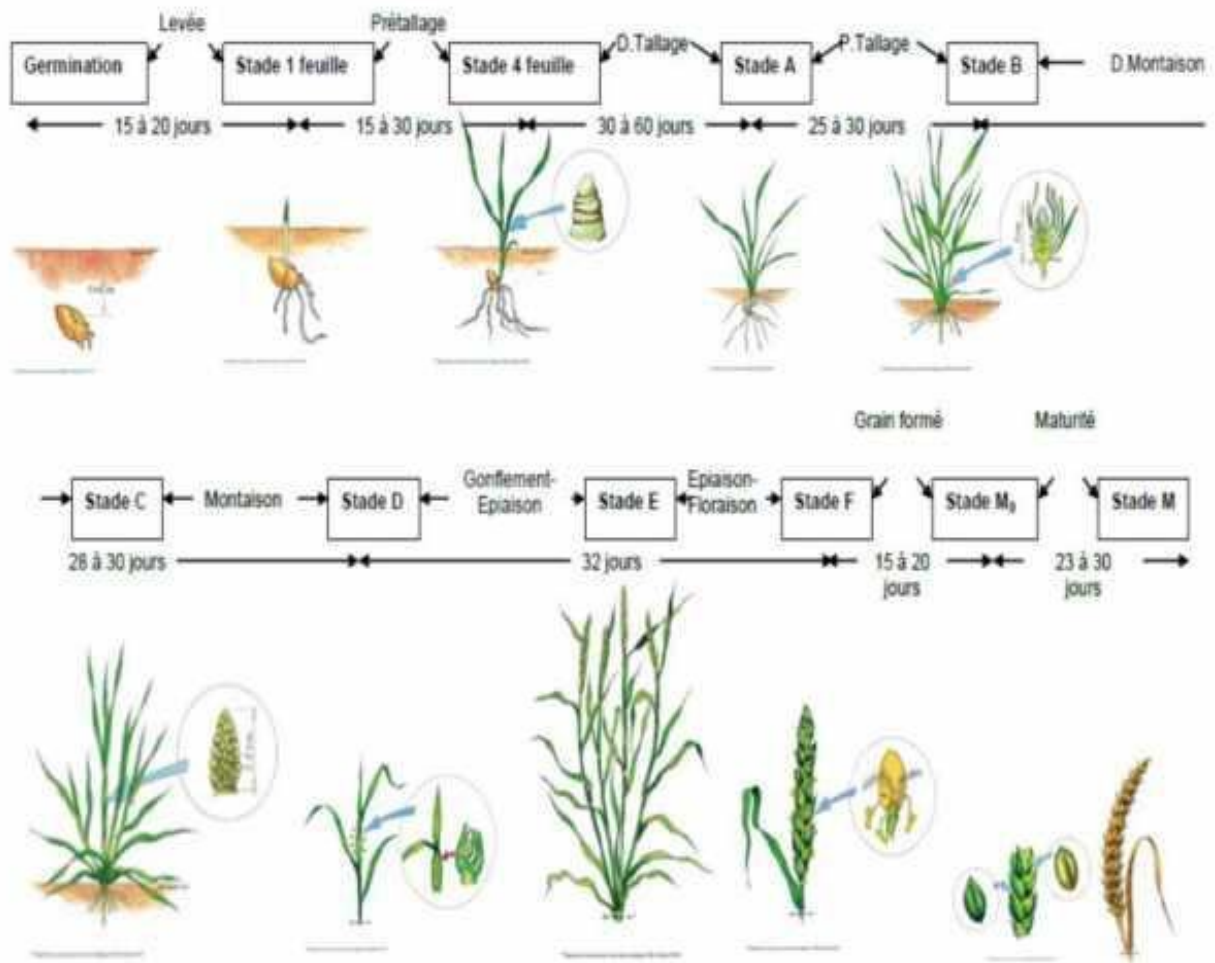


Figure n°26 : cycle de développement des céréales. (Benmakhoulf 2018)

### Les différents stades de développement du blé

#### Blé hybride HYNO (onglet "le blé en général")

**a- la germination et la levée :** Au cours de la germination le coléorhize s'épaissit en une masse blanche et brise le tégument de la graine au niveau du germe, c'est le début de l'émission des racines primaires, garnies de poils absorbants. En même temps la coléoptile, gainant la première vraie feuille, s'allonge vers la surface, où il laisse percer la première feuille, c'est la levée. La deuxième et la troisième feuille suivent bien après (figure n°24).

**b- Le tallage :** Sitôt émise la troisième feuille émise, le deuxième entre-nœud qui porte le bourgeon terminal s'allonge à l'intérieur de la coléoptile et stoppe sa montée à 2cm au-dessous du sol, pour former le plateau de tallage. A l'aisselle des feuilles (à partir de la

quatrième feuille), des bourgeons axillaires entrent alors en activité pour donner de nouvelles talles. La première talle se forme à la base de la première feuille et la deuxième talle à la base de la deuxième feuille. Les bourgeons axillaires à l'aisselle des feuilles des talles donnent naissance aux talles secondaires, (figure n°24).

**c- La montaison –gonflement :** Elle se distingue par la montée de l'épi sous l'effet de l'élongation des entrenœuds qui constituent le chaume. Les talles montantes entrent en compétitions pour les facteurs du milieu avec les talles herbacées qui de ce fait n'arrivent pas à monter en épis à leur tour. Ces dernières régressent et meurent (Masle et *al*, 1980). Ce phénomène se manifeste chez les jeunes talles par une diminution de la croissance puis par un arrêt de celle-ci (Masle et *al*, 1981) (figure n°24).

**d- L'épiaison-floraison :** Une fois l'épi émerge de la gaine de la feuille étendard, c'est le stade épiaison, au cours duquel la formation des organes floraux se termine. La floraison débute 4 à 5 jours plus tard. Durant la floraison, les fleurs demeurent généralement fermées (fleurs cléistogames), et les trois anthères éclatent et libèrent le pollen (anthèse). Les fleurs s'ouvrent rarement avant la libération du pollen. La floraison dure de trois à six jours, selon les conditions météorologiques. Elle débute au centre de l'épi, puis se poursuit vers les deux extrêmes de l'épi. La durée de réceptivité du stigmate de blé dépend de la variété et des conditions du milieu, mais se situe entre 3 à 13 jours. Une fois fécondée, l'ovaire grossit rapidement. Au bout de deux semaines après la fécondation, l'embryon est physiologiquement fonctionnel et peut produire une nouvelle plantule (Bozzini, 1988) (Figure n°24).

**e- Le remplissage et la maturation du grain :** C'est la dernière phase du cycle végétatif. Elle correspond à l'élaboration de la dernière composante constitutive du rendement qui est le poids du grain, suite à la migration des substances glucidiques produites par la feuille étendard et stockées dans le pédoncule de l'épi (Gate et *al*, 2003). Elle exige la chaleur et un temps sec, elle se fera sitôt en plusieurs étapes, la maturité laiteuse (le grain contient encore 50% d'humidité et le stockage des protéines touche à sa fin), la maturité physiologique (le grain a perdu en humidité et l'amidon a été constitué), la maturité complète (la teneur en humidité atteint environ 20 %), le grain est mûr et prêt à être récolté, c'est alors la période des moissons.

**2.6. Exigences culturales des céréales :****2.6.1. Exigences pédoclimatiques :**

**Tableau n°5 :** les exigences pédoclimatiques.

| Espèces | Exigences pédoclimatiques  |                    |              |
|---------|--|--------------------|--------------|
|         | Type de sol  | T° du sol          | pH           |
| Blé     | Terres argilo-calcaires» à porosité voisine de 10 %.             | 18 à 24 °C         | de 6,5 à 7,5 |
| Orge    | Terres légères, peu profondes, sur sous-sol calcaire (rendzines) | 20 et 25°C         | 5 à 6,5      |
| Avoine  | Terres soulevées, assez acides                                   | 9,74 à 26.83 °C    | 5 à 6,5      |
| Maïs    | Terres extrêmement variées                                       | supérieures à 10°C | 6 à 7        |

**2.6.2. Les conduites culturales :**

**Tableau n°6 :** Les différentes conduites culturales :

| Espèces | Les conduites culturales  |  |  |  |  |  |
|---------|---|--|--|--|--|--|
|         | Préparation de sol  | Fumure de fond   | fertilisation  | Semis  | irrigation   | désherbage   |
| Blé     | <p>Se fait entre août et novembre.</p> <p>Le blé nécessite un sol bien préparé et ameubli sur une profondeur de 12 à 15cm pour les terres battantes (limoneuses en générale) ou 20 à 25 cm pour les autres terres</p> | <p>en période octobre-novembre et se limite sur des apports en phosphore et en potassium</p> | <p>l'azote est un élément indispensable pour garantir un rendement remarquable. Le sol en fournit un peu mais l'essentiel doit être couvert par des apports d'engrais. L'absorption de l'azote suit la croissance du blé, faible pendant le tallage, elle croît pendant la montaison quand la plante pousse vite. L'engrais est d'autant mieux valorisé que les apports suivent ce rythme. Apporter 30% de la quantité</p> | <p>en novembre-décembre, il faut essayer de semer tôt pour bénéficier des pluies automnales. Il est indispensable de traiter les semences contre les fusarioses et septoriose. Il faut semer peu profond, entre 2 et 4 cm : les plantes issues de graines trop enterrées lèveront difficilement et seront plus fragiles.</p> | <p>l'eau est un facteur limitant de la croissance du blé. Il exige l'humidité permanente durant tout le cycle de développement. Les besoins en eau sont estimés à environ 800 mm. Un stress hydrique durant la montaison entraîne une régression de talles. Du stade « dernière feuille » au stade « épiaison » des régressions de talles et une réduction de la fertilité des épis peuvent se produire en cas d'un stress hydrique. Une manque d'eau pendant le</p> | <p>supprimer, au moindre coût, la concurrence des mauvaises herbes les plus nuisibles au rendement et à la qualité. La plupart des adventices ont fini de lever quand le blé atteint 3 feuilles, en particulier le ray-grass ; un semis précoce se désherbe en décembre. S'il y a de la folle avoine, du chardon ou des renouées, il faut un 2ème traitement au printemps.</p> |

|      |   |  |  |   |  |  |
|------|---|--|--|---|--|--|
|      |   |  | totale de l'azote au stade 3 feuilles, 40% pendant le tallage et 30% en fin montaison.   |   | remplissage du grain aboutit à une baisse du poids moyen de graines.   |  |
| Orge | doit s'apparenter à celle d'un blé. Le lit de semences doit être fin et régulier afin que le semis soit le plus homogène possible | La fertilisation azotée de l'orge d'hiver s'appuie classiquement sur 2 apports, avec une dose totale calculée selon le bilan prévisionnel (Comifer) : un premier apport a lieu début tallage à hauteur de 50 kg/ha, complétés par un second au stade épi 1 cm. | <p>Azote : Faire un apport de matière organique avant le semis. L'orge valorisera bien un apport fait en octobre. Sinon la fertilisation est identique à celle du blé.</p> <p>Phosphore et potasse : L'orge est peu gourmande en potasse et phosphore, à titre indicatif, les exportations sont de :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Si les pailles sont restituées : 0,8kg/ql de K20 et P2O5 exporté</li> <li>• Si les pailles sont</li> </ul> | <p>Orge d'hiver : semis avant le 30 octobre.</p> <p>Orge de printemps : semis avant le 20 mars.</p> | <p>Les besoins en eau d'irrigation pour l'orge dépendent de la variété, des conditions climatiques (température et pluviométrie) et du rendement objectif. Pour atteindre un rendement optimum, l'orge a besoin d'une quantité d'eau comprise entre 390 et 430 mm.</p> | <p>Le désherbage mécanique (hers-étrille) se fait en trois étapes :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Premier passage : à l'aveugle, en prélevée 3 jours après le semis (si le sol est suffisamment ressuyé)</li> <li>• Deuxième passage : au stade 3 feuilles (3 semaines après le semis)</li> <li>• Troisième passage : au début de la montaison</li> </ul> |

|        |   |   |   |   |  |  |
|--------|---|---|---|---|--|--|
|        |   |   | exportées : 2 kg/ql de P2O5 et 1,3 kg/ql de K2O   |   |  |  |
| Avoine | Pour les semis d'hiver, la mi-octobre est la bonne période avec une densité de 250 plantes/m <sup>2</sup> , soit environ 100 kg/ha selon le PMG. Pour les semis de printemps, il convient de semer le plus tôt possible à partir du 15 février, et ce en fonction de l'état du sol. Le semis peut être réalisé jusqu'à fin mars mais compromettra progressivement le rendement. Pour la densité, on visera un objectif de 300 à 350 plantes/m <sup>2</sup> , soit une dose de 100 à 130 kg/ha selon le PMG. | L'engrais azoté utilisé est un engrais organo-minéral de couverture présenté sous 2 apports pour satisfaire les besoins nutritionnels des cultures et minimiser les pertes par évaporation et lessivages dans le sol. | Elle est à raisonner en fonction du système de l'exploitation dans lequel on se trouve. En système de polyculture-élevage ou polyculture, les sources d'engrais disponibles ne sont pas les mêmes et le raisonnement de la fertilisation se gère en fonction des besoins de la plante entière : N : 1 kg/q P2 O5 : 2,0 kg/q K2 O : 2,5 kg/q | L'avoine de printemps est semée entre la fin février et la fin du mois de mars<br><br>entre 2 et 3 cm de profondeur | L'eau d'irrigation est pompée à partir du bassin avec un système d'irrigation en (utilisant l'enrouleur) | Le désherbage le plus pratiqué consiste à utiliser la herse étrille. Plusieurs stades d'intervention sont possibles : - en post-semis prélevée : il peut être réalisé dans le cas de semis plus profonds (>3 cm) lorsque la graine atteint le « stade araignée » (1ère radicules blanches visibles). - au stade 3 feuilles : 1 à 2 passages légers dans le sens du rang ou légèrement de biais. - au stade tallage : 1 à 2 passages croisés. |
| Maïs   | Veiller à obtenir une structure meuble et   | Le maïs met particulièrement bien en valeur les engrais   | La fertilisation azotée est l'un des  | Semer environ 10 jours plus tard par  | Le maïs est la céréale qui valorise  | Un à deux faux   |

|  |  |   |  |   |  |   |
|--|--|---|--|---|--|---|
|  | <p>grumeleuse et favorisant une levée régulière de la culture, ce qui facilite les interventions contre les mauvaises herbes (herse étrille, sarclage, brûlage). Faire un faux semis si possible 1-2 semaine avant le semis.</p> | <p>organiques, mais ceci dépend quand même du précédent cultural. Faire un apport de lisier (dilué 1 :1, 20-30 m<sup>3</sup> /ha) ou de fumier de bovins (20-40 t/ha) au moment de la préparation du sol ou du lit de semence. Préférer un apport de fumier avant le semis ou de lisier au stade 2-6 feuilles (meilleure assimilation de l'azote). L'épandeur à tuyaux souples ou d'autres machines spéciales sont particulièrement bien adaptés pour les apports de fumure dans le maïs. Les apports de purin ne doivent pas dépasser 25-30 m<sup>3</sup> /ha par apport. L'utilisation de lisier dilué 1:1 à 1:2 ou de lisier aéré évite de brûler les plantes et minimise les pertes d'azote sous forme gazeuse. Les apports de lisier peuvent être effectués jusqu'à ce que la plante mesure 50 cm.</p> | <p>premiers facteurs de production du maïs. Cependant, ses besoins évoluent au cours de son cycle. Du semis jusqu'à 6-8 feuilles, il n'absorbe que 2 % de ses besoins totaux. ... La période entre les stades 6-8 feuilles et la floraison concentre 85 % de l'absorption d'azote d'un maïs.</p> | <p>rapport au conventionnel pour favoriser une installation rapide et faciliter la maîtrise des mauvaises herbes.</p> | <p>le mieux l'eau qu'elle reçoit pendant son cycle A partir du stade 8 feuilles et jusqu'au stade mi-montaison, les besoins en eau augmentent très rapidement. Les maïs sont au maximum du stade mi-montaison au stade limite d'avortement des grains. Puis ces besoins se font un peu moindre tout en restant élevés jusqu'au stade 50-45 % humidité du grain. Au-delà, les besoins diminuent assez rapidement.</p> | <p>semis.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Semis pas trop tôt pour favoriser une installation rapide et faciliter la maîtrise des mauvaises herbes.</li> <li>• Semis régulier pour favoriser une levée régulière et faciliter les interventions précoces (mécaniques ou thermique).</li> <li>• Variété avec bonne vigueur au départ.</li> </ul> |
|--|--|---|--|---|--|---|

Sources : (site 5-6-7-8\_Matieu Marguerie 2017 Si Bennasseur Alaoui, 2004\_).

## **2.7. Les contraintes limitant la productivité céréalière**

### **2.7.1. Les contraintes abiotiques :**

Liés principalement aux conditions climatiques essentiellement la sécheresse et les hautes températures, ainsi que la salinité des sols ont de conséquences sur la productivité du maïs, du riz et du blé. Selon Alem et *al.* 2002 les variétés de blé dur semblent présenter une meilleure tolérance à la déshydratation foliaire due au déficit hydrique que les variétés de blé tendre, et cette supériorité se manifeste essentiellement au stade de l'épiaison où la diminution de la teneur foliaire en eau chez le blé dur est significativement moins importante que celle enregistrée chez le blé tendre (M. Salmi et *al.* ; 2015).

### **2.7.2. Les contraintes biotiques :**

Liées aux différents pathogènes notamment les maladies cryptogamiques (rouilles, septoriose, helminthosporiose), les pourritures racinaires et les insectes (Mouche de Hesse). La combinaison de ces facteurs de stress affecte négativement le rendement annuel des cultures et la qualité de la production (Bahri et *al.*, 2014).

Il existe différentes race de l'agent pathogène responsable de dessèchement, la plus part des hybrides de maïs commerciaux ont une résistance ou tolérance aux races .les plus communes de ces agents tels que la rouille commune, et le maïs de grande culture a une bonne tolérance à la maladie de Stewart, il ne nécessite aucune mesure de lutte

### **2.7.3. Les principaux problèmes phytosanitaires des céréales :**

Il est actuellement bien établi que les principaux facteurs intervenant directement et dans une large proportion dans la baisse des rendements des céréales sont essentiellement d'origine (biotique) animale et végétale (Agrios G.N. ,1997 ; Agrios G.N. ,2005 ; Lepoivre P., 2003 ; Hamadache, A. ; .Ait Abdelah, F. ; Ladada. M., 1998).

#### **2.7.3.1. Les Bio agresseurs animaux :**

Il s'agit généralement d'insectes, de nématodes, d'oiseaux et de rongeurs, pouvant entraîner des dépréciations plus ou moins importantes sur les cultures (Bakour et Bendifallah, 1990).

**a. Les Nématodes :** Parmi les nématodes phytophages des céréales *Anguinatritici* et *Heteroderaavenae*Woll, sont les plus connus et les plus communs. Ils s'attaquent respectivement aux grains et aux racines. (Bakour et Bendifallah, 1990).

**b. Les Oiseaux :** Ils sont spécialement à régime granivore, leurs dégâts peuvent être causés sur champ et même jusqu'au sein d'entrepôts, toutefois leurs attaques sur les champs peuvent être très graves. (Bakour et Bendifallah., 1990).

**c. Les Rongeurs :** Ils peuvent être très nuisibles. En Chine plus de 33 millions d'hectares sont chaque année la proie des rongeurs. En Algérie les dégâts sont estimés de 5 à 10 % de la production totale des céréales. (Bakour et Bendifallah., 1990).


**d. Les Insectes :** Les principaux insectes susceptibles de s'attaquer aux céréales sont fort nombreux et appartiennent à divers ordres entomologiques: homoptères (punaises des céréales, pucerons), orthoptères (sauterelles ; sauteriaux), lépidoptères (mineuses, tordeuses) etc.

**e. Les Bactéries :** Ce sont des pathogènes très courants sur les cultures, dans les matières organiques en décomposition et dans le sol.

**f. Les Champignons :** Les champignons sont des micro-organismes. La plupart d'entre eux existent sous forme de mycélium composé de cellules larges avec des parois chitineuses et des organes bien spécifiques (Nasraoui, 2006 ; Lepoivre, 2003). Presque tous les champignons se reproduisent soit par des spores (forme imparfaite ou asexuée) ou sexuellement (forme parfaite). Les champignons sont adaptés à survivre à l'absence de l'air, dans le sol et dans l'eau. Il existe environ plus d'un millier d'espèces inféodées aux végétaux et aux animaux, et dont certaines peuvent être hautement spécialisées. D'autres, non spécifiques peuvent s'attaquer à d'autres espèces de végétaux ou d'animaux.

La plupart des champignons pathogènes sont des saprophytes facultatifs capables de croître sur cultures ou sur tissus de plantes mortes ; d'autres sont des parasites obligatoires qui existent seulement en association intime avec des plantes vivantes (Nasraoui, 2006).

La plupart des maladies (environ 80 %) des plantes cultivées, sont dues aux champignons microscopiques, ces derniers détruisent chaque année une bonne partie (environ ¼) des récoltes mondiales (Nasraoui, 2006 ; Lepoivre, 2003 ; Geigy. 1985). Certaines maladies provoquent des fontes de semis, d'autres par contre se manifestent à partir de la montaison où même à l'épiaison alors que d'autres d'origines virales se manifestent de manière insidieuse.



**Partie III**  
***La mycorhization  
des céréales***

### Partie 3 : La mycorhization des céréales

#### 3.1-Les structures de l'association endomycorhizienne observées chez les céréales :

Les espèces graminées céréalières (blé, orge, maïs, sorgho, millet) sont considérées comme des plantes mycophile et sont utilisées dans la multiplication des champignons mychoriziens. Ces espèces forment des endomycorhizes à arbuscules (CMA) (Trouvelot et *al.* 1982). Dans ce sens (Nadji et *al.* 2017) ont montré que l'inoculation d'un blé dur chez les deux variétés WAHA et BOUSELLEM par les spores isolées à partir des écosystèmes céréalières de l'Est algérien a montré une colonisation racinaire par un certain nombre de structures endomycorhizienne telles que :

##### 3.1.1- Les hyphes intra-racinaires :

Les hyphes intra-racinaires sont d'aspect siphonné et de diamètre plus au moins épais (6 à 8µm), intensément colorés, avec peu d'enroulement intracellulaires.

##### 3.1.2- Les arbuscules :

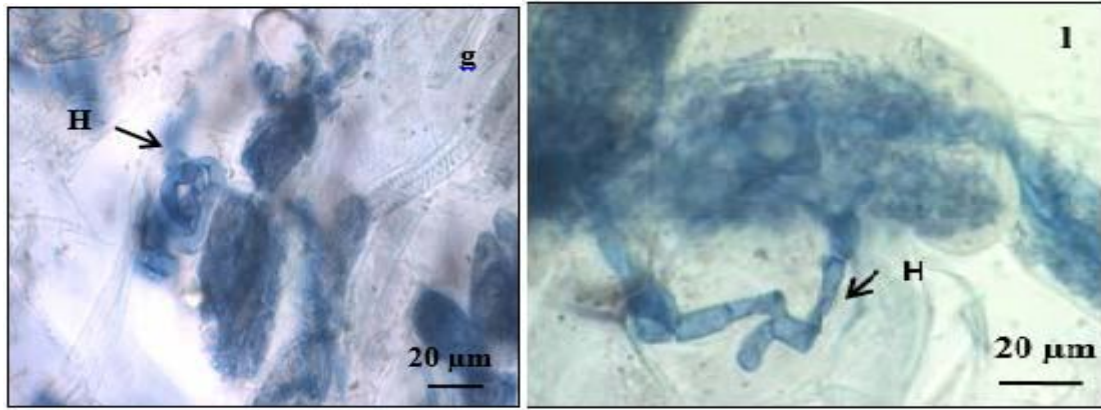
Les arbuscules ont été bien observées dans tous les systèmes racinaires examinés ils sont généralement plus petits que les vésicules. Les arbuscules observées sont composés d'un tronc gonflé et de ramifications fines, ce morphotype selon correspond aux espèces appartenant aux Gigasporacées. (Dodd et *al.*2000et Blaszkowsk et *al.*, 2003).

**3.1.3 Les vésicules** Selon Zubek et *al.* (2008) les vésicules se forment seulement chez les genres appartenant aux Acaulosporacées, Gloméracées. La présence importante des vésicules ovalaires et allongées dans les sols des régions semi arides indique la prédominance d'espèces appartenant surtout au genre Glomus ; par contre les vésicules du genre Acaulospora sont irrégulières et généralement peu colorées. Les vésicules et/ou les arbuscules constituent les parties actives de ces hyphes assurant soit les échanges entre les partenaires (arbuscules) ou le stockage des nutriments pour le champignon (vésicules)..

##### 3.1.4. Les mycéliums fongiques

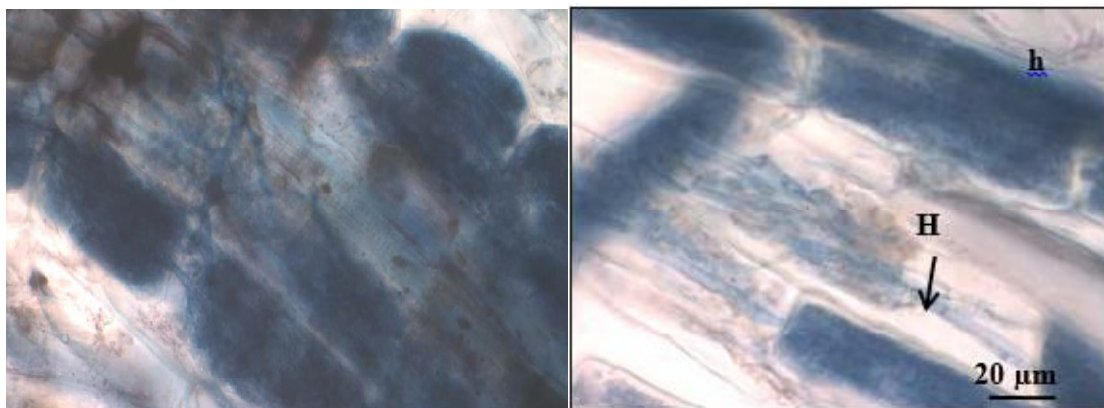
Les mycéliums fongiques colonisent les racines sous forme de filaments non septés droits ou tortueux, peuvent être fins ou larges, à l'intérieur et à l'extérieur des racines. On distingue trois types de mycélium :

Type 1 : Mycélium qui se colore mal avec l'encre de chine de diamètre moyen (6 à 7 µm) est difficilement visible au microscope photonique. Cependant, on peut observer la présence de gouttelettes lipidiques dans les hyphes lorsqu'ils occupent les cellules racinaires et prennent la forme irrégulière d'un « H ». Ils correspondent au genre Acaulospora (Dodd et *al.*2000).



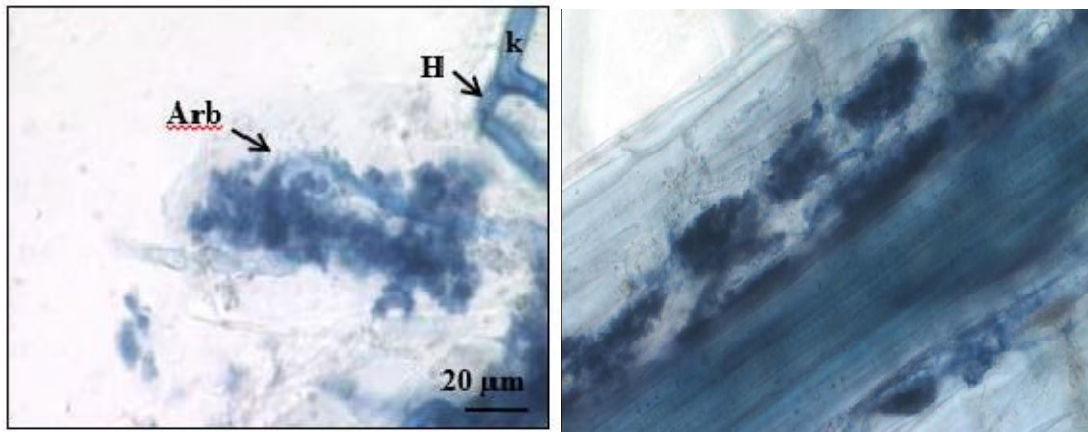
**Figure n°27** :racine de blé inoculée par *Acaulospora* à gauche Hyphe ramifié en spirale  
A droite Hyphes interne visibles par rangées des gouttelettes lipidiques ( Nadji,2017)

Type 2 : Mycélium composé d'hyphes droits qui s'étendent entre les cellules en formant un «Y », et des liaisons en « H » qui se colorent intensément ; ce type de mycélium est présent dans tout le système racinaire et correspond au genre *Glomus* (Dodd et *al.*2000 ; Balscowski,2003).



**Figure n°28** : ramification des arbuscules Hyphes droites dans la racine  
Le long racine inoculée par *Glomus sp* Source : Nadji, 2017

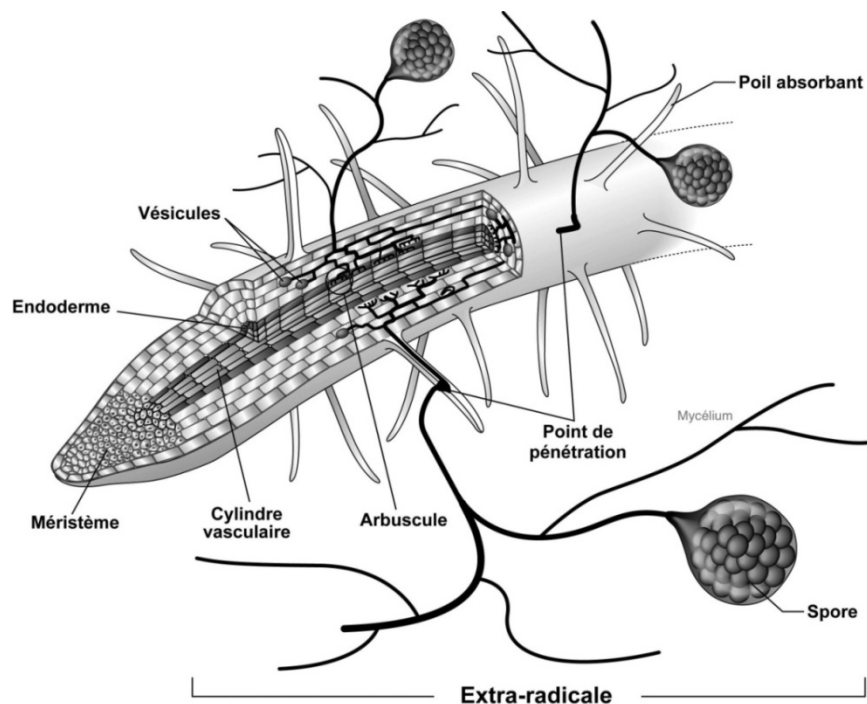
Type 3 : Mycélium constitué d'hyphes épais (8 à 9 µm) qui se colorent intensément et progresse en boucles à l'intérieur de la racine ; il est caractérisé par l'absence de vésicules. Il correspond aux genres *Gigaspora* et *Scutellospora*



**Figure n°29** : Arbuscules ramification des arbuscules blé inoculé par *Scutellospora ng* (Nadji,2017)

### 3.1.5. Les spores

Les spores sont observées dans le système racinaire de blé sont très petites globulaires ou sphériques attachées à un hyphe suspenseur, ce qui est typique du genre *Glomus*.



**Figure n°30** : schéma légendé des spores mychoriziens (Fortin,2015)

### 3.2-La biodiversité des CMA au niveau des cultures céréalières:

La diversité morpho typique des CMA dépend de la qualité du sol et la capacité des spores à s'adapter. Leur activité symbiotique est variable en fonction de la spécificité fonctionnelle de

chaque souche qui peut être spécialisée à une fonction donnée ou être généraliste (Ngonkeu et *al.* 2013).

**Tableau n°7** : les espèces mycorhiziennes (CMA) recensées sur céréales au niveau de plusieurs zones agro écologiques

| Espèce                                      | Endroit                   | Auteur                         |
|---|---------------------------|--------------------------------|
| propagules (spores)<br>(Acaulospora koskei) | Semi-aride (blé) Ouargla  | Mohammedi ; 2018               |
| propagules (spores)<br>(Acaulospora koskei) | Semi-aride (orge) Ouargla |                                |
| Acaulospora scrobiculata                    | Semi-aride (blé) Sétif    | Hadj-youcef et <i>al</i> ;2020 |
| Gigaspora albida                            |                           |                                |
| Glomeraceae ambisporum                      |                           |                                |
| Gigaspora margarita)                        |                           |                                |

### 3.3.L'inoculation par des souches de CMA :

La diversité fonctionnel des champignons mychoriziens et leur non spécificité d'hôtes a facilité la fabrication des inoculums mychoriziens. Un inoculum comprenant une ou deux souches de CMA peut être utilisé sur plusieurs espèces de cultures ce qui explique le succès de l'inoculation des racines des plantes d'orge et de blé par les spores provenant du palmier dattier ( Akiyama ; 2007).Les bio fertilisants sous forme liquide, poudre fine ou granulaire à base des inoculums mychoriziens ont fait leurs preuves dans le secteur des grandes cultures, depuis trois ans, près de 200 producteurs de maïs et soya canadiens testent les inoculants mychoriziens.



**Figure n°31** : Les bio fertilisants (Faucher *etal*, 2013).

Des essais ont aussi été mis en place par les agriculteurs dans les grandes cultures pour valider les avantages des mycorhizes, parallèlement de nombreux essais côte à côte sont mis en place,

ainsi l'importance des biofertilisants a été recensée pour certaines cultures de grandes importance (tableau n°8)

**Tableau n 8:** Importance des associations mycorhiziennes pour certaines grandes cultures :

| Grande importance | Moyenne | Sans importance<br>(indépendantes) |
|-------------------|---------|------------------------------------|
| Fèves             |         |                                    |
| Lin               | Avoine  | Betterave                          |
| Mais              | Blé     | Canola                             |
| Pois              | Orge    | Moutarde                           |
| Pommes de terre   | Soya    | Sarrasin                           |
| Tournesol         |         |                                    |

Source : (Plenchette et *al.*, 1983; Troeh, et Loynachan, 2003)

Jusqu'à présent, l'augmentation de rendement moyen obtenue à travers le Canada dans les essais de cultures de blé et d'orge bio fertilisés avec l'inoculant mycorhizien Myke Pro est de 10,1 % dans le blé et de 8,8 % dans l'orge. Le cultivar avec mycorhizes semble avoir passé plus facilement à travers les stress hydriques de l'été, son feuillage est vert par rapport à celui du cultivar sans inoculum.



**Figure n°32 :** Mycorhization d'un essai de céréales, à droite Blé inoculé à gauche Blé non inoculé. (Faucher et Perreault, 2013)

### 3.4. Méthodes de quantification de CMA chez les céréales :

Pour évaluer quantitativement les mycorhizes, on emploie un certain nombre de paramètres.

Les plus importants sont :

- **Le pourcentage de plants mycorhizés :** Il correspond au rapport sur la centaine du nombre de plants pourvus de mycorhizes et du nombre total de plants observés (Maroneck et *al.* 1982).
- **Le pourcentage de racines mycorhizées :** Il est calculé par plant ou par échantillon en divisant le nombre de racines infectées par le nombre total de racines comptées et en multipliant par 100 (Marx. 1977). C'est le paramètre le plus utilisé.

D'autres paramètres comme le nombre de mycorhizes par plant, le nombre des mycorhizes par longueur unitaire ou de mycorhizes actives par volume ou poids unitaire du sol, le poids des mycorhizes par surface ou volume unitaire du sol (Grand et Harvey, 1982), le pourcentage de racines colonisées par les hyphes, les arbuscules et les vésicules (McGonicle et *al.*, 1990), le pourcentage de propagation après plantation des mycorhizes du champignon introduit artificiellement et le pourcentage de colonisation par les champignons symbiotiques indigènes (McAfee et Fortin, 1986) sont parfois calculés.

### **3.5 Effet des inoculations mycorhiziennes sur les espèces céréalières :**

#### **3.5.1-Paramètres morphologiques :**

Belabed (2015) a observé chez deux variétés de blé dur (Boussellem et Waha) et blé tendre (Ain-Abid et Hidhab) une augmentation remarquable de la croissance de longueur des feuilles chez les variétés de blés inoculées par les CMA comparativement aux plantes témoins. Ces augmentations sont de 21%, 20, 3%, 17, 8%, 17%, respectivement pour les variétés Bousalem (blé dur), Hidhab (blé tendre), Waha (blé dur), Ain-Abid (blé tendre). Un gain d'enracinement a été également observé chez les variétés inoculées, les variétés Bousalem et Waha ont mieux répondu à l'inoculation avec des augmentations de longueur racinaire de 37% et 38,1%

Meddich et son groupe de chercheurs en 1996 ayant travaillé sur l'orge, ont montré que les champignons mycorhizogènes à arbuscules stimulent la croissance des deux parties aérienne et racinaire. En effet, les arbuscules sont le siège des échanges entre le champignon mycorhizogène et la plante-hôte, ce qui accroît la surface d'échanges entre les deux partenaires, favorise le prélèvement de phosphore et stimule la croissance de la plante.

Mohammedi (2018), a mycorhizé une variété locale de blé (*Triticum durum*) et d'orge (*Hordeum vulgare* L) avec un inoculum mycorhizien constitué de souches isolées des palmeraies d'Ouargla. Pendant les quatre premières semaines de culture, le nombre moyen de feuilles des plantes de blé passe de 2 pour les plantes non inoculées à 6 pour les plantes inoculées par tous les morphotypes. Au-delà de cette période le nombre de feuilles a varié

selon les différents morphotypes utilisés. Pour l'orge, le nombre moyen des feuilles passe de 4 pour les plantes non inoculées à 11 pour les plantes inoculées durant les trois premières semaines de culture, par tous les morphotypes étudiés. Selon ce même auteur le morphotype 2 a permis l'amélioration de la hauteur des plantes de blé dont le suivi est effectué pendant les huit semaines d'expérimentation. Alors qu'aucun effet n'a été observé pour l'orge. De même l'effet de l'inoculation des plantes de blé et d'orge sur la longueur des entre nœuds mesurée pendant deux semaines a montré un allongement de 2 cm pour le morphotype jaune globuleux à sub-globuleux (*Acaulosporakoskei*) et 1cm pour le morphotype noir sphérique (*Gigasporasp*), présentant des hyphes. Après deux mois de croissance, une nette amélioration de la biomasse totale a été enregistrée, les poids de la matière sèche aérienne et racinaire des plantes inoculées sont plus importants que ceux des témoins. Cependant l'augmentation de la biomasse des plantes d'orge et de blé inoculées comparées aux non inoculés a aussi été signalée par Khalvati et al. (2005). Cette augmentation est de 20% plus élevée que celle des plantes non-mycorhizés.

### 3.5.2. Paramètres physiologiques :

Une étude a été menée pour déterminer les effets de la mycorhization arbusculaire sur la croissance, le rendement en grain et l'acquisition des minéraux de deux blé d'hiver (*triticum aestivum* L.) cultivés au champ dans des conditions bien arrosées et soumises à un stress hydrique par (AL-karaki). Les résultats de cette étude montrent que PMG a été significativement amélioré par rapports aux plants témoins. Dans le maïs la symbiose AM augmente le poids sec de l'épi, la longueur de l'épi, et le poids sec et les dimensions de la graine.

**Tableau n°9:** tableau récapitulatif des contraintes étudiées à travers l'inoculation des espèces céréalières par des espèces mycorhiziennes arbusculaires :

| Espèces colonisées  | Espèces CMA                | Contrainte étudiée                         | L'auteur     |
|---|----------------------------|--|--------------|
| Hordeum Vulgare. L<br>Triticosecale Wittm<br>Triticum durum | Azospirillum<br>brasilense | La teneur en azote<br>avec stress hydrique | Nadji ;2017  |
| Triticum durum<br>Triticum aestivum                         | Rhizophagus<br>irregularis | La qualité du grain                        | Essiane 2014 |
| Oryza Satival   | Acaulospora Spinosa        | productivité                               | Komlan 2018  |

|                     |                                    |  |                    |
|---------------------|------------------------------------|--|--------------------|
| Pennisetum Glaucum  | Glomus Aggregatum                  | La croissance  | Dupanois 2001      |
| Triticum durum Desf | Rhizoglo-<br>mulus<br>intraradices | Tolérance au stress<br>hydrique                      | Belabed 2015       |
| Triticum aestivum   | Rhizophagus<br>irregularis         | stress salin et taux<br>élevés en CO <sub>2</sub>    | Zhu et al 2018     |
| Zea mays L.         | Rhizophagus<br>irregularis         | Tolérance au stress<br>hydrique                      | Zhao et al. 2015   |
| Triticum aestivum   | Rhizophagus<br>irregularis         | Protection contre<br>l'agent pathogène<br>(l'oïdium) | Mustapha 2015      |
| Triticum aestivum   | Rhizoglo-<br>mulus<br>intraradices | Tolérance aux<br>métaux lourds                       | Sharma et al; 2017 |
| Hordeum Vulgare L   | Acaulospora Kosfaei                | La croissance  | Mohammedi 2018     |

### 3.5.3.-Bio protection contre les stress environnementaux :

#### 3.5.3.1.-Stress abiotiques :

Les CMA améliorent la performance de leurs hôtes sous stress salin, Zhu et al. 2018 en travaillant sur l'effet des AM sur la conductance stomatique ( $g_s$ ) et morphologie stomatique de plantes de blé soumises à un stress combiné de CO<sub>2</sub> et NaCl élevé a trouvé que la symbiose AM a augmenté la surface foliaire et la densité stomatique (SD) de la surface abaxiale.

(Zhu et al. 2016) affirment aussi que la taille des stomates et l'ouverture des surfaces des feuilles adaxiales et abaxiales étaient plus élevés chez les plantes mycorhizées que les plantes non mycorhizées soumises à un stress salin et de CO<sub>2</sub> élevé. Les plantes mycorhizées ont montrés une conductance stomatique plus élevée ( $g_s$ ) et un taux maximum de ( $g_s$ ) par rapport à la vapeur d'eau ( $g_s \text{ max}$ ) comparé aux plantes non mycorhizées.

(Fernande et Moreno, 2016) montrent à travers une étude les mécanismes de tolérance au stress hydrique chez les plantes inoculées avec des CMA, par une modification du contenu des hormones végétales, telle que les strigolactones, l'acide jasmonique, (JA) et l'acide absicique (ABA). Le JA semble être impliqué dans le signal de stress chez les plantes mycorhiziennes par une augmentation des concentrations d'ABA et en même temps, l'ABA a un effet régulateur sur les concentrations de strigolactone. En outre il y'a une amélioration de l'état hydrique des plantes, de la conductance stomatique, de l'état nutritionnel et des réponses des plantes pour faire face à un stress hydrique, tel que l'ajustement osmotique et une activité

antioxydant. Ces modifications provoquent une augmentation de l'assimilation du CO<sub>2</sub> et de la production de photoassimilats, améliorants ainsi la croissance des plantes pendant une sécheresse.

### 3.5.3.2 Les stress biotiques

D'après A. Lounes-Hadj Sahraoui 2013 ; il a été démontré chez une variété d'orge *Hordeum vulgare* colonisé par *Glomus mosseae* contre *Phytophthora parasitica* et *Gaeumannomyces graminis* et par *Glomus versiforme* contre *Ralstonia solanacearum*. De même il a été observé que la mycorhization réduit les effets néfastes causés par les nématodes parasites comme *Pratylenchus* ou *Meloidogyne*. (Tiby Gilbert Guissou, 2001) a montré que la symbiose mycorhizienne chez l'avoine *Avena sativa* L. conduit à l'atténuation des dommages produits par les nématodes du genre *Meloidogyne*, espèce également parasite des plantes pérennes et largement répandue dans les sols d'Afrique de l'Ouest (Duponnois et al. 1997 et 1998). La bio protection des racines contre ces agents pathogènes dépend généralement d'une symbiose mycorhizienne pleinement établie, bien que certains résultats semblent suggérer des effets protecteurs dès le stade pré-symbiotiques des champignons MA (Slezack et al, 2000 ; Gallou et al, 2011).

### 3.6. Les mécanismes de défense induits par le champignon mycorhizien arbusculaire :

Lors de l'établissement de la symbiose mycorhizienne arbusculaire certains événements similaires à ceux déclenchés lors des interactions plante pathogènes, ont été identifiés, comprenant la **perception du CMA**, la **transduction du signal** et l'**activation des gènes de défense** chez la plante hôte, la présence des CMA dans les tissus de l'hôte stimulerait donc des réactions de défense contre les attaques d'agents pathogènes ; ce phénomène est appelé 'Résistance induite par les mycorhizes' (RIM). Ces mécanismes de défenses augmentent généralement de manière transitoire lors de l'établissement de la symbiose, ce qui semble indiquer l'existence de mécanismes de rétrocontrôles chez les plantes mycorhizées ( Pieterse et al, 2012) Une étude de biocontrôle du blé contre un agent pathogène responsable de l'oïdium (*Blumeria graminis* f. sp. *tritici* Bgt) a montré que l'inoculation des plants de blé par un champignon mycorhizien *Funneliformis mosseae* a provoqué un taux de protection contre Bgt, estimé à 78%, observé sur les feuilles des plants de blé mycorhizés ainsi qu'une accumulation de composés phénoliques et de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> au niveau du site de pénétration de l'agent pathogène Bgt (G.Mustapha et al., 2015). Ces mécanismes associés à la RIM ont réduit le développement de Bgt et induit une élicitation de type systémique plutôt qu'une potentialisation « priming » des défenses dans les feuilles des plants de blé mycorhizés.(G. Mustapha 2015).

Certains CMA peuvent déclencher une réaction d'hypersensibilité (Allen *et al.* 1989) qui se caractérise par un dépôt de callose, une production de protéines PR-1 et de composés phénoliques (Gollotte *etal.* 1993). Une accumulation transitoire d'acide salicylique (AS) durant les premiers stades de l'inoculation également été observée dans l'interaction entre le riz et *F. mosseae* (Blilou *et al.* 2000b). Dans ce cas, l'accumulation de l'AS est également corrélée avec une surexpression des gènes codant pour les LTP (Lipid transfer protein) et la phénylalanine ammonia-lyase (PAL) (Blilou *et al.* 2000b).

### 3.7. La réponse différentielle des espèces céréalières à la symbiose mycorhizienne

Selon (Essiane Ondo ; 2014) l'expression de la symbiose dépendrait du génotype de la plante hôte et de celui du champignon considéré. Dans une approche d'utilisation des mycorhizes pour réduire les effets de stress salins sur le rendement du blé et l'absorption d'éléments nutritifs, (Daei *et al.* 2009) avaient déjà montré que dans l'optique d'optimiser l'utilisation des mycorhizes, il est important de choisir la bonne combinaison plante champignon.

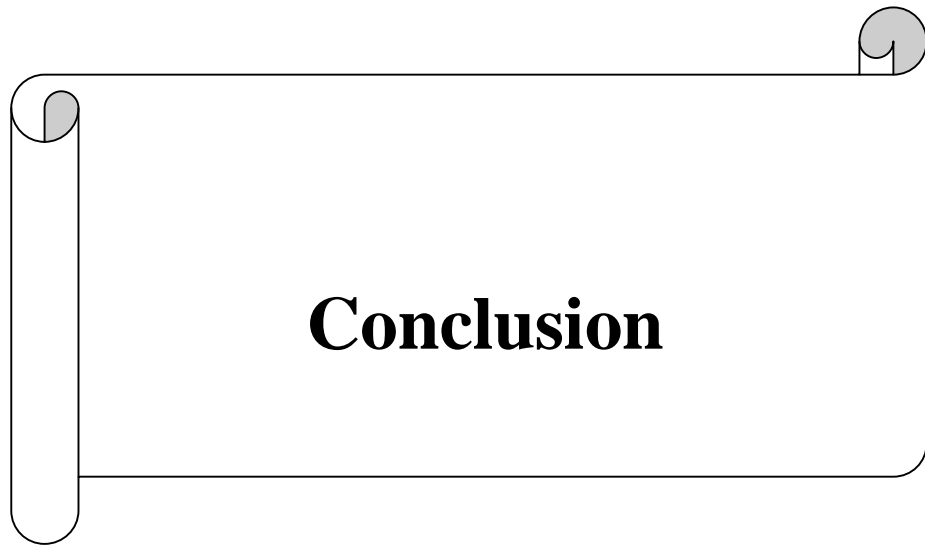
Le criblage au champ de 53 variétés de blés anciens a montré des différences dans leur aptitude à développer des mycorhizes avec des champignons indigènes. Des plantes analysées, seul cinq variétés étaient toutes mycorhizées au Tallage, alors que toutes l'étaient au stade Epiaison. Au stade Maturation des épis, dix-neuf variétés montraient une diminution de la mycorhization. Le comportement variétal dépendait des conditions de culture et du nombre de propagules fongiques présents dans un sol.

D'après (Taibi *et al.*, 2013) l'analyse des taux d'infection ainsi que de la cinétique de l'activité symbiotique réalisée à travers la profondeur racinaire, a permis de déceler une différence variétale qui est en relation avec le comportement adaptatif et le modèle racinaire de chaque variété. Le comportement symbiotique spécifique à chaque variété peut être en relation avec l'interaction hôte inoculum fongique, ou avec la stratégie de chacune de gérer le stress.

La variété d'orge locale Saida connue pour sa tolérance au stress et son adaptation aux années difficiles (Fernandez 1992), établie précocement (stade tallage) une symbiose mycorhizienne élevée, malgré que des conditions climatiques favorables. Sa cinétique symbiotique est liée à son enracinement profond et volumineux (Taibi *et al.* 2013).

L'observation du comportement symbiotique a permis de déceler une aptitude adaptative d'une variété de blé dur (Ardente) connue pour sa sensibilité aux contraintes abiotiques, ce

qui envisagerait de la reconduire dans un cadre d'intensification durable avec des conduites permettant de valoriser et d'améliorer les services éco systémiques.



## Conclusion

---

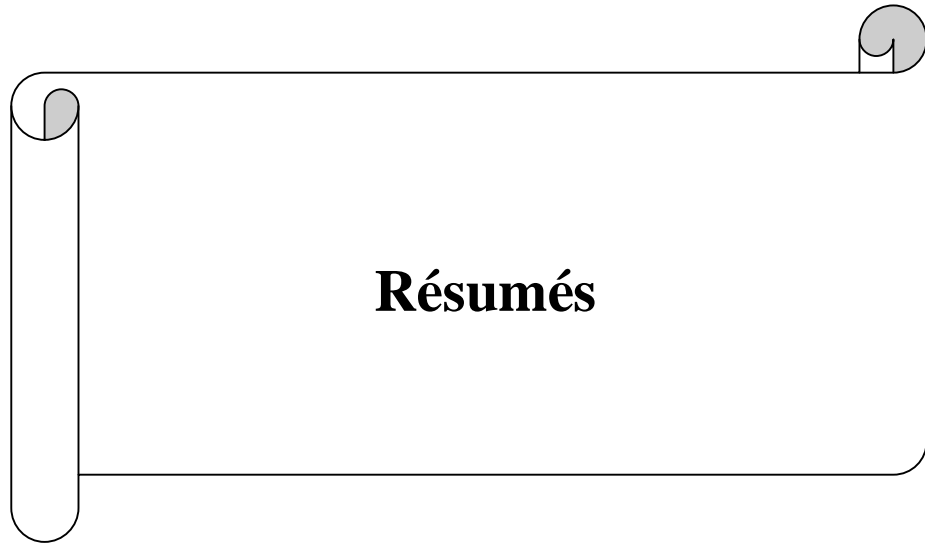
### Conclusion :

La culture des céréales est de plus en plus soumise aux conditions de stress environnementaux biotiques et abiotiques. En effet ces contraintes constituent un handicap pour toute action d'amélioration de toutes les espèces céréalières.

La tolérance des plantes au stress environnementaux exige des changements morphologiques (longueur des feuilles et des racines, ainsi que leur poids et leur matière sèche) et métaboliques, tel que la sécrétion des molécules osmo-protectrices (la proline et les sucres solubles). La plante profite des associations symbiotiques avec les différents microorganismes de la rhizosphère dont les champignons mycorhiziens arbusculaires, pour déclencher les mécanismes de défense et assurer le fonctionnement racinaire normale contribuant ainsi aux bons développements et croissance des plantes sous divers stress environnementaux.

Ce travail constitue une synthèse bibliographique des travaux réalisés sur l'effet de la symbiose avec les champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA) des différentes espèces céréalières en conditions de stress environnementaux et/ou contraintes d'installation. Ces études et travaux ont permis de montrer que la colonisation des racines par les CMA améliore l'absorption de l'eau et des éléments minéraux (principalement le P et N) dans la plante céréalière en échange du carbone photosynthétique, améliorant ainsi la croissance et la forme physique de la plante, la tolérance au stress et la résistance à l'infection pathogène.

Pour conclure on peut dire que la symbiose mycorhizienne est un outil qui permet aux cultures céréalières de s'installer et d'avoir une meilleure production, et qui a une grande importance comme étant une approche systémique dans le développement durable



## Résumé

---

### Résumé

Les cultures céréalières sont considérées comme des cultures stratégiques en Algérie et sont confrontées à un double défi : assurer une sécurité alimentaire pour une population à fort taux démographique et amortir la dégradation des ressources naturelles. Toutefois la croissance de ces cultures et l'amélioration de leur rendement sont limitées par différentes contraintes d'installation telle que les stress abiotiques provoqués par les conditions climatiques défavorables qui constituent un frein à toute action d'amélioration. L'étude du partenariat symbiotique entre les plantes céréalières et les champignons mycorhiziens arbusculaires(CMA) permet de comprendre le rôle de ces derniers dans la nutrition minérale et hydrique ainsi que dans la bio protection de ces plantes hôtes. Ce type de symbiose constitue la principale approche systémique du sol qui est non seulement vitale pour l'accroissement des plantes céréalières mais constitue également un des enjeux majeurs, pour une agriculture plus durable limitant les intrants chimiques et permettant une optimisation qualitative et quantitative de la production végétale.

Notre étude s'intègre dans le cadre d'une synthèse bibliographique qui vise à présenter les travaux réalisés sur l'effet de la symbiose mycorhizienne arbusculaire sur les cultures céréalières. Les résultats obtenus par tous ces travaux ont montré des effets positifs des CMA sur la production céréalière et confirment que cette symbiose conduit à une meilleure croissance et a une meilleure tolérance des espèces céréalières aux divers stress biotiques et abiotiques avec une amélioration de leur rendement comparativement aux plants non mycorhizés.

**Mots clés :** développement durable, cultures céréalières, champignons mycorhizien arbusculaires

## Abstract

---

### Abstract

Cereal crops are considered strategic crops in Algeria and are faced with a double challenge: ensuring food security for a population with high demographic rates and cushioning the degradation of natural resources. However, the growth of these crops and the improvement of their yield are limited by various installation constraints such as biotic and abiotic stresses conditions which constitute a brake on any improvement action. The main systemic approach to improve cereal production is the symbiosis by arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) which are the main symbiotic components of the soil. This symbiosis is involved in the development and promoting the growth of plants thanks to their mineral and water nutrition and bioprotection system. In the context of sustainable development, the use of mycorrhizae represents one of the major challenges, for a more sustainable agriculture limiting chemical inputs and allowing qualitative and quantitative optimization of plant production.

Our study is part of a bibliographic synthesis, which aims to present the work carried out on the effect of arbuscular mycorrhizal symbiosis on cereal crops. The results obtained by all those works have shown positive effects of (AMF) on cereal production and confirm that the arbuscular mycorrhizal symbiosis leads to better growth and to better resistance of cereal species to various biotic and abiotic stresses with an improvement in their yield compared to not mycorrhizal plants.

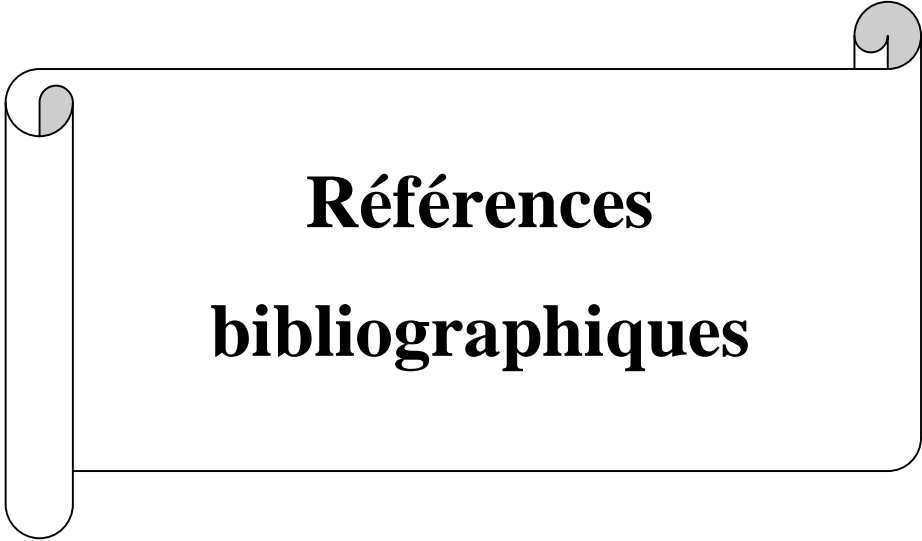
**Keywords:** sustainable development, cereal crops, arbuscular mycorrhizal fungi.

### ملخص

تعتبر زراعة الحبوب زراعة إستراتيجية في الجزائر وهي تواجه تحدي مزدوج: ضمان اكتفاء غذائي في ظل معدل ديمغرافي عالي من جهة والتقليل من انخفاض وزوال الموارد الطبيعية من جهة أخرى، زيادة علي ذلك هناك عدة عوائق تحد من نمو هذه الزراعات وتحسين عائداتها منها مختلف الضغوطات البيئية الحيوية واللاحيوية التي تثيرها العوامل المناخية الغير ملائمة والتي تعتبر بدورها أكبر عائق لكل ما يعمل على تحسين الإنتاج. عدة طرق اتبعت لتحسين إنتاج الحبوب نذكر من أهمها الطريقة التي تعتمد على إستخدام فطريات الميكوريزا التي تعتبر من أهم المكونات الرئيسية للتربة التعايشية. هذه إلگكائنات الدقيقة التعايشية تساهم في تسبير الدورات البيولوجية والبيوكيميائية التي تحدث بين النبات والتربة حيث تقوم بتحسين نمو النبات بفضل مساعدته على امتصاص الماء والأملاح المعدنية. استعمال فطريات الميكوريزا يمثل أحد التحديات الرئيسية في إطار التنمية المستدامة من أجل زراعة أكثر استدامة للحد من استعمال المواد الكيميائية والسماح بالتحسين من نوعية وكمية الإنتاجية النباتية.

تتمثل دراستنا في عدة بحوث تهدف إلى تقديم نتائج أعمالهم إنجازها لدراسة أثر فطريات الميكوريزا على زراعة الحبوب، النتائج التي حققتها هذه الأعمال توضح الأثر الإيجابي لفطريات الميكوريزا على إنتاج الحبوب وتؤكد أن التعايش السلمي مع هذه الفطريات يؤدي إلى نمو أفضل ومقاومة أفضل لمختلف الضغوطات البيئية الحيوية واللاحيوية مع تحسن معتبر في مرد ودية الإنتاج مقارنة بالنباتات الأخرى.

المستدامة، زراعة الحبوب، فطريات الميكوريزا **الكلمات المفتاحية:** التنمية



**Références  
bibliographiques**

### Références bibliographiques

- **AGRIOS G.N., 1997** - Plant Pathology.4th Ed., Elsevier Academic press, Massachusetts,USA, 992 p.
- **Akiyama K, Matsuzaki K-I, Hayashi H. 2005.** Plant sesquiterpenes induce hyphal branching in arbuscular mycorrhizal fungi. *Nature* 435: 824–827.
- **Akiyama K., 2007.** Chemical identification and functional analysis of apocarotenoids involved in the development of arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Bioscience biotechnology and biochemistry*, 71(6): pp. 1405- 1414
- **Alaoui S.B. 2003.** Conduite technique de l'orge. Production de fourrage à partir de céréales cultivées seules ou mélangées avec les légumineuses. Techniques de production des principales cultures fourragères en Bour et en irrigué. Session de formation au profit des techniciens et ingénieurs de l'ORMVA des Doukkala. Décembre 2003
- **Al-Karaki G. McMichael B · Zak J .2004.** Field response of wheat to arbuscular mycorrhizal fungi and drought stress. *Mycorrhiza* 14:263–269 DOI 10.1007/s00572-003-0265-2
- **Alem C., M. Labhilili, K. Brahmi, M. Jlibene, N. Nasrallah, & A. Filali-Maltouf, 2002.-** Adaptations hydrique et photosynthétique du blé dur et du blé tendre au stress salin. *C. R. Biologies*, 325, 1097-1109
- **Allen. MF, Allen. EB, Friese. CF., 1989.** Responses of the non-mycotrophic plant *Salsola kali* to invasion by vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. *New Phytologist* 111: 45–49.
- **Aloui A, Recorbet G, Gollotte A, Robert F, Valot B, Gianinazzi-Pearson V, Aschi-Smiti S, Dumas-Gaudot E. 2009.** On the mechanisms of cadmium stress alleviation in *Medicago truncatula* by arbuscular mycorrhizal symbiosis: A root proteomic study. *Proteomics*9: 420–433.  
**Andich K. et S.B. Alaoui. (2003).** Elaboration d'un référentiel d'aide à la décision pour les céréales d'automne, Dalil Al Fallah. Version 1.0.
- **Anonyme., 2001.** Les mycorhizes chez les arbres, planète mycorhizes, futura planète futura science.

## Références bibliographiques

---

- **Anonyme.** Non daté. Les variétés de céréales d'automne cultivées au Maroc. Ed. SONACOS. 136 pages.
- **Anonyme. 2002.** Les variétés de céréales, de légumineuses et d'oléagineuses commercialisées par la SONACOS. 35 pages. 46
- **Anonyme 2016 .** ; article RAISONNER L'ERRIGATION DE SON MAÏS
- **Augé, R.M. 2001.** Water relations, drought and vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Mycorrhiza* 11, 3-42. Doi: 10.1007/s005720100097
- **Audet P, Charest C, 2006.** Effects of AM colonization on “wild tobacco” plants grown in zinc-contaminated soil. *Mycorrhiza* 16: 277-283.
- **Augé, R.M., H.D. Toler, J.L. Moore, K. Cho, and A. M. Saxton. 2007.** Comparing contributions of soil versus root colonization to variations in stomatal behavior and soil drying in mycorrhizal *Sorghum bicolor* and *Cucurbita pepo*. *J. Plant Physiol.* 164, 1289-1299. Doi: 10.1016/j.jplph.2006.08.005
- **Bahri A,Rouissi A,Selmi H.Amraoui M,Tayechi L et Rouissi H.,2014.**Caractérisation nutritionnelle de quelques ressources alimentaires protéiques locales en Tunisie. 21èmes « Rencontres Recherches Ruminants ». Paris
- **Bago. B, Zipfel. W, Williams. RM, Piché. Y., 1999.** Nuclei of symbiotic arbuscular mycorrhizal fungi as revealed by in vivo twophoton microscopy. *Protoplasma* 209: 77-89. DOI: 10.1007/BF01415703
- **BAKOUR, L., ET BENDIFALLAH, K, 1990 -** Rapport d'enquête. Etat sanitaire des denrées entre posées dans les unités de stockage de D, B, K, Bouira et Ain Bessem.
- **Balergue. C, Puch-pages. V, Becard. G, Rochange. SF., 2011.** The regulation of arbuscularmycorrhizal symbiosis by phosphate in pea involves early and systemic signalling events. *Journal of experimental botany* 62: 1049–60.
- **Belabed. S., 2015.** Effet de l'inoculation des blés dur et tendre (*Triticum durum*. Desf et *T. aestivum*. L) par les champignons mycorrhizogènes a rbusculaires sous stress hydrique.Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master en Biotechnologie et Génomique Végétales. Université de constantine. Pp 09-34.
- **BELAID D., 1986 :** Aspect de la céréaliculture algérienne, Ed- O.P.U, 217p.
- **.Benabdallah Mohamed EL Amine 2016 .,** mémoire de master Les caractères et les effets d'une fertilisation biologique par le grignon d'olive sur le rendement des cultures des céréales., UNIVERSITE de TLEMCEM ., Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et Sciences de la Terre et de L'Univers

## Références bibliographiques

---

- **Ben Belkacem. 2003:** la recherche variétale sur les blés en Algérie ITGC KHROUB,Céréalicultures N ° 20.
- **Benedetto. A, Magurno. F, Bonfante. P, Lanfranco. L, 2005.** Expression profiles of a phosphate transporter gene (GmosPT) from the endomycorrhizal fungus *Glomus mosseae*. *Mycorrhiza* 15: 620-627.
- **Benmakhlouf 2018.**Thèse de doctorat Etude de l'effet des phytohormones sur la croissance du blé dur(*Triticum durum* Desf.) var. Kebir cultivée dans des conditions salines,P18
- **Blazkowski J, Tadych M, Madej T, Adamska I, Iwaniuk A. 2003.** Arbuscular mycorrhizal fungi (Glomales,Zygomycota) of Israeli soils. *Mat. II Polsko-Izraelskiej Konf. Nauk. nt. "Gospodarowanie zasobami wodnymi i nawadnianie roslin uprawnych"*. *Przeglad naukowy Wydz. Inz. Kształt. Srod* 22: 8–27.
- **Blilou. I, Bueno. P, Ocampo. JA, García Garrido. JM., 2000.** Induction of catalase and ascorbate peroxidase activities in tobacco roots inoculated with the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus mosseae*. *Mycological Research* 104:722–725.
- **Bonfante. P, Genre. A, 2010.** Mechanisms underlying beneficial plant-fungus interactions in mycorrhizal symbiosis. *Nature communications*, 1(4), 48
- **Botarela, 2012 .,** Article Description des poacées (graminées), Botarela.fr
- **Bozzini A., 1988.** Origin, distribution, and production of durum wheat in the world.in Fabriani G. et C. Lintas (éd). *Durum: Chemistry and Technology*. AACC (Minnesota), États-Unis. p. 1-16
- **Brundrett M, Melville L et Peterson L, 1994.** Practical methods in mycorrhiza research: based on a Workshop organized in conjunction with the ninth North American Conference on Mycorrhizae, University of Guelph, Guelph, Ontario. Mycologue Publications, c1994. 161
- **Brundrett. MC., 2008.** Mycorrhizal Associations: The Web Resource. Date accessed. <mycorrhizas.info>.
- **Brunel. B.,M. Bourgeois, E. Coquillart, M. Cournarie, C. Fassino., 2011.** Les mycorhizes. Supagro.fr
- **Buee. M, Rossignol. M, Jauneau. A, Ranjeva. R, Bécard. G, 2000.** The pre-symbiotic growth of arbuscular mycorrhizal fungi is induced by a branching factor

## Références bibliographiques

---

partially purified from plant root exudates. *Molecular Plant-Microbe Interactions* 13: 693-698

- **Cimmyt, 1991.** Annuel report World wheat facts and trends: wheat and barley production in rainfed marginal environments of the developing world
- **Christine Brown 2017 .,** Guide agronomique des grandes cultures Publication 811F, Publié par le ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales ,P196
- **Claire Koing ,2017.,**Article Le maïs, une céréale aux grains précieux., FUTURA PLANETE
- **C. Moule ; 1971.** Guide céréales ., La maison rustique- PARIS P1.
- **Clémentine Desfemmes.,2018.** Les mycorhizes : une association surprenante entre plantes et champignons. Gerbeaud.com.
- **Daei G, Ardekani MR, Rejali F, Teimuri S, Miransari M. 2009.** Alleviation of salinity stress on wheat yield, yield components, and nutrient uptake using arbuscularmycorrhizal fungi under field conditions. *Journal of Plant Physiology* 166: 617–625.
- **Dalpe. Y., 2005.** Les mycorhizes : un outil de protection des plantes mais pas une panacée. *Phytoprotect.*, 86 : 53-59.
- **Dalpe. Y., 2006.** Mycorhizes et bénéfiques marginaux programme santé de l'environnement et biodiversité d'agriculture et agroalimentaire. Canada. p 2.
- **Davet. P., 1995.** Vie microbienne dans le sol et production végétale collection mieux comprendre, I.N.R.A., Paris. 383 p.
- **Devineau. C., 2015.** Etude de la mycorhization du blé sur trois niveaux de diversité génétique : culture simple, mélange variétal et association blé/légumineuse. Rapport de stage a INRA France. 6 P.
- **Djermoun.A, 2009 ;** La production céréalière en Algérie : les principales caractéristiques Département d'Agronomie ,Université de Hassiba Benbouali de Chlef *Revue Nature et Technologie.* n° 01/Juin 2009. Pages 45 à 53
- **Dodd, A., Curtis, P.M., Williams, L.C., and Love, D.R ,2000.** Zebrafish: bridging the gap between development and disease
- **Duhoux E. et Nicole M., 2004.** Biologie végétale : association et interactions chez les plantes Ed. D.U.N.O.D. Paris. 166p.
- **Durrieux G., (1993).** Ecologie des champignons. Ed. Masson, Paris. 207p.

## Références bibliographiques

---

- **Duponnois R, Plenchette C, Thioulouse J et Cadet P. 1997.** The mycorrhizal soil infectivity and arbuscular mycorrhizal fungal spores communities in soils of different aged fallows in Senegal. *Applied Soil Ecology* 17:239-251.
- **ESSIANE ONDO. O. 2014.** La caractérisation d'une collection de variétés anciennes de blé pour leur réponse à la mycorhization et impact sur la qualité du grain. Thèse Pour obtenir le grade de Docteur en Science de la vie Spécialité Biologie végétale. Université de Bourgogne.
- **Estrada-Luna, A.A., F.T. Davies Jr., and J.N. Egilla. 2000.** Mycorrhizal fungi enhancement of growth and gas exchange of micropropagated guava plantlets (*Psidium guajava* L.) during ex vitro acclimatization and plant establishment. *Mycorrhiza* 10, 1-8. Doi: 10.1007/s005720050280
- **Ezzahiri B., M. Bouhache, M. Mihi, et I. Erraki. 2004.** Index phytosanitaire du Maroc. Edition 2004. Ed. AMPP, 257 pages.
- **Faucher et Perreault, 2013.** Bio fertilisant MYKE<sup>®</sup> PRO Faucher et Perreault, 2001 Fertilisation d'un champ de soya
- **Faucher, Y., et Perreault, Y. 2013.** Impact des mycorhizes sur la productivité du soya. Présentation à la Journée d'information régionale Grandes cultures, St-Hyacinthe 3 décembre 2013
- **Feliachi., 2002 :**Programme de développement de la céréaliculture en Algérie.Symposium blé 2000 : Enjeux et stratégies, pp 21-26
- **Fernández-Lizarazo and Moreno-Fonseca.(1992),** Mechanisms for tolerance to water-deficit stress in plants inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi. A review. *Agronomía Colombiana*34 (2):179  
<http://dx.doi.org/10.15446/agron.colomb.v34n2.55569>
- **Florent Cornut ; 2012.,** Article Pour mieux comprendre la sélection de l'orge de brasserie., Semencemag.fr
- **Fortin,2015.** Article la morphologie des céréales ,site : Agri-Réseau
- **Gagné S., et MCnicoll H., 2010.** les inoculants mycorhiziens : une nouvelle technologie au service de l'agriculture. Journée d'information scientifique sur les grandes cultures Québec. P22.
- **Gallou A, Mosquera HPL, Cranenbrouck S, Suárez JP, Declerck S. 2011.** Mycorrhiza induced resistance in potato plantlets challenged by *Phytophthora infestans*. *Physiological and Molecular Plant Pathology* 76: 20–26.

## Références bibliographiques

---

- **Garbaye J., 2013.** La symbiose mycorhizienne, une association entre les plantes et les champignons. Ed. Quae, Versailles, 251 p.
- **Gate Ph., Giban M., Blondlot A., Braun Ph., Couleaud G., Jouy L., Laurent F., Lutton A. et Vignier L., 2003** Stades du blé. Editions ITCF. 68 p
- **García Garrido. JM, Ocampo. JA., 2002.** Regulation of the plant defence response in arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Journal of experimental botany* 5: 1377–1386
- **Gavériaux J.P., 2012.** Les Glomeromycota – Mycorhizes VAM et Geosopon pyriformis (Kützing) Wettstein, *Bull. Soc. Mycol. Nord Fr.*, n°92, pp. 1-17
- **G. Colla , Youssef Rouphael, Mariateresa Cardarelli et Paola Crino, 2012.,** L’emploi de mycorhizes en cultures maraîchères: pour une meilleure résistance aux stress biotiques et abiotiques
- **Genre. A, Chabaud. M, Timmers. ACJ, Bonfante. P, Barker. DG., 2005.** Arbuscular Mycorrhizal Fungi Elicit a Novel Intracellular Apparatus in *Medicago truncatula* Root Epidermal Cells before Infection. *The Plant Cell* 17: 3489–3499.
- **GEIGY ,1985.** CORPORATION,, PETITIONER v . COMMISSIONER OF INTERNAL REVENUE
- **Gianinazzi-Pearson. V., 1992.** Influence of intergeneric grafts between host and non-host legumes on formation of vesicular–arbuscular mycorrhiza. *New phytologist.* Pp 505.508.
- **Girard M.C., Waller C., Remy J.C., Berdelin J., Morel J. L., 2005.** Sols et environnement. Ed. Dunod, Paris, 816p.
- **Goicoechea, N., S. Merino, and M. Sánchez-Díaz. 2005.** Arbuscular mycorrhizal fungi can contribute to maintain antioxidant and carbon metabolism in nodules of *Anthyllis cytisoides* L. subjected to drought. *J. Plant Physiol.* 162, 27-35. Doi: 10.1016/j. jplph.2004.03.011
- **Gollotte. A, Gianinazzi-Pearson. V, Giovannetti. M, Sbrana. C, Avio. L, Gianinazzi. S., 1993.** Cellular localization and cytochemical probing of resistance reactions to arbuscular mycorrhizal fungi in a ‘locus a’ mutant *Pisum sativum* L. *Planta* 191: 112–122.
- **Grand et Harvey, 1982.** Importance de la mycorhization sur le comportement et la nutrition des arbres forestiers. — Mémoire de 30 années de l’E.N .I .T.E .F . - Nogent-sur-Vernisson
- **HAMADACHE A., AIT ABDALLAH F., LADADA M., 1998 -** Synthèse des travaux

## Références bibliographiques

---

- de recherche réalisés par le fer mes expérimentales sur la protection des grandes cultures:  
1977-97. Bilan de la recherché sur les grandes cultures. ITGC, 13 pages.
- **Hamza. H., 2014.** Application des mycorhizes arbusculaires en culture maraîchère cas de la pastèque (*Citrullus lanatus*). Mémoire de Magister en Biologie ET PHYSIOLOGIE VÉGÉTALE Option : valorisation des ressources végétales. Université de Sétif. 13p.
- **Harrison. MJ, Dewbre. GR, Liu J., 2002.** A phosphate transporter from *Medicago truncatula* involved in the acquisition of phosphate released by arbuscular mycorrhizal fungi. *The Plant Cell* 14: 2413-2429.
- **Hause. B, Mrosk. C, Isayenkov. S, Strack. D., 2007.** Jasmonates in arbuscular mycorrhizal interactions. *Phytochemistry* 68: 101-110.
- **Heyland K.U., A. Werner, L.D. Bailey, and C.A. Grant. Non daté.** Barley (*Hordeum vulgare* L.). *World Fertilizer Manual*.  
[www.fertilizer.org/ifa/publicat/html/pubman/barley.htm](http://www.fertilizer.org/ifa/publicat/html/pubman/barley.htm)
- **Hibbett. D.S, Binder.M, Bischoff. J., 2007.** A higher-level phylogenetic classification of the fungi. *Mycol. Res.*, 111 : 509-547.
- **Javot H, Pumplin N, Harrison MJ, 2007.** Phosphate in the arbuscular mycorrhizal symbiosis: transport properties and regulatory roles. *Plant, Cell and Environment* 30: 310- 322.
- **J. André Fortin2015.** , Les mycorhizes : l'essor de la nouvelle révolution verte, MultiMondes,
- **Jean-Baptiste Loin ; 2013.** , Article Vos céréales pour cet hiver. RÉPONSE BIO.COM
- **Khalvati MA, Hu Y, Mozafar A, Schmidhalter U. 2005.** Quantification of water uptake by arbuscular mycorrhizal hyphae and its significance for leaf growth, water relations, and gas exchange of barley subjected to drought stress. *Plant biology* 7: 706–712.
- **Komala, N.T, T\*, Gurumurthy, R and Surendra.** Role of mycorrhization in cereals,
- **Kosuta. S., Chabaud. M., Lougnon. G., Gough. C., Denarie. J., Barker. D.G. and Becard. G., 2003.** A diffusible factor from arbuscular mycorrhizal fungi induces symbiosis-specific MtENOD11 expression in roots of *Medicago truncatula*. *Plant Physiol*, 131, 952-962.

## Références bibliographiques

---

- **Kuszala. C et Gianinazzi. S., 2010.** Méthode simple pour évaluer le potentiel endomycorhizogène d'un inoculum. INRA. F. 17-24p.
- **Lavaud. O., 2016.** Les mycorhizes ont une importance capitale dans nos cultures ! Disponible sur défi écologique.com.
- **Lavaud. O., 2018.** Les Mycorhizes, un réseau d'avantages (Compte-rendu à partir de notes). Pole maraichage. France. 3p.
- **LEPOIVRE P., 2003** - Phytopathologie. Edition De Boeck Université, Belgique, 427p.
- **Leake. JR, Johnson. D, Donnelly. DP, Muckle. GE, Boddy. L, Read. DJ., 2004.** Networks of power and influence: the role of mycorrhizal mycelium in controlling plant communities and agro ecosystem functioning. Canadian Journal of Botany 82: 1016-1045. DOI: 10.1139/b04-060.
- **Le Tacon. F,** INRA Nancy- La Recherche n° 166 mai 1985
- **Le tacon 1978** ,LA MYCORHIZATION CONTROLÉE ET SES POSSIBILITÉS D'APPLICATION Les progrès réalisés aux Etats-Unis
- **Lee YJ, George E, 2005.** Contribution of mycorrhizal hyphae to the uptake of metal cations by cucumber plants at two levels of phosphorus supply. Plant and Soil 278 : 361-370
- **Libramont 2014,** mémoire Sébastien Crémer ; Fourrages Mieux asbl
- **Logi. C, Sbrana.C, Giovannetti M., 1998.** Cellular events involved in survival of individual arbuscular mycorrhizal symbionts growing in the absence of the host. Applied and Environmental Microbiology 64: 3473-3479.
- **Lounes-Hadj Sahraoui,A2013** , thèse Protection du blé contre l'oïdium par des champignons mycorhiziens à arbuscules : mécanismes et optimisation
- **Lounes-Hadj Sahraoui,A2013** ,Article La Mycorhize à arbuscules : quels bénéfices pour l'homme et son environnement dans un contexte de développement durable ? Unite de Chimie Environnementale et Interactions sur le Vivant (UCEIV). Université du Littoral Côte d'Opale (ULCO). Université Lille Nord de France. 50, Rue Ferdinand J Buisson. F-62228 Calais, FRANCE. Rev. Sci. Technol., Synthèse 26: 06 -19 (2013)
- **MADR. 2006.** Données statistiques du Ministère de l'agriculture. Bureau des statistiques
- **Maldonado-Mendoza. I, Dewbre. GR, Harrison. MJ, 2001.** A phosphate transporter gene from the extra-radical mycelium of an arbuscular mycorrhizal fungus

## Références bibliographiques

---

Glomus intraradices is regulated in response to phosphate in the environment. *Molecular Plant-Microbe Interactions* 14: 1140-1148.

- **Malek Houda 2017** ., mémoire de master Contribution à l'étude de la mycoflore associée aux grains de blé et d'orge dans la wilaya de Bouira , FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE ET DES SCIENCES DE LA TERRE DEPARTEMENT DES SCIENCES AGRONOMIQUES P9-13
- **Margaret L. Ronsheim 2012**, The Effect of Mycorrhizae on Plant Growth and Reproduction Varies with Soil Phosphorus and Developmental Stage ; *The American Midland Naturalist* (édité par la "University of Notre Dame") 167(1) ; pages 28 à 39. Jan 2012 doi:<https://dx.doi.org/10.1674/0003-0031-167.1.28>
- **Marx ,1977**. Tree host range and world distribution of the ectomycorrhizal fungus *Pisolithus tinctorius*, *Canadian Journal of Microbiology* • 1 March
- **Maronek,D.M,Hendrix , J.W. et Cornelius,P.L 1982**. Slow-release fertilizers optimize mycorrhizal development in container-grown pine seedlings inoculated with
- **Masle J. et Meynard J.M., 1981**.L'élaboration du nombre d'épis chez le blé d'hiver. Influence de différentes caractéristiques de la structure du peuplement sur l'utilisation de l'azote et de la lumière, Thèse., Doctorat., INA, Paris, France, 274p
- **Masle et Meynard, 1980**.L'élaboration du nombre d'épis chez le blé d'hiver- Influence de différentes caractéristiques de la structure du peuplement sur l'utilisation de l'azote et de la lumière. Thèse de docteur-ingénieur. INA-PG, paris, p 274
- **Matieu Marguerie 2017** ., Fiche technique #4 culture de l'orge en bio
- **Mc Affee .B.J et J.A Fortin 1986**, competitive interactions of ectomycorrhizal mycobionts under field condition .*Can J.Bot* 64 :848-852
- **McGonicle, T.P., Miller, M.H., 1999**. Winter survival of extraradical hyphae and spores of arbuscular mycorrhizal fungi in the field. *Applied Soil Ecology*, 12: 41-50.
- **Meddich. A, & Oihabi. A., 1996**. Effet des mycorhizes à arbuscules (MA) sur la croissance et la composition minérale du trèfle. Marrakech .Maroc.
- **Michèle Mosiniak, Roger Prat et Jean-Claude Roland, 2006**. Article DU BLE AU PAIN , Site :Bmedia
- **Mohammedi. S., 2018**. Biodiversité et aptitude des champignons mycorrhiziens arbusculaires isolés des palmeraies de Ouargla à mycorrhizer le blé et l'orge. Mémoire master académique. Université d'Ouargla. Pp 5-38.

## Références bibliographiques

---

- **Mustapha. G., 2015.** Protection du blé contre l'oïdium par des champignons mycorrhiziens à arbuscules: mécanismes et optimisation. Thèse Pour obtenir le grade de docteur de l'université du littoral cote d'opale. Pp 25-48.
- **Mustafa. G, Khong. N.G , Tisserant. B, Randoux. B, Fontaine. F, Magnin-Robert. M, Reignault. Ph, A. Lounès-Hadj Sahraoui., 2015.** Arbuscular mycorrhizal inoculation induced wheat to powdery mildew (*Blumeria graminis* f. sp. tritici). 78p.
- **Nagahashi. G, Douds. DD, 1997.** Appressorium formation by AM fungi on isolated cell walls of carrot roots. *New Phytologist* 136: 299-304.
- **Nair. A, Kolet. SP, Thulasiram. HV, Bhargava. S., 2015.** Systemic jasmonic acid modulation in mycorrhizal tomato plants and its role in induced resistance against *Alternaria alternata*. *Plant Biology* 17: 625–631. • Nakagami H, Pitzschke A, Hirt H. 2005. Emerging MAP kinase pathways in plant stress signalling. *Trends in Plant Science* 10: 339–346.
- **NASRAOUI B., 2006.** Les champignons parasites des plantes cultivées (Biologie, Systématique, Pathologie, Maladies), [Parasitic fungi of cultivated plants: Biology, Systematic, Pathology, Diseases] (with an English version on CD). Centre de Publication Universitaire, 456 p, Tunisie
- **NdoyeF. , A. G. Diedhiou, M Gueye , D Fall, A Barnaud, M. O. Sy, K.Noba , D.Diouf, A. Kane. 2016.**Réponse du fonio Blanc (*Digitariaexilis*Stapf) à l'inoculation avec des champignons mycorrhiziens à arbuscules en conditions semi-contrôlées. *Journal of Applied Biosciences* 103:9784 – 9799
- **Nedjraoui Dalila et Bédrani Slimane 2008.** La désertification dans les steppes algériennes : causes, impacts et actions de lutte. *Revue Vertigo* volume 8, numéro 1
- **Newman. EI and Reddell. P., 1987.** The distribution of mycorrhiz as among families of vascular plants. *New Phytologist* 106: 745-751. DOI: <http://www.jstor.org/stable/4139076>**Ngonkeu et Nwaga, 1998 ; Onguene, 2000 ;** Ngonkeu, Chapitre I : Synthèse bibliographique 14 2003
- **ONFAA ,2015.** Article Publication de la première édition du référentiel technico-économique des exploitations céréalières , site ALGERIEECO
- **Ouattar S. et T.E. Ameziane. 1989.** Les céréales au Maroc: de la recherche à l'amélioration des techniques de production. Les éditions Toubkal, 123 pages.

## Références bibliographiques

---

- **Ouldkaci. L et Sai. L., 2016.** L'effet de l'inoculum mycorhiziens sur 2 variétés de blé dur (Bousselam, Siméto) conduit en stress salin. Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de Master en Agronomie Spécialité : Production Végétal et Agriculture Durable. Université de Tizi-Ouzou. Pp 14-15.
- **Öpik M, Zobel M, Cantero JJ, Davison J, Facelli JM, Hiiesalu I, Jairus T, Kalwij JM, Koorem K, Leal ME, et al. 2013.** Global sampling of plant roots expands the described molecular diversity of arbuscular mycorrhizal fungi. *Mycorrhiza* 23: 411–430.
- **Peyret-Guzzon. M., 2014.** Etudes moléculaires de la diversité des communautés et populations de champignons mycorhiziens à arbuscules (Glomeromycota). These Pour obtenir le grade de Docteur de l'Université de Bourgogne. France. 28p.
- **Pieterse CMJ, Van der Does D, Zamioudis C, Leon-Reyes A, Van Wees SCM. 2012.** Hormonal modulation of plant immunity. *Annu. Rev. Cell Dev. Biol* 28: 489–521.
- **Plenchette, C., Fortin, J.A., Furlan, V. 1983.** Growth responses of several plant species to mycorrhizae in a soil of moderate P fertility. I. Mycorrhizal dependency under field conditions. *Plant and Soil* 70: 199-209
- **Poulsen. KH, Nagy. R, Gao LL, Smith. SE, Bucher. M, Smith. FA, Jakobsen I, 2005.** Physiological and molecular evidence for Pi uptake via the symbiotic pathway in a reduced mycorrhizal colonization mutant in tomato associated with a compatible fungus. *New Phytologist* 168: 445-453.
- **Prats, 1966** , les céréales. ED. Bailliere.332p
- **Redecker. D and Raab. P., 2006.** Phylogeny of the Glomeromycota (arbuscular mycorrhizal fungi): recent developments and new gene markers. *Mycologia* 98: 885-895.
- **Redon. Paul-Olivier.,2009.** Rôle de champignons mycorhiziens à arbuscules dans le transfert du cadmium (Cd) du sol à la luzerne (*Medicago truncatula*). Thèse présentée pour l'obtention du titre de Docteur de l'Université Henri Poincaré, Nancy I en Sciences du Sol. Cedex, France. Pp 31-34.
- **Requena. N., 2005.** Measuring quality of service: phosphate “à la carte” by arbuscular mycorrhizal fungi. *New Phytologist* 168: 268-271.
- **Requena. N, Serrano. E, Ocón. A, Breuninger. M., 2007.** Plant signals and fungal perception during arbuscular mycorrhiza establishment. *Phytochemistry* 68: 33-40.

## Références bibliographiques

---

- **Rivaton. D., 2016**, Garbaye., 2013 ; Gavériaux., 2012 ; Stevenin., 2011 ; Akiyama et al., 2007. Etude des champignons mycorhiziens arbusculaires des sols en systèmes de grandes cultures biologiques sans élevage. Application à la nutrition phosphatée. Mémoire de Fin d'Études d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage. à Rennes.3 p.
- **Salmi Manel, Haddad Leila, Oulmi Abdelmalek, Benmahammed Amar, Benbelkacem Abdelkader ,2015** . Variabilité phénotypique et sélection des caractères agronomiques du blé dur (*Triticum durum* Desf.) Sous conditions semi-arides
- 
- **Sawers. R., Gutjahr. C. and Paszkowski. U., 2008**. Cereal mycorrhiza: an ancient symbiosis in modern agriculture. *Trends Plant Sci*, 13, 93-97.
- **Scervino. JM, Ponce. MA, Erra-Bassells. R, Vierheilig. H, Ocampo. JA, Godeas. A., 2005**. Flavonoids exhibit fungal species and genus specific effects on the presymbiotic growth *Gigaspora* and *Glomus*. *Mycological Research* 109: 789-794.
- **Schüßler, A., & Walker, C. (2011)**. Evolution of the 'Plant-Symbiotic' Fungal Phylum, Glomeromycota. In S. Pöggeler, & J. Wöstemeyer (Eds.), *Evolution of Fungi and Fungal-Like Organisms* (1st ed., Vol. 14, pp. 164-185). (The Mycota: A Comprehensive Treatise on Fungi as Experimental Systems for Basic and Applied Research). Springer.
- **Schwarzott. D, Walker. C, Shubler. A., 2001**. *Glomus*, the largest genus of the arbuscular mycorrhizal fungi (Glomales) is non-monophyletic. *Mol. Phylogen. Evol.* 21: 190-197.
- **Shetty K.G., Hertick B., Figg D., et Schwab A.P., 1994**. Effects of mycorrhizae and other soil microbes on revegetation of heavy metal contaminated mine spoil *Environmental Pollution* 86.pp 181-188.
- **Si Bennasseur Alaoui2004.**, Référentiel pour la Conduite Technique de la Culture d'orge (*Hordeum vulgare*)
- **Simon.H,Coddacioni.P et Lecoeur.X, 1989** : Produire les céréales à paille, agriculture d'aujourd'hui scientifique et technique d'application. Ed Technique et document Lavoisier Paris pp89-101
- **Slezack S, Dumas–Gaudot E, Paynot M, Gianinazzi S. 2000**. Is a fully established arbuscular mycorrhizal symbiosis required for bioprotection of *Pisumsativum* roots against. *Aphanomyces euteiches*? *Molecular Plant- MicrobeInteraction*, 13: 238–241.
- **Soltner et Prats et al 1990**, Article blé du pain ; bmedia

## Références bibliographiques

---

- **Soltner .D, 2005** : Les grandes productions végétales céréalières, plantes sarclées-prairies. 20<sup>ème</sup>Ed, collection sciences techniques agricoles.464p
- **Stevenin. A., 2011.** Symbiose mycorhizienne : développement de nouvelles méthodes pour la synthèse de glycoconjugués bioactifs. Thèse, Université Paris Sud - Paris XI, 329 p.
- **Stover HJ, Thorn RG, Bowles JM, Bernards MA, Jacobs CR. 2012.** Arbuscular mycorrhizal fungi and vascular plant species abundance and community structure in tallgrass prairies with varying agricultural disturbance histories. *Applied Soil Ecology* 60: 61–70
- **Strullu. D.G., 1991.** les mycorhizes des arbres et plantes cultivées. Techniques et documentation, Lavoisier, Paris. 250p.
- **Taibi et Hadj Ali Dihia . 2013 .**Contribution à l'étude des capacités symbiotiques racinaires de deux variétés d'orge *Hordeum vulgare* et quatre variétés de blé dur *Triticum durum* conduites en zone semi-aride des hautes plaines de l'Ouest d'Algérie Aspect quantitatif
- **Tiby Gilbert Guissou,2001** ; thèse de doctorat La symbiose' mycorhizienne à arbuscules chez des espèces ligneuses: diversité des -Glomales, dépendance. mycorhizienne-, utilisation des .phosphatesnaturels et tolérance a un stress hydrique UNIVERSITE DE OUAGADOUGOU
- **TOMMERUP IC (1984),** Persistence of infectivity by germinated spores of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi in soil. *Trans Br Mycol Soc* 82:275–282
- **Troeh, Z.I., et Loynachan, T.E. 2003.** Endomycorrhizal fungal survival in continuous corn, soybean, and fallow. *Agron. J.* 95: 224-230
- **Trouvelot. A, Kough J, Gianinazzi-Pearson V 1982.** Mesure du taux de mycorhization VA d'un système racinaire.Recherche de méthodes d'estimation ayant une signification fonctionnelle. In:physiologyand genetics aspects of mycorrhizae. GianinazziPearson V et Gianinazzi S (Eds), 1st ESM,INRA Press, Paris, 217-221 p.
- **Uehlein.N, Fileschi. K, Eckert. M, Bienert. GP, Bertl. A, Kaldenhoff. R., 2007.** Arbuscular mycorrhizal symbiosis and plant aquaporin expression. *Phytochemistry* 68: 122-129.
- **Vidhyasekaran,2004 . livre** Concise Encyclopedia of Plant Pathology (Food Products) , Publisher : CRC Press (January 1, 1843) ,ASIN : B01FGO3HJK

## Références bibliographiques

---

- **Voets. L, de la Providencia. IE, Declerck. S., 2006.** Glomeraceae and Gigasporaceae differ in their ability to form hyphal networks. *New Phytologist* 172: 185-188. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2006.01873.x
- **Wang X, Li X. 2013.** An overview of the updated classification system and species diversity of arbuscular mycorrhizal fungi. *Acta Ecologica Sinica* Volume 33: 834–843
- **Wassila Nadji1 , Nadir Belbekri1 , Nadia Ykhlef1 & Abdelhamid Djekoun;2017.** Diversity of Arbuscular Mycorrhizal Fungi of Durum Wheat (*Triticum durum* Desf.) Fields of the East of Algeria , *Journal of Agricultural Science*; Vol. 9, No. 3; Published by Canadian Center of Science and Education
- **Zhu. Y, Miller. RM., 2003.** Carbon cycling by arbuscular mycorrhizal fungi in soil-plant systems. National Center for Biotechnology Information's.USA.
- **Zhu X, Qi L, Liu X, Cai S, Xu H, Huang R, Li J, Wei X, Zhang Z. 2016.** The wheat ethylene response factor transcription FACTOR PATHOGEN-INDUCED ERF1 mediates host responses to both the necrotrophic pathogen *rhizoctonia cerealis* and freezing stresses. *Plant Physiology* 164: 1499–1514.
- **Zhu X, Cao Q, Sun L, Yang X, Yang W and Zhang H (2018) .** Stomatal Conductance and Morphology of Arbuscular Mycorrhizal Wheat Plants Response to Elevated CO<sub>2</sub> and NaCl Stress. *Front. Plant Sci.* 9:1363. doi: 10.3389/fpls.2018.013
- **Zoubida Benmakhlouf 2018.** thèse de doctorat Etude de l'effet des phytohormones sur la croissance du blé dur (*Triticum durum* Desf.) var.kebir cultivée dans des conditions salines., Université des Frères Mentouri Constantine1, P18
- **Zubek et Janusz Błaszowski ,2008.** Medicinal plants as hosts of arbuscular mycorrhizal fungi and dark septate endophytes, Article number: 571, site : Springer Link

### Site INTERNET

1. Image arbuscule vésicules
2. [https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fbsvguyane.files.wordpress.com%2F2017%2F03%2F17-mycorhizes.pdf&psig=AOvVaw2bdNE\\_Y6arm\\_jzqUcRSoro&ust=1605522946631000&source=images&cd=vfe&ved=0CAIQjRxqFwoTCNj1yZqthO0CFQAAAAAdAA AAABAF](https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fbsvguyane.files.wordpress.com%2F2017%2F03%2F17-mycorhizes.pdf&psig=AOvVaw2bdNE_Y6arm_jzqUcRSoro&ust=1605522946631000&source=images&cd=vfe&ved=0CAIQjRxqFwoTCNj1yZqthO0CFQAAAAAdAA AAABAF)
3. <https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.alamyimages.fr%2Fcomparer-les-systemes-racinaires-des-arbres-de-citron-a-droite-cultive-avec-mycorhize-et-a-gauche-cultives-sans-image278199421.html&psig=AOvVaw0qI-JrGDjXYSZa4odhuJKA&ust=1605522637141000&source=images&cd=vfe&ved=0CAIQjRxqFwoTCPD2hYmshO0CFQAAAAAdAAAAABAI>
4. Passion céréales.fr, 2013
5. Agrico'Notes 2014
6. [https://www.doc-developpement-durable.org/file/Culture-plantes-alimentaires/FICHES\\_PLANTES/ble-cereales/ble-dur/referentiel-pour-la-conduite-technique-de-la-culture-du-ble-dur\\_grandes-cultures.pdf](https://www.doc-developpement-durable.org/file/Culture-plantes-alimentaires/FICHES_PLANTES/ble-cereales/ble-dur/referentiel-pour-la-conduite-technique-de-la-culture-du-ble-dur_grandes-cultures.pdf)
7. www.agridea.ch - février 2007
8. <http://www.agri-mag.com>