



*République Algérienne Démocratique et Populaire*  
*Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique*  
**Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou**

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

**Département de Science Agronomique**

**Mémoire**

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MASTER**

**Filière : Agronomie**

**OPTION : Production végétale**

**Thème**

**Etude Bibliographique de l'impact de la  
Mycorhization de Blé Dur (*Triticum durum* Desf.) en  
Agriculture de Conservation**

**Réalisé par :**

**BOUKHELIFA Soumaya**

**MAHMOUDIA Kenza**

**Devant le jury**

<b>Présidente</b>	<b>M<sup>me</sup> OMARI O.</b>	<b>M.A.A</b>	<b>UMMTO</b>
<b>Encadreur</b>	<b>M<sup>me</sup> Nait Kaci M</b>	<b>M.C.A</b>	<b>UMMTO</b>
<b>Co-Encadreur</b>	<b>M<sup>me</sup> MADI N</b>	<b>Doctorante</b>	<b>UMMTO</b>
<b>Examinatrice</b>	<b>M<sup>me</sup> KOURABA</b>	<b>M.A.A</b>	<b>UMMTO</b>

*L'année universitaire : 2019/2020*

## *Remerciements*

*Nous désirons exprimer nos sincères remerciements pour notre*

*Promotrice M<sup>me</sup> NAIT KACI. M pour son encadrement, son suivi, sa*

*Disponibilité et ses conseils qui ont contribué à l'élaboration de ce travail.*

*Nous remercions également notre Co-promotrice M<sup>me</sup> MADI. N pour son aide et*

*ses conseils durant toute la période du confinement.*

*Un grand merci chaleureux pour tous nos collègues. Nous avons*

*Partagé ensemble nos doutes et nos craintes, nous n'oublierons jamais tous les*

*moments que l'on a partagés ensemble.*

*Nos vifs remerciements à M<sup>me</sup> OMARI. O d'avoir accepté de*

*Présider le jury de notre modeste projet de fin de cycle.*

*On tient à remercier M<sup>me</sup> KOURABA d'avoir accepté D'examiner notre travail*

*Nous remercions pour tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la*

*réalisation de cette étude.*

## *Dédicaces*

*A la mémoire de mon père*

*A Ma mère zohra que Dieu lui prête une longue vie*

*A mes sœurs et mes frères, Et à toute ma famille*

*A mes amies, Marwa, Selma, Chahinaz, Amal, Thiziri,*

*Linda, Lilia.*

*A mon binôme Kenza.*

*A tous ceux qui m'ont aidé durant ma vie universitaire.*

*Ainsi qu'à tous mes amis et camarades de promotion.*

*Soumaya*

## *Dédicaces*

*A mon grand-père que dieu lui prête une longue vie*

*A ma mère Djamila*

*A mes frères : Ghiles et Gaya, Et à toute ma famille*

*A mon binôme Soumaya*

*A tous mes enseignants du Primaire à l'Université*

*A tous mes amis et collègues sans exception*

*A tous ceux qui m'ont aidé durant ma vie universitaire*

*Kenza*

## **Résumé**

En Algérie le blé (*Triticum durum*) occupe une place importante en région semi-aride, où le stress hydrique et la détérioration de la qualité des sols constituent les contraintes agronomiques les plus importantes pour la production céréalière. Dans ce contexte, l'objectif de cette recherche bibliographique est d'étudier l'impact des techniques d'agriculture de conservation sur les propriétés chimiques physiques et biologiques des sols.

Plusieurs recherches montrent que le semis direct améliore la diversité biologique des sols, dont la symbiose mycorhizienne, indispensable pour la nutrition phosphatée et hydrominérale du blé, tout en participant activement à améliorer la stabilité structurale des sols.

**Mots clés :** *Triticum durum*, mycorhizes, semis direct, semi-aride, phosphore.

## **Abstract**

In Algeria, wheat (*Triticum durum*) occupies an important place in semi-arid region, where water stress and deterioration of soil quality constitute the most important agronomic constraints for cereal production. In this context, the objective of this literature search is to study the impact of conservation agriculture techniques on the physical and biological chemical properties of soils.

Several studies show that direct seeding improves soil biological diversity, including mycorrhizal symbiosis, essential for the phosphate and hydromineral nutrition of wheat, while actively participating in improving the structural stability of soils.

**Key words:** *Triticum durum*, mycorrhizae, direct seeding, semi-arid, phosphorus.

## **ملخص**

في الجزائر، يحتل القمح (القمح الصلب) مكانة مهمة في المناطق الشبه جافة، حيث يشكل الإجهاد المائي وتدهور جودة التربة أهم المعوقات الزراعية لإنتاج الحبوب. وفي هذا السياق، فإن الهدف من هذا البحث هو دراسة تأثير تقنيات الزراعة المحافظة على الخصائص الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية للتربة.

تظهر العديد من الدراسات أن الزرع المباشر يحسن التنوع البيولوجي للتربة، بما في ذلك التعايش الفطري، وهو أمر ضروري للتغذية الفوسفاتية والمائية للقمح، مع المشاركة في تحسين الاستقرار الهيكلي للتربة.

**الكلمات المفتاحية:** القمح الصلب، الفطريات، الزرع المباشر، الشبه جاف، الفوسفور.

## LISTE DES ABREVIATIONS

*μm* Micromètre

*AC* Agriculture de Conservation

*ATP* Adénosine Triphosphate

*C °* degré Celsius

*CIC* Conseil International des Céréales

*CM* Centimètre

*CO* Carbone Organique

*CO<sub>2</sub>* Dioxyde de carbone

*Cu* Cuivre

*ECM* Ectomycorhizes

*FAO* Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture

*Fe* Fer

*H°* Humidité

*Ha* Hectare

*K* Potassium

*M* Mètre

*MA / CMA* champignons endomycorhizes à arbuscules

*Mm* Millimètre

*Mn* Manganèse

*MOS* Matière Organique du sol

*N* Azote

***P*** Phosphore

***PH*** Potentiel hydrogène

***PPA*** Appareil Pré-pénétration

***Rh*** Réseau De Hartig

***SAU*** surface agricole utile

***SD*** Semis direct

***T°*** Température

***TM*** Million de Tonnes

***USDA*** Département de l'Agriculture des États-Unis

***Zn*** Zinc

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 01</b> : Les principes fondamentales de l'agriculture de conservation .....	05
<b>Figure02</b> : Production du blé dans le monde pour la campagne de (2017/2018), selon rapport USDA de Septembre .....	11
<b>Figure 03</b> : Exportation et importation de blé dans le monde pour la période 2017/2018 (MT) selon le rapport USDA de September .....	11
<b>Figure 04</b> : Carte schématique représentant les zones céréalières de l'Algérie .....	13
<b>Figure 5</b> : Zone de culture des céréales dans le nord de l'Algérie .....	14
<b>Figure06</b> : L'appareil végétatif de blé dur .....	15
<b>Figure 07</b> : L'appareil reproducteur de blé dur .....	16
<b>Figure 08</b> : Coupe longitudinale présentant les constituants du grain de blé dur.....	17
<b>Figure 09</b> : Cycle de développement de blé .....	20
<b>Figure 10</b> : Principaux types mycorhiziens représentés sur une coupe transversale de racine	32
<b>Figure 11</b> : Photographie représentant une ectomycorhize formant son manteau fongique au tour de la racine d'une plante ligneuse .....	33
<b>Figure 12</b> : Schéma représentatif de la morphologie racinaire d'une racine endomycorhizée, le champignon est un champignon endomycorhizien à vésicule et à arbuscule .....	35
<b>Figure 13</b> : Différentes formes des ectendomycorhizes .....	36
<b>Figure 14</b> : les principales réponses observées chez la plante et le champignon durant la Phase présymbiotique dans l'interaction mycorhiziennes à arbuscules.....	38
<b>Figure 15</b> : Cycle de développement des champignons MA.....	40
<b>Figure 16</b> : Schéma récapitulant les principaux processus d'échanges de nutriments dans l'ensemble des symbioses mycorhiziennes .....	42
<b>Figure 17</b> : Le volume de sol influencé par les racines et les microorganismes associés et du volume de sol qui environne une racine colonisée par un champignon mycorhizien à arbuscules.....	43
<b>Figure 18</b> : Schéma récapitulant les mécanismes impliqués dans l'échange des principaux nutriments entre le CMA et sa plante hôte .....	45
<b>Figure 19</b> : Racine de blé colonisée avec hyphes colorés en bleu.....	48



# ***Sommaire***

## ***Table Des Matières***

**Remerciement**

**Dédicaces**

**Résumé**

**Abstract**

**Liste des abréviations**

**Liste des figures**

**Introduction Générale..... 03**

### ***Partie 1 : Synthèse Bibliographique***

#### ***CHAPITRE I : Agriculture De Conservation***

1. Présentation de l'agriculture conservation .....	05
1.1 Définition de L'agriculture de Conservation.....	05
1.2. Principe de Agriculture de conservation .....	05
1.2.1. Semis direct .....	06
1.2.1.1. Semis direct dans la région semis aride .....	07
1.2.1.2. Semis direct des céréales et la gestion des adventices .....	07
1.2.1.3. Impact de semis direct sur les propriétés chimique du sol rhizosphérique des céréales .....	08
1.2.2 Rotation culturale .....	09
1.2.2.1. Les avantage de la rotation cultural .....	09
1.2.2.2. La rotation céréale /légumineuses .....	09

#### ***CHAPITRE II : Culture du blé dur***

1. Présentation de la céréaliculture.....	10
1.1. Production céréalière dans le monde.....	10
1.1. Production céréalière En Algérie .....	12
1.2.1 La répartition spatiale de la céréaliculture .....	13
2. Aspect botanique de plante de blé dur.....	14
2.1. Classification botanique du blé dur .....	14
3. caractère morphologique de blé .....	15
3.1 L'appareil végétatif.....	15
3.2 L'appareil reproducteur .....	16

3.3 Le grain .....	16
4. Cycle Végétatif Et Levée .....	17
4.1. Période végétative .....	17
4.2. Période reproductrice .....	18
4.3. Période De Formation Et Maturation Des Grains .....	19
5. Exigences De Blé dur .....	20
5.1. Exigences édaphiques .....	20
5.2. Exigences climatiques .....	21
5.2.1 Température .....	21
5.2.2 Eau.....	21
5.2.3 Lumière .....	21
5.2.4 Fertilisation .....	22

### ***CHAPITRE III : La mycorhization Du blé***

1. Définition d'une symbiose mycorhizienne et concept .....	23
2. Historiques .....	23
3 Les Différents Types De Mycorhizes .....	24
3.1 Les Ectomycorhize .....	25
3.2 Les Endomycorhizes .....	26
3.3 Les Ectendomycorhizes.....	27
4. La Mycorhization Des Céréales .....	28
4.1 Etapes de développement des champignons à arbuscules.....	29
4.2 Les Facteurs influençant la mycorhization.....	32
4.3. Avantage d'une symbiose mycorhizienne à arbuscules .....	33
4.3.1 Bénéfices pour la plante .....	34
5. Exploitation des CMA dans les cultures de blé.....	39
5.1. Mycorhization de blé sur l'effet de semis direct .....	40
<b>Conclusion</b> .....	41

### **Références bibliographiques**





*Synthèse*

*Bibliographique*



# ***Introduction***

Les céréales occupent à l'échelle mondiale une place primordiale dans le système agricole. Les céréales sont considérées comme une principale source de la nutrition humaine et animale (Slama et *al.*, 2005).

En Algérie, la filière céréalière constitue une des principales filières de la production agricole, car elle occupe une place stratégique dans le système alimentaire et dans l'économie nationale (Djermoun, 2009). Le blé dur représente la spéculation alimentaire la plus importante pour une large part de la population algérienne (Malld, Redjel, 2000).

L'insertion des légumineuses fourragères et alimentaires dans les systèmes céréaliers est l'un des défis majeurs de l'agriculture, dans les régions humides, subhumides et semi-arides, caractérisées par une grande diversité de légumineuses spontanées et cultivées (FAO, 2006).

Malgré l'importance de la céréaliculture dans les régions semi arides, qui couvre environ 60% des terres cultivées, la production nationale reste faible à cause d'une multitude de facteurs d'ordre scientifiques (variétés non adaptées à la sécheresse), organisationnels (gestion aléatoire et changement continu du statut des terres agricoles) et techniques (non maîtrise des techniques de production) (Hazmoune, 2000). Pour cela l'agriculture de conservation constitue une stratégie prometteuse à améliorer la production céréalière tout en préservant le potentiel agronomique des sols. Cette agriculture se base essentiellement sur trois piliers: (i) le semis direct, (ii) les résidus des cultures et notamment la paille, (iii) les rotations des cultures (Aboudrare, 2009 ; Mrabet, 2001). Le semis direct est une simplification du travail du sol. Il consiste à implanter une culture sans labour préalable, cette démarche assure ainsi à la graine les conditions les plus favorables à la germination, à la levée, à la croissance et à l'obtention de bons rendements (Mrabet, 2001). Ce qui résulte de la favorisation du développement des organismes du sol, car la perturbation physique, l'abrasion du sol et la diminution du mulch à la surface du sol limitent le développement de ces populations (Kladivko, 2001). Parmi ces dernières, on retrouve les champignons mycorhiziens qui vivent en association symbiotique avec les racines des plantes et qui jouent un rôle prépondérant dans le fonctionnement des écosystèmes végétaux (Fortin et *al.*, 2008). En assurant l'amélioration de la nutrition minérale des plantes notamment en 'azote et en phosphore et et reçoivent en retour des composés contenant du carbone nécessaire à leur croissance (Denison et Kiers, 2011).

## Introduction générale

---

Dans ce contexte, l'objectif de ce travail est de réaliser une bibliographie hétéroclite visant l'apport des techniques de semis direct et la rotation sur la culture du blé et sur son environnement phasique et biologique.

Dans cet objectif, cette bibliographie, nous l'avons menée comme suit :

- Un premier chapitre de la partie bibliographique regroupant l'agriculture de conservation dans la région semi-aride.
- Un deuxième chapitre réservé à la culture du blé.
- On conclut ce travail par l'étude de la mycorhization du blé.



***CHAPITRE I : Agriculture  
de Conservation***

## 1. Présentation de l'agriculture conservation

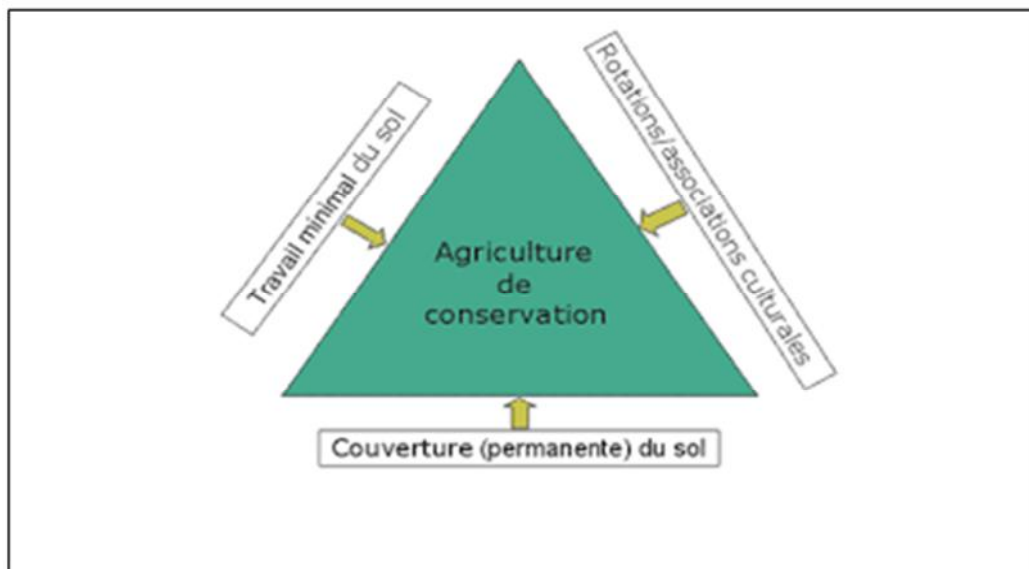
### 1.1 Définition de l'Agriculture de conservation

L'agriculture de conservation (AC) est une agriculture qui vise une meilleure utilisation des ressources agricoles par la gestion intégrée des disponibilités en sol, en eau et en ressources biologiques, combinée avec une limitation des intrants externes. Elle contribue à la conservation de l'environnement et à une production agricole durable en maintenant une couverture organique, permanente ou semi-permanente, du sol (Zaghouane, 2009).

### 1.2. Principes de l'agriculture de conservation

L'agriculture de conservation est une méthode de gestion des agro-écosystèmes, dont l'objectif est l'amélioration soutenue de la productivité, tout en préservant et en améliorant les ressources et l'environnement et elle se caractérise par trois principes reliés (fig.1), à savoir :

- A. Un travail minimal du sol (allant jusqu'à son absence totale, cas du semis direct).
- B. Une couverture (permanente) du sol par un mulch végétal vivant ou mort (paille).
- C. Une diversification systématique des espèces cultivées, en association culturale et/ou rotation, notamment en cultures annuelles et pérennes (FAO, 2015).



**Figure 01** : Les principes fondamentales de l'agriculture de conservation (FAO, 2015).

**1.2.1. Semis direct**

Le semis direct est l'une des techniques de l'agriculture de conservation et son application dans les systèmes de production présente divers avantages et inconvénients. Selon (CHABANE, 2014) l'agriculture de conservation présente les avantages suivants :

➤ **Sur le plan agronomique**

- Enrichissement et concentration des matières organiques des sols en surface.
- Moins d'utilisation d'engrais.
- Amélioration de la structure du sol et de la stabilité structurale.
- Augmentation de l'infiltration de l'eau.

➤ **Sur le plan environnemental**

- Erosion éolienne et hydrique proche de zéro.
- Accroissement de la biodiversité et de l'activité biologique (développement des vers de terre, concentration de la microfaune en surface ; les saprophytes par exemple).
- Contribution à la réduction de l'effet de serre par la diminution de la dépense énergétique, le stockage du carbone dans le sol (séquestration).
- Amélioration de la protection et de la qualité des eaux de surface.
- Moins de sédimentation dans les routes.

➤ **Sur le plan socio-économique**

- A la ferme, la survie de la famille est assurée grâce à une bonne rentabilité et une production élevée et durable.
- Le niveau et la qualité de vie de la famille fermière sont satisfaisants.
- Gain du temps et de carburant.
- Réduction des coûts pour le gouvernement et pour la société en raison d'effets de l'érosion des sols.

Selon (Menasria H, 2012) le semis direct présente les inconvénients suivants :

- Une difficulté de gérer les adventices, qui justifie souvent l'usage d'un désherbant total (glyphosate), avec le risque de provoquer à long terme des résistances à ce produit chez certains adventices.
- La suppression du travail du sol exige une gestion spécifique de la rotation.
- Les températures plus fraîches et la plus grande humidité du sol qui vont de paire avec le labour de conservation peuvent augmenter l'incidence de maladies causées par des champignons du sol.

-La vitesse de minéralisation du sol est ralentie par rapport à des situations avec labour, la fertilisation azotée peut donc être augmentée.

### **1.2.1.1. Semis direct dans la région semis aride**

Les hautes plaines orientales du semi aride ont été depuis longtemps un terroir propice à la culture traditionnelle des céréales, mais la mécanisation des techniques culturales incita l'agriculture de ces régions à s'orienter vers des techniques agricoles intensives, qui semblent atteindre leurs limites, face aux phénomènes d'érosions hydrique et éolienne, la destruction de la matière organique, la dégradation de la structure des sols et la stagnation voire la baisse des rendements (Bouzerzour, 2006).

L'agriculture de conservation constitue une stratégie prometteuse à préservé ces sols agricoles, mais les travaux de recherche et de développement sur l'agriculture de conservation et plus particulièrement sur le semis direct sont très limités dans ces zones céréalières, comparativement au Maroc et à la Tunisie où ce système a été testé depuis plusieurs années et où les superficies réservées à ce système ne cessent de s'accroître (Zaghouane, 2006).

### **1.2.1.2. Semis direct des céréales et la gestion des adventices**

Selon Cure (1991), la gestion des adventices est l'une des contraintes du développement de la technique du semis direct. En effet, la simplification du travail du sol favorise l'évolution du parasitisme, en raison, d'une part, de la présence des résidus laissés en surface et d'autre part de la non perturbation du milieu caractéristique du semis direct. Il se produit une évolution de la flore adventice en système de non labour, avec l'apparition d'espèces vivaces. Il a été démontré à travers des expérimentations que l'infestation par les adventices peut diminuer notablement le rendement des blés de 50 à 60% (Hamadache et Abdellaoui, 1999). Ainsi au cours d'un semis direct sur des chaumes de la culture précédente, l'élimination des adventices, avec un herbicide de contact, non résiduel, s'effectue quelques jours avant de semer (en pré-semis). Si les traitements sont effectués très proches de la date du semis sur des champs ayant une grande quantité de résidus végétaux, ceci peut causer de graves dégâts sur la culture au moment de la levée (Aiber J, 2006).

**1.2.1.3. Impact de semis direct sur les propriétés chimique du sol rhizosphérique des céréales****➤ Effet et teneures en matière organique**

La matière organique est un composant important dans le sol, leur présence permet l'apparition des meilleures propriétés physico-chimiques pour le développement des végétaux. Le semis direct permet de conserver les niveaux élevés de matière organique qui sont fondamentaux pour conserver la capacité potentielle de ces sols (Xanxo *et al*, 2006).

D'après des études comparatives des techniques de travail du sol montrent que les meilleurs teneurs en matière organique dans le sol sont mesurés sur le non labouré (Abdllaoui *et al*, 2010).

Selon Daniel et Galardon (2008) et Mrabet (2001), le non travail ou la faible perturbation du sol et la présence des résidus en surface, créent des conditions favorables au développement de la biodiversité dans ce dernier, celle-ci participe aussi au recyclage de la matière organique.

**➤ Effet sur les teneurs et stocks en Carbone et en Azote**

Les concentrations en C et en N organique dans les systèmes de conservation sont en général supérieures dans les 10 premiers centimètres du sol par rapport à un sol labouré et décroissent fortement dans les horizons sous-jacents (Al-Kaisi et Yin, 2005 ; Koch et Stockfisch, 2006 ; D'Haene *et al*, 2008a).

D'auteurs Gál *et al*, (2007) montrent que malgré une concentration en C et N plus importante en profondeur en labour (15-30 cm), les stocks de C et N sont supérieurs en semis direct du fait de l'augmentation de la densité apparente de cette couche de sol. Selon McCarty *et al*, (1998) ; Stockfisch *et al*, (1999), le rapport C/N de la MOS dans les systèmes de conservation est en général supérieur à celui des systèmes labourés en surface là où les résidus de culture s'accumulent.

**➤ Effet sur les autres éléments nutritifs**

La répartition des éléments nutritifs est également modifiée par les techniques de travail du sol. Ainsi, les micronutriments présentent une stratification verticale identique à celle des pools de C et N : le P, Zn et K s'accumulent en surface dans les systèmes de conservation et

diminuent en profondeur tandis qu'ils sont répartis de façon homogène sur la couche de sol labourée et ils sont en général plus concentrés en profondeur à proximité de la roche mère (Wright *et al*, 2007).

➤ **Effet sur les macro-organismes**

Kladivko (2001) signale que la diminution de l'intensité du travail du sol favorise en général le développement des macro-organismes, car la perturbation physique, l'abrasion du sol et la diminution du mulch à la surface du sol limitent le développement des populations. Cependant, la présence d'un mulch en surface dans les systèmes de conservation procure aussi un espace protecteur pour les ravageurs des cultures (Peigné *et al*, 2007).

### **1.2.2 Rotation culturale**

Définit comme la succession de différentes cultures sur plusieurs années dans une même parcelle. Chaque culture de la rotation contribue au maintien de la fertilité du sol.

La rotation des cultures permet aux sols de se régénérer. Ainsi, elle est de plus en plus appliquée à cause de la pression démographique qui rend difficile la mise en jachère des parcelles (Vlaar, 1992). Les systèmes de rotation des cultures se différencient les uns des autres par le nombre de spéculations utilisées dont va dépendre la durée du cycle de la rotation.

#### **1.2.2.1. Les avantages de la rotation culturale**

La rotation permet : de lutter contre les adventices en les maintenant à un niveau acceptable, de participer à la nutrition de la plante par la présence de cultures qui enrichissent le sol, et d'améliorer la structure du sol de lutter contre les ennemis des cultures en cassant les cycles des maladies et des ravageurs (Cartaud *et al*, 2011).

#### **1.2.2.2. La rotation céréale /légumineuses**

La rotation céréale /légumineuses est d'introduction récente dans la région. Les cultures légumineuses pratiquées dans la zone sont : la fève, lentille, le pois -chiche et le lupin comme plantes fourragères. C'est une rotation utilisée dans la zone pour satisfaire les besoins alimentaires de la population en matière des légumineuses. L'adoption des légumineuses a été aussi facilitée en considération de leur rôle alimentaire pour le cheptel dans un contexte qui était marqué par la réduction des parcours naturels (forestiers et non forestiers) et la disparition de la vaine pâture à un moment où le cheptel connaissait une progression des effectifs (Farhaoui, 2008).

La lentille est une bonne tête de rotation laissant des reliquats azotés et améliorant la structure du sol. Il convient de respecter un délai de 6 ans entre deux lentilles afin de diminuer les pressions parasitaires.



*Chapitre II : Culture du*

*Blé dur*

**1. Présentation de la céréaliculture**

Les céréales constituent une importante ressource alimentaire pour l'homme et l'animal (Karakas, 2011). Elles constituent environ 30% des sources énergétiques alimentaires dans les pays développés, contre plus de 50% dans les pays en voie de développement, atteignant parfois 90% dans certains pays d'Afrique (Benmakhlouf, 2018). Parmi ces céréales, le blé dur (*Triticum durum* desf) qui occupe la deuxième place pour la production mondiale, il compte parmi les espèces les plus anciennes et constitue une grande partie de l'alimentation de l'humanité, d'où son importance économique. Le blé constitue presque la totalité de la nutrition de la population mondiale (Greenwy et Munns. 1980). Il représente environ 8% des superficies cultivées en blés dans le monde et c'est une céréale importante en termes de consommation intérieure dans de nombreux pays du monde. Il sert principalement à la fabrication de semoule, matière première des pâtes alimentaires (Feillet, 2000).

**1.1. Production céréalière dans le monde**

La céréaliculture représente un secteur économique important. En effet, c'est un aliment de base d'une très grande partie de la population mondiale. Les pays importateurs et exportateurs de céréales dépendent les uns des autres et ont intérêt à garantir l'approvisionnement de cette denrée alimentaire et à maintenir des prix stables au niveau mondial. Ils collaborent avec les organisations internationales, en particulier le Conseil International des Céréales (CIC), La situation de la céréaliculture est liée à l'évolution des superficies, des productions et par conséquent des rendements des céréales obtenus (Belagrouz, 2013).

La culture des céréales et particulièrement le blé a connu un véritable essor, ceci est dû à la forte croissance des populations consommatrices donc à son intérêt majeur au niveau du marché mondial (Djelti, 2014).

La figure 02 illustre la répartition des grandes zones de production de blé dans le monde. Pour l'année 2016/2017 la production mondiale était de 753.3 Million de Tonnes (TM). Par contre une baisse de 1.1% est enregistrée à la campagne de 2017/2018 avec une production de 744.9 TM. En vert, figurent les régions qui ont connu un bon niveau de production pour cette campagne 2017/2018 et seront moins acheteurs : cas de l'Europe, l'Afrique du nord, la Russie, l'Ukraine et le Kazakhstan. En rouge, des pays comme les Etats-Unis (- 13 Mt) et le Canada (- 7 Mt) enregistrent des baisses de production par rapport à la campagne précédente (Kalarasse, 2018).

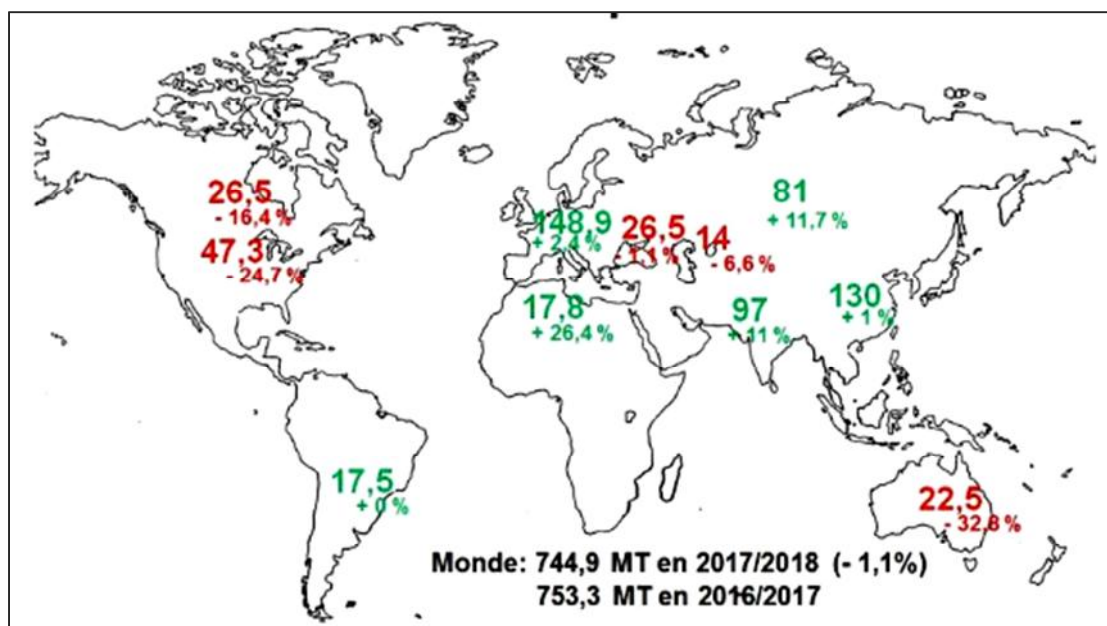


Figure02 : Production du blé dans le monde pour la campagne de (2017/2018) USDA.

La figure 03 montre les grands mouvements d'exportation et d'importation de blé dans le monde pour cette campagne 2017/2018. Les pays du Maghreb sont de très gros acheteurs (28 millions de tonnes). Les plus gros exportateurs mondiaux sont la Russie, avec 32,5 Mt exporté, et l'Union européenne avec 28,5 Mt (Kalarasse, 2018).

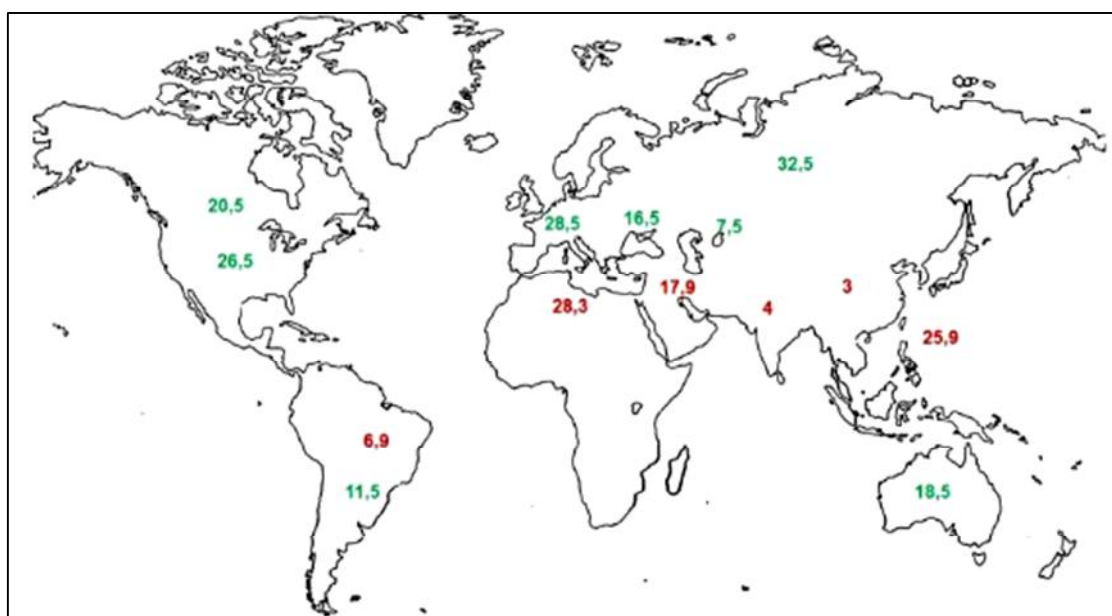
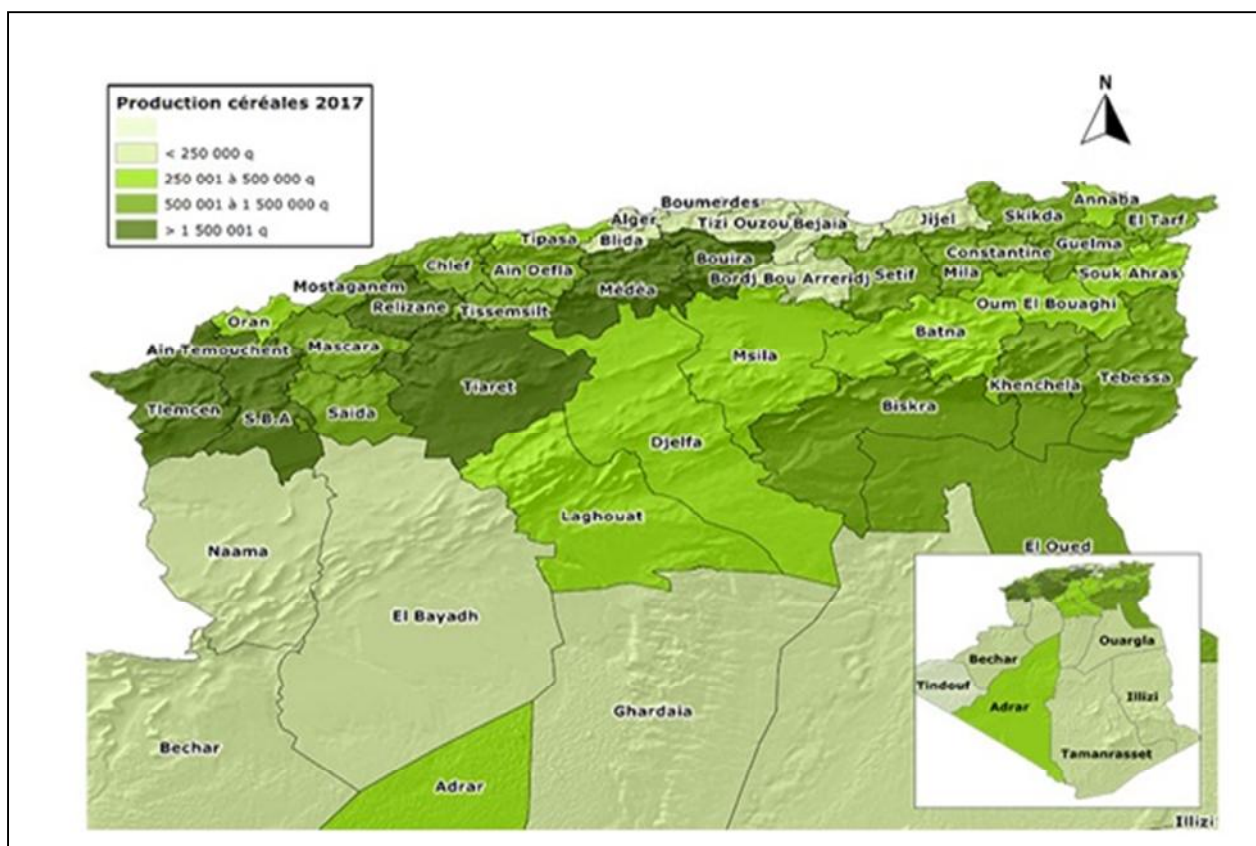


Figure 03 : Exportation et importation de blé dans le monde pour la période 2017/2018 (MT) USDA.

**1.2. Production céréalière en Algérie :**

L'Algérie, se caractérise par une surface agricole utile (SAU) de 8,5 millions d'hectares, Soit, seulement 3% de la surface totale du pays (Belagrouz, 2013). Son climat est de type méditerranéen, très variable, contraignant la production végétale en générale et celle des céréales en particulier (Latreche, 2011). Les grandes cultures, notamment les céréales, les légumineuses alimentaires, les fourrages et les oléagineux sont des produits alimentaires de première nécessité dans l'agriculture algérienne. Elles constituent la consommation de base qui est estimée à 228 kg par habitant par an pour les céréales (Ait Abdallah-Djennadi et al, 2010). Ces dernières occupent une place importante dans les zones aride et semi-aride (MADR, 2007). Car la superficie emblavée annuellement en céréales dans ces régions, se situe entre 3 et 3, 5 millions d'Hectare (Djermoun, 2009). L'orge, le blé dur et le blé tendre occupent à eux seuls 97.60 % de la superficie emblavée, alors que 2,40 % seulement représente la surface occupée par l'avoine (MADR, 2006). La majeure partie de ces emblavures se font dans les régions de Sidi Bel Abbés, Tiaret, Sétif et El Eulma situées dans leur majorité sur les hauts plateaux (Brighen. Chaour, 2016) (fig.4).la production céréalière demeure toujours irrégulière et étroitement liée à un certain nombre de facteurs tant abiotiques (irrégularité dans les précipitations pluviales, techniques agricoles ; etc..) que biotiques (potentiel génétique, maladies, ravageurs, etc. (Benabdellah, 2016). Ce qui témoigne d'une faible maîtrise de la culture et l'indice des aléas climatiques. (Kherch Medjden et Bouchafa, 2010). Ces dernières années un accroissement de 26% en rendement a été enregistré, dû à l'augmentation des superficies emblavées de 3 200 930 ha en (2000-2009) à 3 385 560 ha en (2009-2017). Cette hausse concerne essentiellement le blé dur et de l'orge, qui représentent respectivement 51% et 29% de l'ensemble des productions de céréales en moyenne 2010-2017 (MADR, 2018).



*Figure 04* : Carte schématique représentant les zones céréalières de l'Algérie (MADR, 2018).

### 1.2.1 La répartition spatiale de la céréaliculture

La zone de culture des céréales en Algérie se divise en trois sous zones (fig.5) selon la pluviométrie annuelle totale et l'altitude (Hamadache, 2013).

➤ **La zone littorale** où l'altitude est inférieure à 300 mètres et la pluviométrie moyenne annuelle est égale ou supérieure à 600 mm.

➤ **La zone sub-littorale** où l'altitude est comprise entre 300 et 700 mètres et la pluviométrie moyenne annuelle est comprise entre 450 et 600 mm.

➤ **La zone des hauts-Plateaux** où l'altitude est supérieure à 700 mètres et la pluviométrie moyenne annuelle est inférieure à 450 mm. C'est la zone où la céréaliculture extensive est dominante.

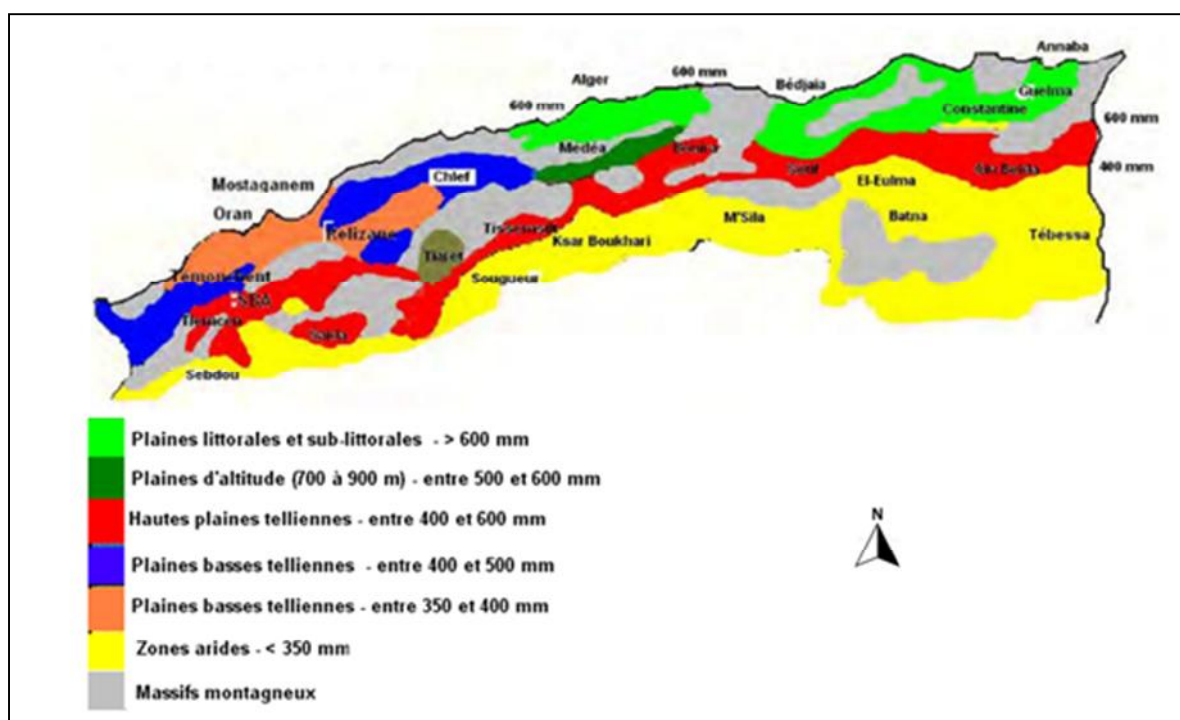


Figure 5 : Zone de culture des céréales dans le nord de l'Algérie (Benabdallah, 2016)

## 2. Aspect botanique de plante de blé dur

### 2.1. Classification botanique du blé dur

Selon Prats, 1960. Crête, 1965. Bonjean et Picard, 1990 ; Feillet, 2000, Le blé dur est une plante herbacée, appartenant au groupe des céréales à paille, qui sont caractérisée par des critères morphologiques particuliers. Le blé dur est une monocotylédone qui obéit à la classification suivante :

Embranchement : *Spermatophytes*

S/Embranchement : *Angiospermes*

Classe : *Monocotylédones*

Super Ordre : *Commeliniflorales*

Ordre : *Poales*

Famille : *Graminacée*

Tribu : *Triticeae*

Sous tribu : *Triticinae*

Genre : *Triticum*

Espèce : *Triticum durum* Desf.

### 3. Caractère morphologique du blé

#### 3.1. L'appareil végétatif

##### ➤ Le système aérien

Les tiges sont des 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 (fig.6). Les chaumes sont interrompus par des nœuds qui sont une succession de zones d'où émerge une longue feuille (Siouda. Benkhelifa, 2016).

Les feuilles sont à nervures parallèles et formées en deux parties : La partie inférieure entourant la jeune pousse ou la tige (la gaine) et la partie supérieure en forme de lame (le limbe). Les feuilles portent à leur jonction avec la gaine des oreillettes vêtues et une ligule (Moule, 1971).

##### ➤ Le système racinaire

Le système racinaire est de type fasciculé. En cours de développement, deux systèmes se forment :

- Le système racinaire séminal (primaire) : fonctionne de la germination au tallage.
- Le système racinaire coronaire (secondaire) : apparait au stade tallage (Mekaoussi, 2015).

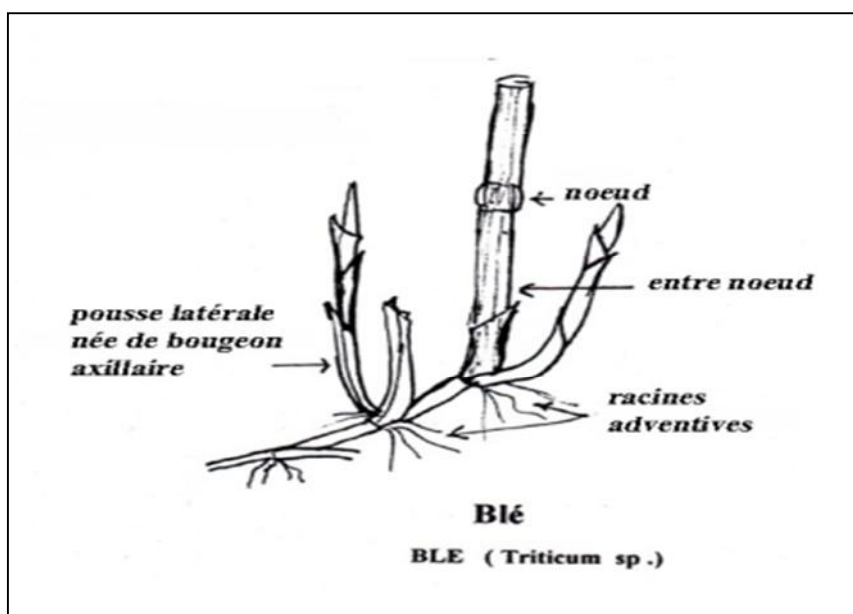


Figure06 : le système racinaire de blé dur (Clerget, 2011).

### 3.2. L'appareil reproducteur

Les fleurs sont regroupées en inflorescence correspondant à l'épi, l'épi de blé est formé de deux rangées d'épillets situés de part et d'autre de l'axe. Un épillet regroupe trois fleurs à l'intérieur de deux glumes. Chaque fleur est dépourvue de pétales, et est entourée de deux glumelles (fig.7). Elle contient trois étamines, un ovaire surmonté de deux styles plumeux. Au cours de la fécondation, les anthères sortent des fleurs. Les grains de pollen sont relâchés, et s'attachent au stigma où peut se produire la fécondation. Après fécondation, l'ovaire donnera le grain de blé (Sadouki et Boutouchent, 2018).

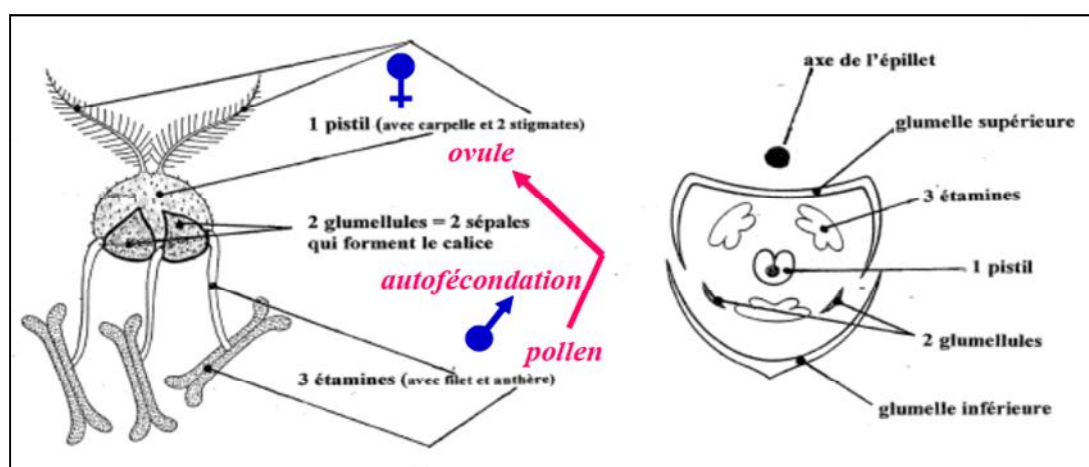
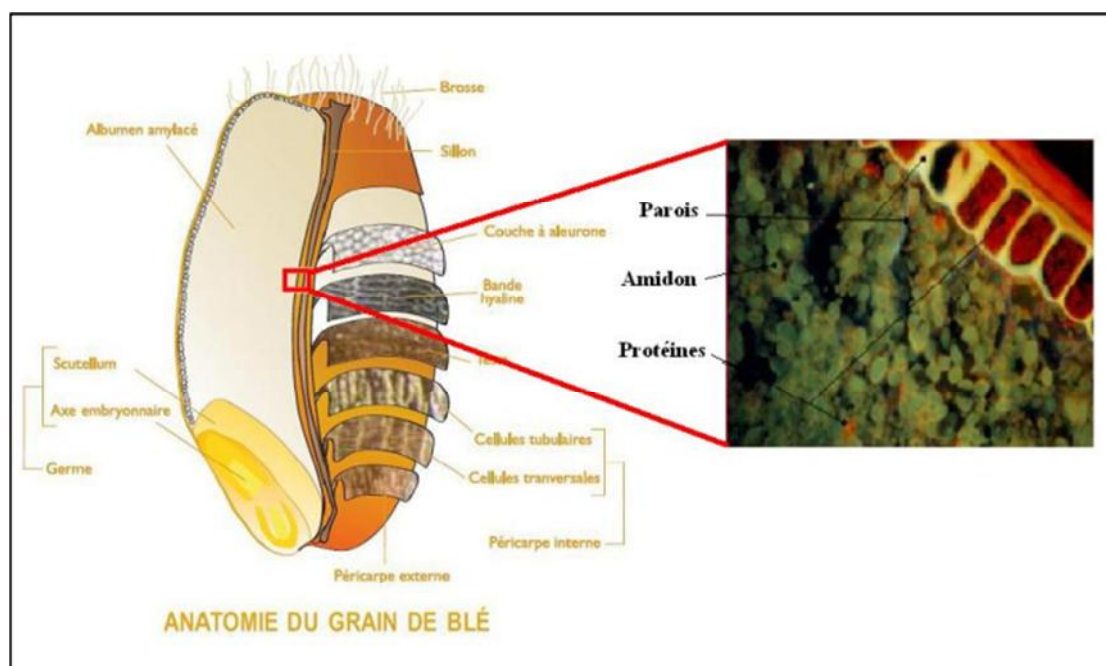


Figure 07 : L'appareil reproducteur de blé dur (Clerget, 2011).

### 3.3. Le grain

Les grains de blé sont des fruits, appelés caryopses. Ces derniers sont de forme ovoïdes, possèdent sur l'une de leurs faces une cavité longitudinale "le sillon" et à l'extrémité opposée de l'embryon des touffes de poils "la brosse". Le caryopse est constitué de 03 parties (Fig.8) :

- **Les enveloppes** : donnent le son en semoulerie, elles sont d'épaisseur variable et sont formées de 3 groupes de téguments soudés.
- **L'albumen** : Principalement amylacé et vitreux chez le blé dur, possède à sa périphérie une couche à aleurone riche en protéines, lipides, hémicelluloses et minéraux.
- **L'embryon** : comporte Le cotylédon unique ou scutellum riche en lipides et protéines, et une plantule plus ou moins différenciée. (Siouda et Benkhelifa, 2016).



**Figure 08 :** Coupe longitudinale présentant les constituants du grain de blé dur.  
(Siouda. Benkhelifa, 2016).

#### 4. Cycle Végétatif du blé dur

Le cycle du blé comporte : une période végétative, une période reproductrice et une période de maturation. La période végétative comporte les phases germination, pré tallage et tallage. Cependant la période reproductrice comporte les phases montaison, épiaison, floraison et la période maturation comporte le grossissement et la maturation du grain.

##### 4.1. La période végétative

Elle se caractérise par un développement strictement herbacé et s'étend du semis jusqu'à fin de tallage.

##### ➤ Phase germination-levée

La germination est le passage de la semence de l'état de vie lente à l'état de vie active. Le grain de blé ayant absorbé au moins 30% de son poids en eau. La coléoptile joue un rôle protecteur et mécanique pour percer le sol. A la levée les premières feuilles amorcent la photosynthèse. Néanmoins les réserves du grain continuent à être utilisées. On parlera de levée lorsque 50% des plantes seront sorties de la terre (Ait, 2008).

➤ **Phase levée-tallage**

**Stade début tallage** : Lorsque la plante possède quatre feuilles, une nouvelle tige (la talle primaire) apparaît à l'aisselle de la feuille la plus âgée. C'est le stade appelé également «double ride» dans lequel le bourgeon végétatif évolue en bourgeon floral. Aussi les ébauches des futurs épillets apparaissent à l'aisselle des ébauches de feuilles constituant une succession verticale en double ride (Morsli, 2010).

**Stade plein tallage** : les talles apparaissent successivement ; talles primaires des deuxièmes et troisièmes feuilles et puis talles secondaires à l'aisselle des feuilles des talles primaires. Des ébauches d'épillets se forment pendant le tallage, alors que les ébauches de feuilles régressent (Morsli, 2010).

#### **4.2. La période reproductrice**

Elle comprend la formation et la croissance de l'épi ; elle se caractérise par :

➤ **Stade montaison-gonflement**

La montaison débute à la fin du tallage, elle est caractérisée par l'allongement de entre nœuds et la différenciation des pièces florales. A cette phase, un certain nombre de talles herbacées commence à régresser alors que, d'autres se trouvent couronnées par des épis.

Pendant cette phase de croissance active, les besoins en éléments nutritifs notamment en azote sont accrus. La montaison s'achève à la fin de l'émission de la dernière feuille et des manifestations du gonflement que provoquent les épis dans la graine (Nadjem, 2012).

➤ **Stade d'épiaison**

Cette période commence dès que l'épi apparaît hors de sa graine foliaire et se termine quand l'épi est complètement libéré. La durée de cette phase est de 7 à 10 jours, elle dépend des variétés et des conditions du milieu, c'est la phase où la culture atteint son maximum de croissance (KADIR, 2015).

➤ **Stade d'épiaison– fécondation**

C'est au cours de cette période que s'achève la formation des organes floraux et que vas effectuer la fécondation. Le nombre de fleurs fécondées durant cette période critique dépendra de la nutrition azotée et l'évapotranspiration. Elle correspond au maximum de la croissance de

la graine qui aura élaboré les trois quarts de la matière sèche totale et dépend étroitement de la nutrition minérale et de transpiration qui influencent le nombre final de grain par épi (Ait, 2008).

#### **4.3. Période de formation et de maturation**

##### **➤ Grossissement du grain**

Cette phase marque la modification du fonctionnement de la plante qui sera alors s'orientée vers le remplissage des grains à partir de la biomasse produite. Au début, le grain organise, les cellules se multiplient. Les besoins des grains sont inférieurs à ce que fournissent les parties aériennes (plus de 3/4 de la matière sèche sont stockés au niveau des tiges et des feuilles). Par la suite, les besoins augmentent et le poids des grains dans l'épi élève, alors que la matière sèche des parties aériennes diminue progressivement.

Seulement 10% à 15% de l'amidon du grain peut provenir de réserves antérieures à la floraison. A l'issue de cette phase, 40 à 50 % des réserves se sont accumulées dans le grain qui, bien qu'il ait atteint sa taille définitive, se trouve encore vert et mou, c'est le stade « grain laiteux ». L'autre partie des réserves se trouve encore dans les tiges et les feuilles qui commencent à jaunir. Les réserves du grain proviennent en faible partie de la photosynthèse nette qui persiste dans les dernières feuilles vertes. Chez les variétés tardives, cette quantité est de 12 % contre 25 % chez les précoces. La majeure partie des réserves accumulées vient des tiges et les feuilles jaunissantes, mais non encore desséchées (Gouasmi, Badaoui. 2017).

##### **➤ Maturation du grain**

La phase de maturation succède au stade pâteux (45% d'humidité). Elle correspond à la phase au cours de laquelle le grain va perdre progressivement son humidité en passant par divers stades. Elle débute à la fin du palier hydrique marqué par la stabilité de la teneur en eau du grain pendant 10 à 15 jours au-delà de cette période, le grain ne perdra que l'excès d'eau qu'il contient et passera progressivement aux stades « rayable à l'angle » (20% d'humidité) puis « cassant sous la dent » (15-16% d'humidité) (Gate, 1995).

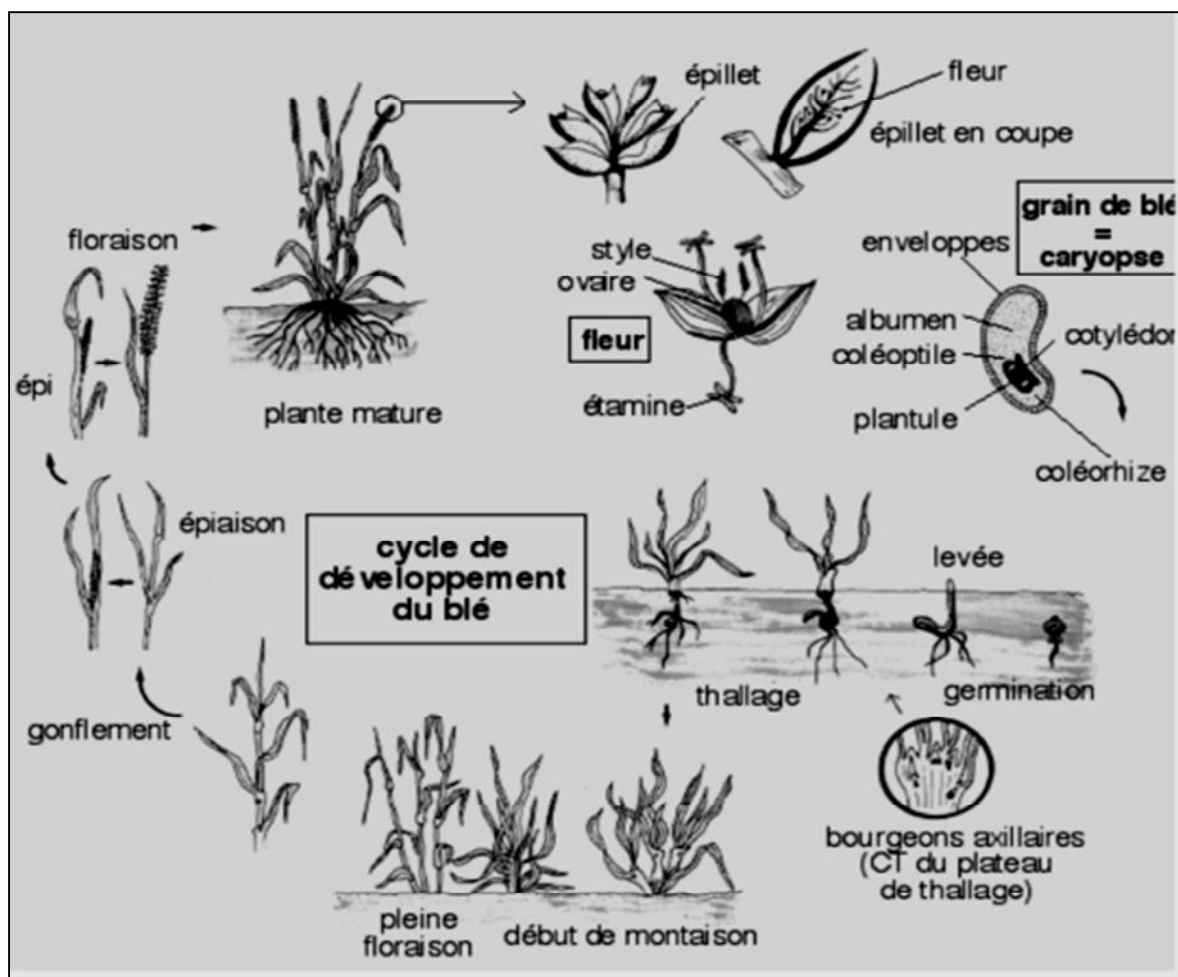


Figure 09 : Cycle de développement de blé (Henry et al, 2000).

## 5. Exigences du Blé dur

Un bon comportement de la culture durant tout son cycle de développement exige la réunion de certains facteurs qui conduisent à l'observation d'un meilleur rendement et parmi Ces exigences on peut citer :

### 5.1. Exigences édaphiques

Le blé exige un sol bien préparé, meulé et stable, résistant à la dégradation par les pluies d'hiver pour éviter l'asphyxie de la culture et permettre une bonne nitrification au printemps. Sur une profondeur de 12 à 15cm pour les terres battantes (limoneuses en générale) ou 20 à 25 cm pour les autres terres et une richesse suffisante en colloïdes, afin d'assurer la bonne nutrition nécessaire aux bons rendements. Particulièrement un sol de texture argilo-calcaire, argilo-limoneux, argilo-sableux ne présentant pas de risques d'excès d'eau pendant l'hiver. Les séquences de travail du sol à adopter doivent être en fonction du précédent cultural, de la

texture du sol, et de la pente. Le pH optimal se situe dans une gamme comprise entre 6 à 8. (Nedjah, 2015).

## **5.2 Exigences climatiques**

### **5.2.1. Température :**

La température conditionne à tout moment la physiologie de blé. L'optimum se situe entre 20 et 22 °C. Une température élevée est favorable au développement et à la croissance (Hacini, 2014).

Les fortes températures provoquent une levée trop rapide et parfois un déséquilibre entre la partie aérienne et la partie souterraine : Les températures entre 25 et 32 °C défavorisent l'allongement racinaire et l'optimum se situe entre 5 et 12 °C (Ait, 2008).

Quant aux basses températures et la tolérance au froid, le blé dur a la capacité de supporter les températures inférieure à 4°C considérée comme la température minimale pour la croissance. Cependant, une seule journée à une température minimale de l'ordre de -4°C entre le stade épi 1 cm et un nœud, pénalise le nombre de grains par épi (Gate, 1995).

### **5.2.2. Eau :**

La sécheresse est l'une des causes principales des pertes de rendement du blé dur, qui varient de 10 à 80% selon les années. Les besoins en eau de la culture varient de 450 à 650 mm. Au début du cycle, ces besoins sont relativement faibles. C'est à partir de la phase épi 1 cm jusqu'à la floraison qu'ils sont les plus importants. En effet, la période critique en eau se situe de 20 jours avant l'épiaison jusqu'à 30 à 35 jours après la floraison (Mesrane. 2018).

### **5.2.3. Lumière :**

La lumière est la source d'énergie qui permet à la plante de décomposer le CO<sub>2</sub> atmosphérique pour en assimiler le carbone et réaliser la photosynthèse des glucides. La lumière est donc un facteur climatique essentiel et nécessaire pour la photosynthèse (Hacini. 2014) En effet, un bon tallage est garanti, si le blé est placé dans les conditions optimales d'éclairement. Une certaine durée du jour (photopériodisme) est nécessaire pour la floraison et le développement des plantes (NEDJAH. 2015).

**5.2.4. Fertilisation :**

La fertilisation est raisonnée sur le principe de la restitution au sol des quantités d'éléments (NPK) fertilisants prélevés par les récoltes. Le blé a besoin de ces éléments essentiels et le rôle de chaque élément sur le plant de blé est le suivant :

**➤ Azote (N)**

Le blé dur est particulièrement gourmand en Azote pour atteindre un niveau de protéines satisfaisant pour les fabricants de pâtes et de semoules. Les apports d'Azote doivent être fractionnés suivant les stades du cycle végétatif. Au tallage, l'influence de l'Azote se manifeste sur la première composante du rendement : Le nombre de talles par plante. Au stade montaison, l'Azote apporté permet d'émettre des épis, dont le nombre est fortement influencé par la nutrition azotée (Mesrane, 2018).

Le manque d'Azote pourrait aussi se traduire par une moindre fertilité des épis. Durant cette période, le blé dur doit absorber 3,5 unités d'azote pour produire 1 quintal de grain à 13-14% de protéines (Siouda. Benkhelifa, 2016)

Au stade épiaison, les besoins deviennent très importants et la demande en Azote s'accroît en liaison avec l'activité de croissance. La plante a absorbé pratiquement tout son Azote dès le début du stade laiteux. A partir de ce stade, il y a transfert des réserves de la plante, des parties végétatives vers le grain (Mesrane, 2018).

**➤ Phosphore (P)**

Le blé dur est une culture peu exigeante en phosphore. Sachant qu'il faut 1,7 Kg de P pour produire un quintal de blé, les besoins de la culture dépendent du rendement objectif (SOUALMIA, 2014). Le phosphore joue également plusieurs rôles Il est considéré comme un constituant essentiel des chromosomes, il intervient partout où il y a multiplication cellulaire d'où l'importance du phosphore dans les phénomènes de croissance et de reproduction. Il joue aussi, un rôle déterminant dans le transfert d'énergie, il est indispensable à la photosynthèse et aux processus chimio-physiologiques, que le phosphore améliore la réponse des céréales à la fertilisation azotée (NEDJAH, 2015).

Le phosphore participe dans :

- Maturation des grains : Pour les céréales, des teneurs élevées en phosphore réduit le temps de maturité et donne une paille plus solide.
- Formation des graines nécessite du phosphore : des quantités importantes de phosphore sont stockées dans les semences.
- Stimulation de la croissance des racines : Un apport localisé de phosphore (et nitrate) entraîne une prolifération des racines dans cette zone. Par contre, on a constaté moins de réponse de la racine à des apports localisés de potassium ou d'ammonium (Alhachemi, 2014)

➤ **Le potassium (k)**

Le potassium est essentiellement retenu par l'humus ou l'argile (dans certains sols, il pourra donc être perdu en grande quantité par lessivage). Le potassium n'est pas très mobile dans la plante. Il joue un rôle primordial dans l'absorption des cations, dans l'accumulation des hydrates des protéines, le maintien de la turgescence des cellules et la régulation de l'économie d'eau de la plante. C'est aussi un élément de résistance des plantes au gel, à la sécheresse et aux maladies. Il est essentiel pour le transfert des assimilats vers les organes de réserves (grains, bulbes et tubercules) (NEDJAH, 2015). Les besoins en potassium des céréales peuvent être supérieurs à la quantité contenue à la récolte 30 à 50 kg de K/ha (Siouda, Benkhelifa. 2016).



***CHAPITR III : La  
mycorhization Du blé***

**1. Définition d'une symbiose mycorhizienne et concept**

Le terme mycorhize, (du grec : *mukēs* = champignons, *rhiza*= racine), désigne l'association symbiotique entre des champignons bénéfiques du sol et les racines des plantes. Une définition récente plus large, de mycorhizes qui embrasse toute la diversité des mycorhizes est publiée par Brundrett 2004 : «*Une mycorhize est une association symbiotique entre un champignon et une racine d'une plante vivante, essentielle pour l'un ou les deux partenaires. Les mycorhizes sont principalement responsables du transfert d'éléments nutritifs. Elles se produisent dans un organe végétal spécialisé ou un contact intime résultant de développement synchronisé des plantes-champignons*».

Les mycorhizes sont hétérotrophes pour le carbone, incapables de photosynthèse et sont complètement dépendants, pour les substances carbonées, de la plante qu'ils colonisent. Ils fournissent en retour de l'azote, du phosphore et d'autres substances minérales qu'ils sont capables de mobiliser grâce à leurs connexions hyphales avec le sol (HONRUBIA, 2009).

**2. Historique**

Les mycorhizes sont apparues sur terre il y a environ 400 millions d'années (Simon *et al*, 1993) et sont considérées comme étant à l'origine de la flore terrestre (Selosse et Le Tacon, 1997). Depuis leur extension dans l'écosystème terrestre, les plantes ont adopté des stratégies en relation avec leur pouvoir d'adaptation, Parmi les microorganismes telluriques figurent certains champignons qui induisent, au niveau des racines de plantes, des organes nouveaux appelés « mycorhizes » (Smith et Read, 2008).

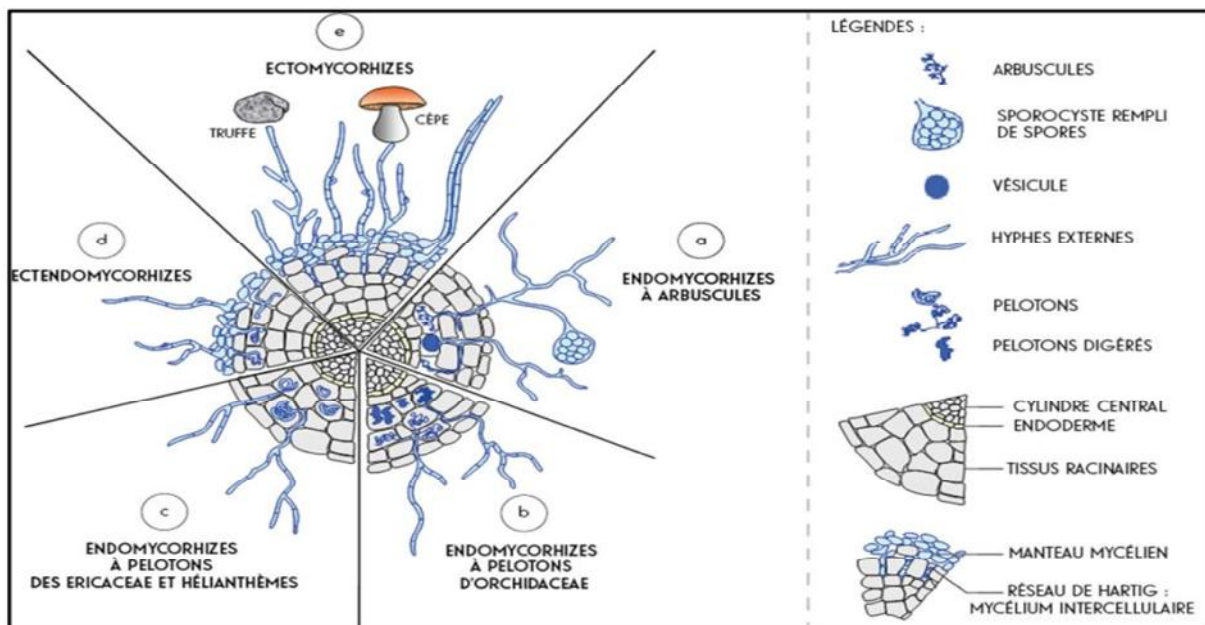
Les premières observations microscopiques de mycorhizes de différentes espèces d'arbres sont décrites dès 1840 par Theodor Hartig qui ne reconnaît pas la nature fongique des structures observées. En 1874, Bruchmann renouvelle sur des racines de pin ces premières observations et reconnaît la nature fongique du réseau qui enserre toutes les cellules des tissus externes de la racine. Albert Bernard Frank était le premier à synthétiser toutes les observations de cette association en prenant d'abord acte de la présence systématique de filaments fongiques à la surface et à l'intérieur des racines des arbres observés, il a soumis ce fait à l'expérience, et a démontré de façon causale le caractère obligatoire et bénéfique pour la plante de la présence des champignons et il a conclu que l'association était nécessaire au bon développement des jeunes arbres. Ensuite en 1885, Frank a introduit le terme de mycorhize pour désigner les organes mixtes racines-champignons. En 1886, Robert Hartig approuve et

défend la nouvelle théorie et fait définitivement adopter le nom de Réseau de Hartig en l'honneur de son père Theodor Hartig qui avait le premier décrit cette structure dès 1840. Par la suite, tout au long du XXe siècle, plusieurs chercheurs étudièrent d'autres types de mycorhizes (Garbaye, 2013). Ce n'est que depuis quelques décennies que les botanistes et mycologues ont réalisé que la presque totalité des plantes terrestres vivent en symbiose avec des champignons du sol (Mosse, 1956)

**3. Différents types de mycorhizes**

La classification des mycorhizes est basée sur le type de champignon associé, selon que celui-ci est asepté, c'est-à-dire zygomycète de l'ordre des Glomales, ou septé, comme les ascomycètes ou basidiomycètes (Smith et Read, 1997).

Cette symbiose prend différentes formes (Fig.11), appelées ectomycorhizes (mycorhizes externes) qui se rencontrent chez environ 5% des végétaux, endomycorhizes (mycorhizes internes) qui sont les plus répandues, environ 80% des végétaux et ectendomycorhizes.



**Figure 11** : Principaux types mycorhiziens représentés sur une coupe transversale de racine.

(a) endomycorhizes à arbuscules ; (b) endomycorhizes à pelotons d'Orchidaceae ; (c) endomycorhizes à pelotons des Ericaceae et Hélianthèmes ; (d) ectendomycorhizes ; (e) ectomycorhize (D'après Le Tacon, 1985).

**3.1. Ectomycorhizes (ECM)**

Les Ectomycorhizes (du grec «*ektos*» : à l'extérieur) sont des champignons qui se développent essentiellement autour de la racine, sans jamais entrer à l'intérieur de ces dernières. Ils forment des associations avec des plantes ligneuses notamment la sylviculture. Ce type d'association concerne 13 à 15% des plantes vasculaires, il est surtout présent dans les régions tempérées et dans la forêt boréale, mais se trouve aussi chez quelques espèces tropicales de la famille des Dipterocarpaceae, Euphorbiaceae, Cesalpiniaceae, Myrtaceae et Fagaceae. Les partenaires fongiques appartiennent surtout aux **Basidiomycètes** (*Bolets*, *Russules*, *Laccaire*) mais aussi aux **Ascomycètes** (*Tuber*, *Elaphomyces*) et rarement aux **Zygomycètes** (*Endogone*) (Redhead, 1980).

D'après (Smith and Read, 2008) les ectomycorhizes sont formées par trois composants (Fig.12) :

**A. Manteau fongique ou la graine** entoure les racinelles et modifie leur morphologie.

**B. Les hyphes** constituent le réseau de Hartig (Rh) entre les espaces des cellules subéreuses et des cellules périphériques du parenchyme cortical.

**C. Un réseau d'hyphes extra radiculaire** se forme à partir de manteau fongique dans la rhizosphère nommé réseau extramatriciel.



**Figure 12** : photographie représentant une ectomycorhize formant son manteau fongique au tour de la racine d'une plante ligneuse (Zoulim, 2017).

**3.2. Les endomycorhizes**

Les endomycorhizes ou les mycorhizes endotrophes (du grec « endo » : à l'intérieur) ; C'est une association symbiotique entre deux eucaryotes, retrouvent dans les racines des espèces herbacées que dans les racines des arbres appartenant aux Angiospermes, Gymnospermes et Ptéridophytes, ainsi que les gamétophytes de quelques mousses, lycopodes et des Psilotales (Peterson *et al.*, 1981 ; Pocock et Duckett, 1984). Sont caractérisées par l'absence de manchon mycélien externe, ce qui les rend non visible à l'œil nu, et par la pénétration des hyphes fongiques dans les cellules corticales. La morphologie des racines de ce type d'association n'est pas modifiée (Guissou, 2001). Il existe trois types d'endomycorhizes :

- Les endomycorhizes arbutoides des Ericacées.
- Les endomycorhizes orchidoïdes des Orchidées.
- Les endomycorhizes à arbuscules.

**A. Mycorhizes Arbutoïdes**

Les mycorhizes arbutoïdes sont retrouvés chez un groupe d'espèces appartenant aux Ericales. (Peterson et Massicotte, 2004; Smith et Read, 2008). De façon structurelle, elles ressemblent aux ectendomycorhizes au niveau du manchon, du réseau de Hartig et de la complexité des hyphes intracellulaires. Cependant, la différence majeure entre ces deux types de mycorhizes est que dans le cas des mycorhizes arbutoïdes, les hyphes intracellulaires sont confinés à l'épiderme (Garbaye, 2013, Peterson et Massicotte, 2004).

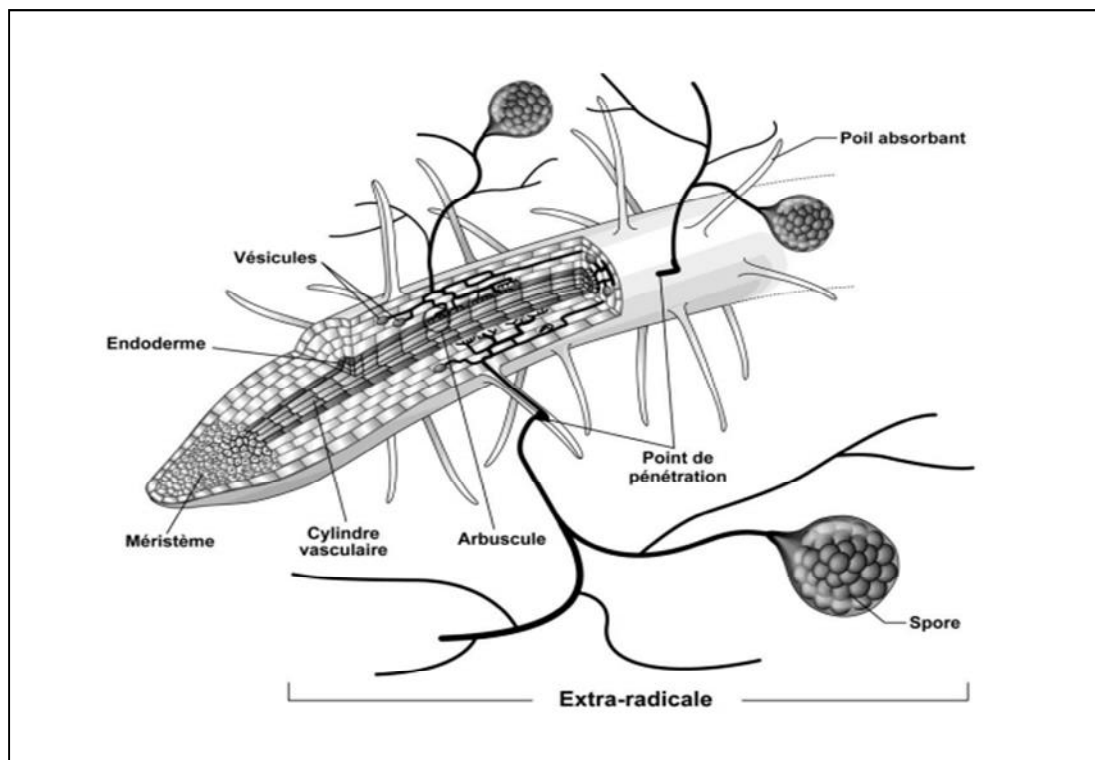
**B. Mycorhizes Orichidoïdes**

Les mycorhizes orchidoïdes sont caractérisés par la formation des pelotons d'hyphes dans les cellules corticales du tissu de la racine. De passage, le champignon pénètre dans les cellules exodermiques et les hyphes se ramifient à travers le tissu cortical par pénétration intracellulaire. Les pelotons s'effondrent au fil du temps. Les cellules peuvent être colonisées par plus d'un hyphe plusieurs fois. Tous les membres de la famille des Orchidacées sont censés former ce type de mycorhizes (Smith et Read, 2008).

**C. Les Mycorhizes à arbuscules (MA)**

Sont de loin les plus répandues à la surface du globe. Ils se sont adaptés à de nombreux environnements et différentes plantes hôtes. Ils peuvent former des associations mutualistes

avec les racines fines d'environ 80 % de toutes les plantes terrestres ligneuses, herbacées, les mousses, fougères, gymnospermes et angiospermes plusieurs conifères et la majorité des plantes à fleurs, mono et dicotylédones (Smith et Read, 1997). Les champignons mycorhiziens à arbuscules (Fig.13) sont caractérisés par des structures très ramifiées appelées "arbuscules", organes d'échange de nutriments entre la plante et le champignon. Quoique situés à l'intérieur des cellules, les arbuscules ne pénètrent pas dans le cytoplasme mais se limitent à l'espace entre la paroi et la membrane plasmique des cellules qui les hébergent. En plus des arbuscules, certaines espèces, notamment *Glomus* spp, forment des "vésicules", organes situés à l'intérieur et/ou entre les cellules corticales. Les vésicules se présentent sous différentes formes et sont des organes de réserve renfermant des lipides et de nombreux noyaux.



**Figure 13** : Schéma représentatif de la morphologie racinaire d'une racine endomycorhizée, le champignon est un champignon endomycorhizien à vésicule et à arbuscule (Fortin et *al*, 2008)

### 3.3 Ectendomycorhizes

Les ectendomycorhizes présentent à la fois les caractères structuraux des ectomycorhizes et des endomycorhizes (Fig.14), par la présence du manteau mycélien et le développement

d'hyphes inter et intracellulaires. Cependant elles ont une morphologie semblable à une ectomycorhize simple. En effet, il y a un manteau fongique mince, un réseau de Hartig et une formation de pelotons d'hyphes intracellulaires. Ce type de mycorhize a été observé chez les Arbutacées et les Monotropacées, ils sont formés par des Basidiomycètes (Cortinarius, Boletus) (Mikola, 1988), Il existe aussi un type de champignons de mycorhizes appartient à la classe des *Ascomycètes* chez les genres tels que *Casuarina*, *Eucalyptus*, *Populus*, *Quercus*, et *Acacia* (Founoune, H. (2001). La phase extra matricielle est moins développée que celle des ectomycorhizes dans la mycorhizosphère (Peterson et al, 2004).



**Figure 14 :** Différentes formes des ectendomycorhizes (Photo Yves Prin).

**A :** Coupe transversale dans une ectendomycorhizes de *Pinus sp*, observée au microscope fluorescent : le manteau, réseau de Hartig pelotons d'hyphes intra matricielle. **B :** morphotype d'une ectendomycorhizes.

#### **4. Mycorhization des céréales**

Chez les céréales, les mycorhizes que l'on trouve sont des endomycorhizes arbuscules (MA), les MA sont de la classe des Gloméromycètes, avec environ 250 espèces mycorhizogènes (Baron, 2016). Ces champignons concernés appartiennent à l'ancien ordre des Glomales (Zygomycètes) (Schwarzott et al, 2001 ; Hibbett et al, 2007), Ce sont des champignons filamenteux cenocytiques qui colonisent à la fois le sol et les racines en établissant un pont entre la rhizosphère et la plante, Les MA se composent des structures intra et extra racinaires. Les structures intra racinaires sont : les arbuscules, les vésicules et les hyphes. Les structures extra racinaires sont des hyphes, des spores et des cellules auxiliaires (Oehl et al, 2008).

Les Gloméromycètes sont des biotrophes obligatoires, incapable de compléter leur cycle de vie sans symbiose (Bonfante et Bianciotto, 1995). Les spores fongiques MA sont la seule phase où le mycobionte est indépendant de la plante. Leur taille varie entre 20 à 1000 µm de diamètre (Brundrett et al, 1996).

#### **4.1. Etapes de développement des champignons à arbuscules**

La plupart des plantes dans les écosystèmes terrestres ont des associations mycorhiziennes (Brundrett, 1991). Les mycorhizes à arbuscules sont le type le plus important dans la plupart des écosystèmes. Cependant, les plantes avec MA sont toujours aussi importantes dans les habitats les plus extrême (Harley et Harley, 1987; Koske *et al*, 1992; Brundrett, 1999).

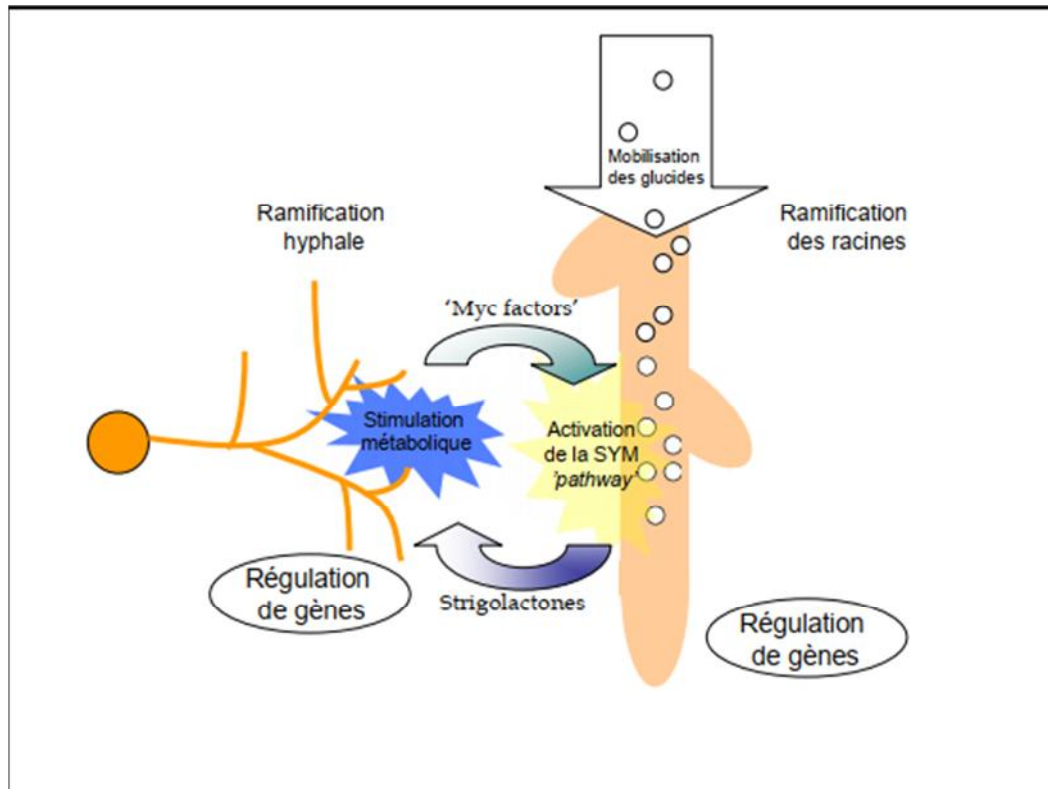
Pour l'établissement de la symbiose, deux phases sont nécessaires. **La phase présymbiotique** (comprenant la germination des spores, la ramification et le développement des hyphes germinatifs), et **la phase symbiotique** (comprenant la prolifération des hyphes à l'intérieur des racines de l'hôte et leur expansion en dehors des racines qui est accompagnée par la formation des spores). En dehors de ces deux phases, quand les conditions sont favorables, les spores des CMA peuvent germer spontanément en absence d'une plante hôte sans avoir besoin d'utiliser leurs réserves lipidiques (Bécard et al, 2004).

##### **A. Phase présymbiotique**

Le dialogue entre les CMA et les racines des plantes commence avant tout contact physique (Fig.15). Après la germination des spores (stade asymbiotique), qui n'a pas besoin de facteur de la plante. Le champignon répond à la présence des racines de la plante hôte par une ramification intense des hyphes (phase présymbiotique). Ce phénomène n'est pas observé en présence de racines non-hôte, ce qui suggère que le CMA perçoit un signal émanant de la plante hôte (Giovannetti *et al*, 1993). Les signaux des plantes dans les exsudats racinaires activent l'expression du gène fongique (Tamasloukht *et al*, 2003, 2007). Les flavonoïdes contenus dans les exsudats des racines semblent jouer un rôle au niveau du processus de mycorhization (Gianinazzi-Pearson *et al*, 1989). Récemment, une nouvelle hormone végétale, la strigolactone, a été identifiée dans les exsudats racinaires : cette molécule est soupçonnée d'être impliquée dans le processus de signalisation et stimulerait chez les champignons la respiration et la ramification des hyphes (Akiyama *et al*, 2005. Besserer *et al*, 2006).

A son tour, le champignon libère les molécules signal (appelés facteurs Myc) qui induisent, avant le contact avec la racine, des réponses spécifiques de la racine-hôte via

l'activation transcriptionnelle de gènes de la plante associés au processus symbiotique (Kosuta *et al*, 2003; Weidmann *et al*, 2004). Outre le fait que les facteurs Myc sont des composés diffusibles qui suscitent des réponses symbiotiques des plantes, on n'avait pas d'idée précise sur leur structure, jusqu'à récemment. En effet, la structure de la molécule libérée par *Rhizophagus irregularis* a été identifiée. Le champignon MA sécrète un mélange de lipochitoooligosaccharides sulfatés et non sulfatés (LCO<sub>S</sub>) qui ont des similitudes structurales avec des facteurs Nod de rhizobium (Maillet *et al*, 2011).



**Figure 15** : les principales réponses observées chez la plante et le champignon durant la phase présymbiotique dans l'interaction mycorhiziennes à arbuscules (Genre, 2012).

**B. La phase symbiotique**

Au cours de cette phase le champignon forme un hyphopode ou appressorium (Fig.16): c'est un gonflement des cellules à l'extrémité d'un hyphe ou d'un tube germinatif (Blaszkowskiet, 2003), qui forme environ 36 h après le contact avec les cellules épidermiques (Dalpé et al, 2005b). Ce dernier représente l'un des premiers signes morphologique de la reconnaissance et le point d'accroche des champignons à la racine et son futur point de pénétration. Dans la cellule épidermique située sous l'hyphopode, un appareil pré-pénétration (**PPA**), constitue essentiellement par des microtubules, des filaments d'actine et du réticulum

endoplasmique, est mise en place dans les cellules rhizodermique ciblée par le champignon (Genre et al, 2005). La PPA est un pont apoplasmique endocellulaire à travers lequel le champignon va se développer pour traverser les différentes couches cellulaires jusqu'aux cellules corticales (Genre et al, 2005 ; 2008).

Le champignon pénètre dans les cellules corticales sans en traverser la membrane plasmique et forme des structures hyper-ramifiées appelées arbuscules. Les arbuscules sont entourés d'une membrane plasmique péri-arbusculaire séparant le champignon du cytoplasme végétal. C'est au niveau des arbuscules qu'ont lieu les échanges carbone-phosphate-azote entre le champignon et la plante grâce à des transporteurs spécifiques. Les arbuscules ont une durée de vie limitée (en moyenne 8,5 jours) (Balzergue, 2012). Ils atteignent une taille maximale dans la cellule puis rentrent en sénescence et le champignon peut être complètement éliminé de la cellule végétale qui revient à son état initial (Javot et al, 2007).

Une cellule peut ainsi accueillir plusieurs arbuscules successifs. Ensuite le champignon peut finir son cycle de développement et former une nouvelle génération de spores à l'intérieur de son réseau mycélien cénotique, c'est-à-dire sans cloison. Parallèlement à son développement intra-racinaire, un mycélium se développe à l'extérieur de la racine capable de prélever l'eau et les sels minéraux dans des zones de sol normalement inaccessibles aux racines non mycorhizées. Ce mycélium extra-racinaire peut coloniser de nouvelles régions du système racinaire de la plante hôte (infections secondaires) ou coloniser les racines d'une plante voisine. Il produit également les nouvelles spores à l'origine d'un nouveau cycle (Balzergue, 2012).

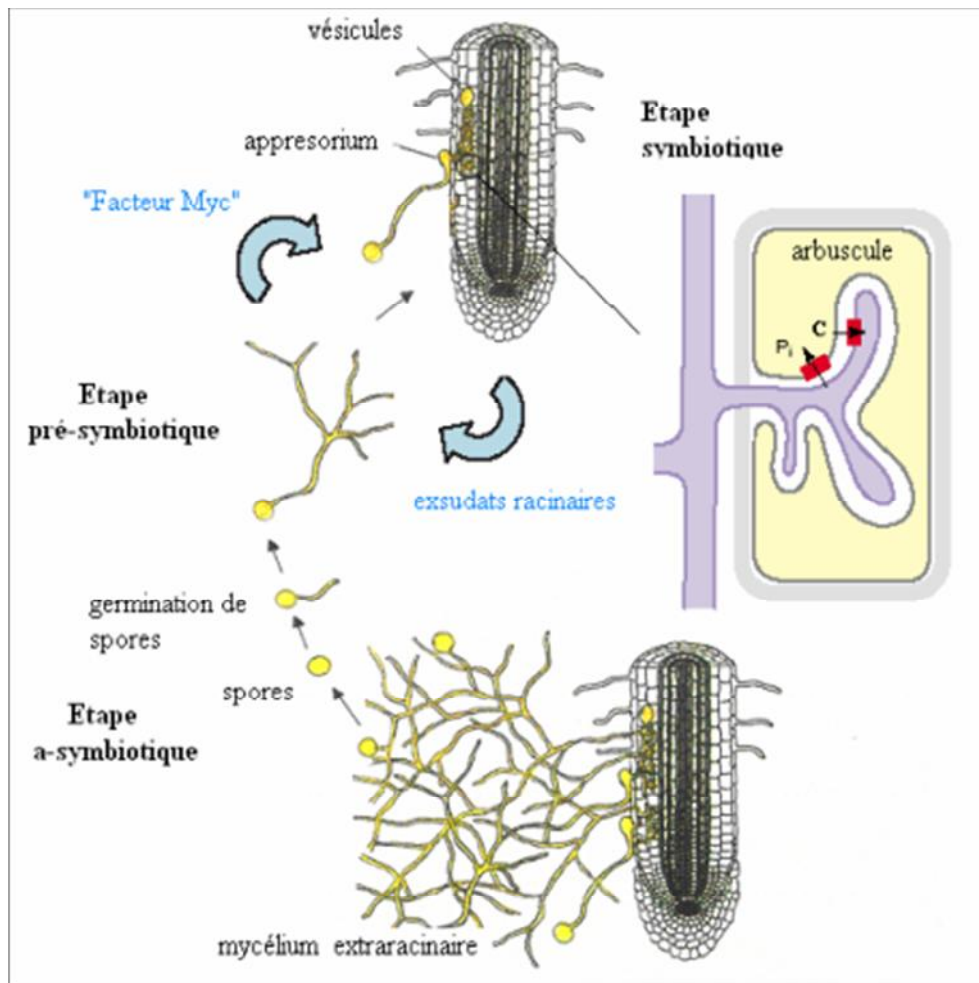


Figure 16 : Cycle de développement des champignons MA (Gomez-Roldan, 2008).

## 4.2. Facteurs influençant la mycorhization

### A. Influences des pratiques culturales sur la symbiose endomycorhizienne

Le type de culture, la nature du sol et l'itinéraire technique adopté peuvent jouer considérablement sur l'activité des CMA (Hijri *et al*, 2006). Ainsi le travail du sol provoque la destruction perpétuelle du réseau d'hyphes et l'enfouissement des propagules en profondeur par le labour (Oehl *et al*, 2005), il influence ainsi le niveau de colonisation des racines par les MA et crée un changement dans la structure des communautés de champignons MA (Jansa *et al*, 2003), qui se traduit généralement par une perte globale de diversité, du moins dans l'horizon labouré (Jasper *et al*, 1991).

La fertilisants chimiques augmente instantanément l'offre du sol en éléments biodisponibles pour les cultures, De très nombreuses études ont montré que dans ces conditions, le rôle de la symbiose mycorhizienne est fortement réduit voire supprimé. L'augmentation de la concentration en azote et en phosphore dans la solution du sol accroît la

synthèse protéique et la synthèse des composés phosphorylés par les plantes, ce qui entraîne une diminution de la teneur en sucres solubles dans les racines. Or, cette teneur détermine les possibilités de l'association et le taux de colonisation mycorhizienne (Le Tacon et al, 1999).

L'application des produits chimiques tels que les engrais et les pesticides a des effets néfastes sur les populations de CMA (Plenchette et Corpron, 1987 ; Menge, 1982; Trappe *et al*, 1984). Et La présence de métaux lourds a aussi des effets néfastes qui interfèrent sur la colonisation des CMA et la germination des spores de ces champignons au champ (Gildon et Tinker, 1981).

### **B. Germination des spores**

Mis à part le facteur dormance qui est une caractéristique du champignon mycorhizien, (Juge et *al*, 2002) d'autres facteurs externes tels que la présence d'exsudats racinaires et leur concentration en substances flavonoïdes (Gianinazzi-Pearson et al, 1989; St-Arnaud et al, 1996), les caractéristiques physico-chimiques et biologiques du sol (T°, pH, H°, lumière, CO<sub>2</sub>) et la présence de certaines bactéries peuvent influencer la germination des spores.

### **C. Inoculum fongique**

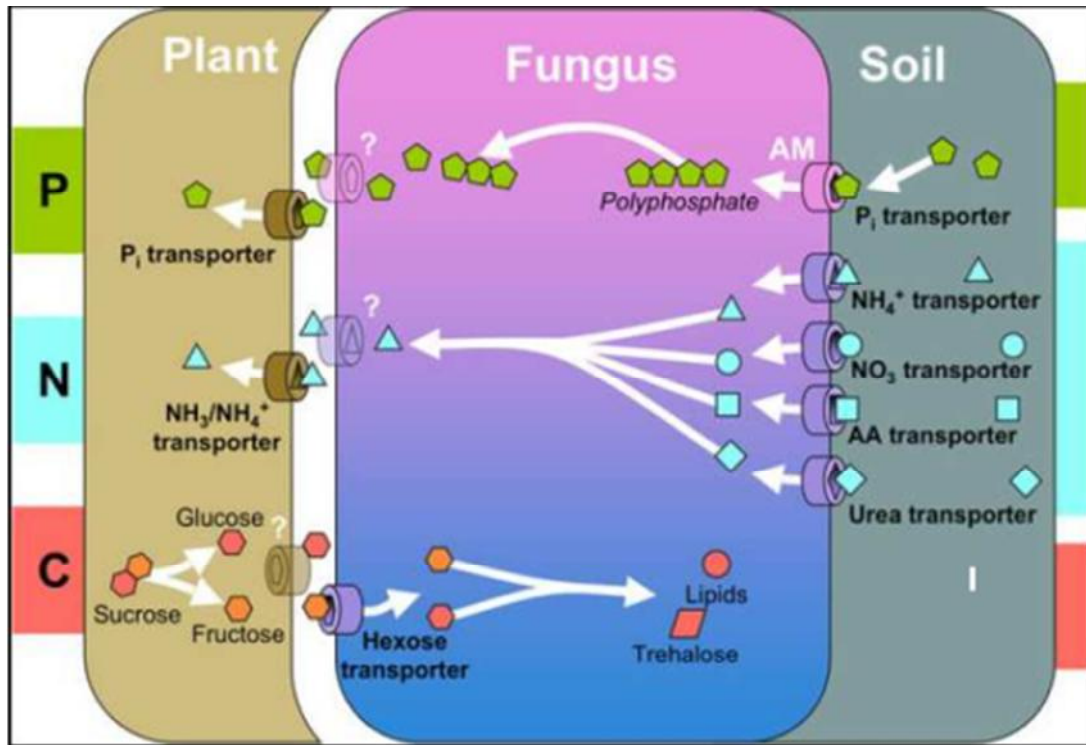
Il est influencé par certains facteurs agronomiques tels que le précédent cultural. Si c'est une culture mycophile comme le blé, elle peut augmenter le niveau de mycorhization de la culture suivante (Boswell et *al*, 1998). Les adventices peuvent être également des hôtes intermédiaires des champignons MA et favorisent ainsi leur développement (Kabir et Koide, 2000).

#### **4.3. Avantage d'une symbiose mycorhizienne à arbuscules**

Les CMA sont caractérisés par un transfert bi-directionnel de nutriments (Fig.17). Le CMA étant hétérotrophe ne sait pas fabriquer de glucides à partir de l'eau et du dioxyde de carbone. Donc les substances carbonées nécessaires à ses besoins énergétiques proviennent de la plante. Les CMA composés le carbone sous forme de CO<sub>2</sub> (Bécard et al, 1992), et de métabolites de type C3 et C4 à partir du partenaire photosynthétique.

Des études menées dans les années 1970 en utilisant le <sup>14</sup>CO<sub>2</sub> marqué ont montré qu'une partie du <sup>14</sup>C marqué passe des racines des plantes mycorhizées aux structures fongiques puis aux hyphes extraracinaires (Ho & Trappe, 1973 ; Bevege & Bowen, 1975; Hirrel Gerdemann, 1979). Le carbone alloué au partenaire fongique sous forme d'hexoses est utilisé dans la

croissance intra et extraracinaire du mycélium et dans la respiration. Ce transfert bidirectionnel implique donc des processus complexes au niveau de l'interface symbiotique. La localisation de ces transports, la nature des molécules transférées et les mécanismes de transfert ne sont pas encore complètement définis.

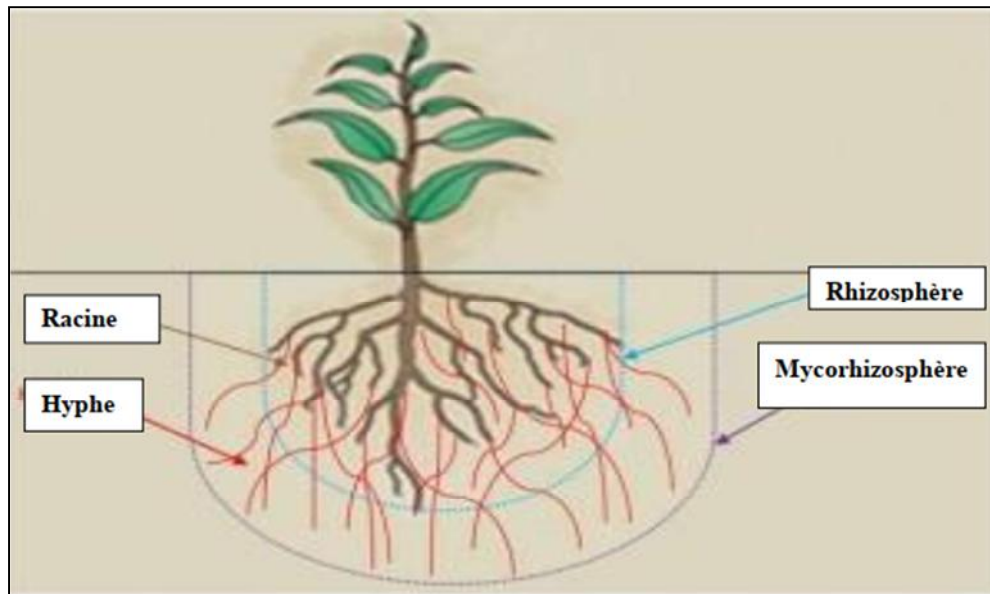


**Figure 17:** Schéma récapitulant les principaux processus d'échanges de nutriments dans l'ensemble des symbioses mycorhiziennes (Bonfante & Genre, 2010).

#### 4.3.1 Bénéfices pour la plante

##### A. Accroissement du volume de sol exploitable

Les possibilités d'échanges entre les racines d'une plante et le sol sont limitées au volume de sol accessible aux racines (Fig. 18). Ce volume correspond à la rhizosphère. Lorsque les racines sont prolongées par des hyphes fongiques, le volume de sol exploitable augmente, il y a création d'une mycorhizosphère qui amplifie de façon très significative la zone dans laquelle la plante peut extraire de l'eau et des éléments nutritifs et peut explorer des couches humides situées à grande profondeur (Lambers *et al.*, 2008).



**Figure 18** : le volume de sol influencé par les racines et les microorganismes associés et du volume de sol qui environne une racine colonisée par un champignon mycorhizien à arbuscules (Berutti *et al*, 2014).

### B. Amélioration de l'alimentation en eau et meilleure résistance au stress hydrique

Le mycélium peut extraire l'eau dans des interstices inaccessibles aux racines et acheminer l'eau sur de grandes distances grâce à la formation d'un réseau important. En effet les hyphes extra-racinaires sont dépourvus de cloisons transversales et ont très peu de cytoplasme, et ceci facilite le transport de l'eau vers les racines, tout en permettant une meilleure résistance des racines au dessèchement du sol car elles récupèrent plus rapidement leur turgescence après un apport d'eau (Vidal-Ribeil, 2015)

Cependant les mécanismes sont complexes car il y a beaucoup de comportements métaboliques différents. Cela conduit à une augmentation de la transpiration, de la conduction racinaire et une meilleure résistance au stress hydrique car la turgescence des feuilles est maintenue par un ajustement des pressions osmotiques des vacuoles (Vidal-Ribeil, 2015).

L'augmentation de la conduction s'explique par le fait que les hyphes ont une surface hydrophile, ainsi l'eau peut remonter le long de ceux-ci par capillarité (Garbaye, 2013) et lorsque qu'un réseau dense d'hyphes est mis en place, la conductivité du sol tout autour est augmentée.

**C. Production de messagers chimiques (hormones)**

La concentration des phytohormones comme la cytokinine, la gibbérelline, l'éthylène, l'acide abscissique, l'auxine et l'acide jasmonique peuvent varier dans la plante selon la présence ou non du champignon mycorhizien (Hausse *et al*, 2005), ces derniers jouent un rôle dans la transformation morphologique des racines. Les nouvelles ramifications sont proportionnelles aux quantités d'auxines que le champignon libère dans les tissus racinaires. Ces ramifications pourraient favoriser le transfert des sucres de la racine vers les champignons. L'action globale des hormones produites par le champignon mycorhizien affecte le port général de la plante à savoir la croissance des parties aériennes et souvent celle des racines (Fortin *et al*, 2008).

**D. Protection contre les organismes pathogènes**

Les CMA sont une composante majeure de la rhizosphère des plantes et peuvent influencer sur l'incidence et la gravité des maladies des racines (Linderman, 1992).

Les CMA influencent la qualité et l'abondance de la microflore au voisinage des racines et modifient l'activité microbienne de la rhizosphère globale. Ils provoquent des changements dans la structure de l'exsudation racinaire de l'hôte suite à la colonisation de l'hôte qui modifie l'équilibre microbien dans la mycorrhizosphère (Akhtar et Siddiqui, 2008).

La colonisation par les CMA induit une résistance ou une tolérance des plantes face à divers agents pathogènes (Trotta *et al*, 1996; Lingua *et al*, 2002; Harrier et Watson, 2004; Akhtar et Siddiqui, 2008), Ces modifications sont contrôlées par une variété de mécanismes, y compris la régulation à la hausse et à la baisse de gènes spécifiques (TahiriAlaoui et Antoniow, 1996), qui se traduisent par des réponses localisées et systémiques par la plante (Garg et Chandel, 2010). Ces réponses comprennent la synthèse de nouvelles isoformes de chitinases et les glucanases et l'épaississement des parois cellulaires (Azcon-Aguilar *et al*, 2002; Pozo *et al*, 2002).

**E. Amélioration de la croissance et de la nutrition des plantes**

Une meilleure compréhension des mécanismes impliqués dans la nutrition minérale des plantes mycorhizées est nécessaire pour une utilisation efficace des mycorhizes dans un but pratique (Fig.19). Les systèmes extensifs de mycélium (les parties végétatives du champignon) explorent efficacement des substrats de sol et acquièrent les nutriments du sol inorganiques, y compris la majeure partie de macro- nutriments N, P et K et certains micro-

nutriments, Cu, Fe et Zn. Ces éléments nutritifs dérivés du sol sont non seulement essentiels pour le développement des CMA, mais sont aussi en partie transférés à la plante hôte (Smith et Read, 1997).

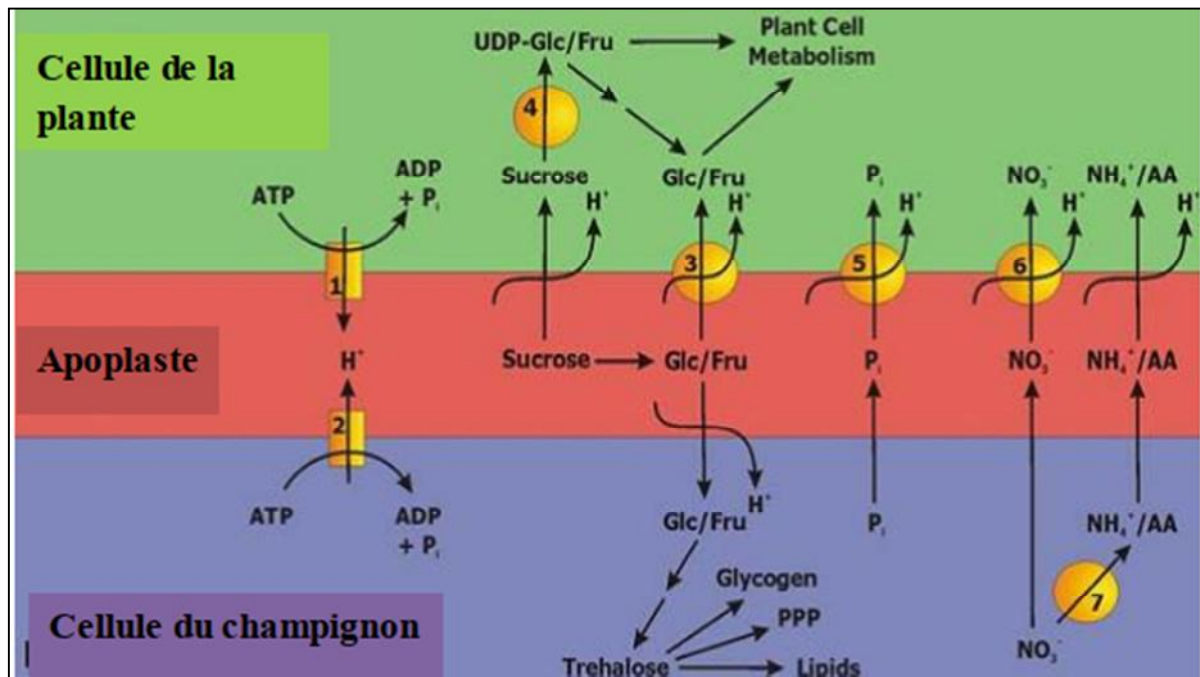


Figure 19 : Schéma récapitulant les mécanismes impliqués dans l'échange des principaux nutriments entre le CMA et sa plante hôte (Ramos et al, 2011)

➤ L'azote(N)

L'azote est un composant vital pour le CMA et la plante. Il entre dans la formation des phospholipides, des coenzymes et des acides aminés. L'azote est présent sous deux formes dans le sol : organique et minérale. Le CMA est capable de prélever l'azote sous toutes ces formes (Johansen et al, 1996)

➤ Phosphore (P)

Le P c'est un élément indispensable mais souvent en faible quantité dans le sol et peu mobile, faisant de lui un facteur limitant. L'absorption du phosphore par les plantes mycorhizées peut être 3 à 5 fois supérieure qu'en cas d'absence de mycorhizes (Vidal-Ribeil, 2015). La majeure partie du P est le plus souvent sous forme d'orthophosphate inorganique adsorbé aux autres constituants cationiques du sol pour former des complexes  $CaPO_4$  avec le calcium à pH élevé et des complexes  $FePO_4$  ou  $AlPO_4$  avec le fer (Fe) ou l'aluminium, à pH

faible, ainsi que sous forme de molécules organiques comme la lécithine (Sanyal et De Datta, 1991 ; revues de Javot et al, 2007a ; Richardson et al, 2009 ; Smith et Smith, 2012).

L'efficacité du champignon à acquérir le phosphore tient à sa capacité d'exploration du sol et à ses aptitudes métaboliques. En effet, l'élongation des hyphes extra-racinaires augmente la surface d'échange entre les minéraux du sol et la racine. Il est estimé que la longueur des hyphes fongiques peut atteindre 81 à 111 m par cm<sup>3</sup> de sol (Miller *et al*, 1995). Ils peuvent ainsi explorer des zones non accessibles pour les plantes afin d'y prélever les éléments minéraux et l'eau et les transférer à la plante hôte (Marulanda *et al*, 2003; Khalvati *et al*, 2005; Bolandnazar *et al*, 2007). D'autre part, le CMA possède des phosphatases alcalines qui vont cliver des substrats présents dans le sol et rendre le phosphate accessible (Gianinazzi-Pearson et Gianinazzi, 1978; Gianinazzi-Pearson *et al.*, 1979; Liu *et al.*, 2013). L'importation du P du sol est effectuée par des transporteurs fortement exprimés dans les hyphes extra racinaires (Harrison et van Buuren, 1995; Maldonado-Mendoza *et al*, 2001; Benedetto *et al.*, 2005).

Le phosphate est ensuite converti en polyphosphate (entre 3 et des milliers de molécules de phosphate) qui est transporté vers les hyphes intra-racinaires. Le polyphosphate est alors hydrolysé, afin d'être transporté dans la plante, via notamment des transporteurs spécifiques (Pumplin *et al*, 2012).

Il existe une corrélation négative entre la concentration de phosphate dans le sol et le niveau de colonisation mycorhizienne des racines de la plante. Le phosphore en excès agirait notamment en diminuant la formation des hyphopodes via un signal encore non identifié (Balzergue *et al*, 2011)

Lorsque le transporteur de phosphate végétal spécifique de la symbiose est muté la colonisation est fortement diminuée (Maeda *et al*, 2006; Javot *et al*, 2007). A l'inverse, quand le transport de carbone alloué au symbiote est diminué, le champignon va accumuler le phosphate (Hammer *et al*, 2011)

Donc le phosphore est un élément indispensable à la vie de la plante. Il favorise la croissance de la plante et influe notamment sur le nombre de feuilles et de tiges (Zafar Ullah, 2003). Il participe également au développement racinaire des plantes (Marschner, 1995). Au niveau cellulaire, ce composé entre dans la synthèse de nombreuses molécules telles que l'adénosine triphosphate (ATP) et les nucléotides (unité de base des acides

nucléique); des phospholipides membranaires; certaines enzymes et co-enzymes (Marschner, 1995; Gaude *et al.*, 2008; revue de Maathuis, 2009). Le phosphore est également stocké dans les vacuoles sous forme d'inositol-hexa-phosphate appelé aussi les acides phytiques (phytates) qui sont d'excellents chélateurs des cations tels que le  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  et  $\text{Zn}^{2+}$  (Mitsuhashi *et al.*, 2005)

➤ **Les oligo-éléments**

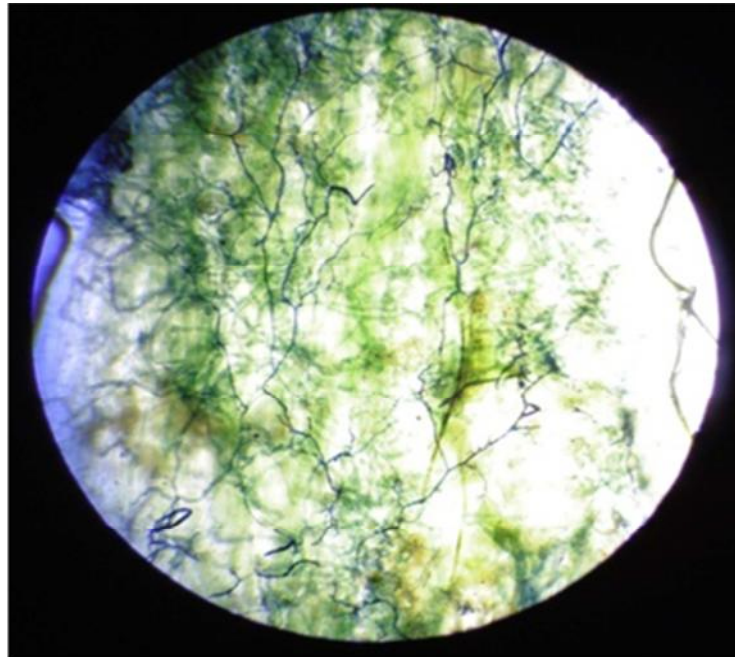
Les oligo-éléments sont impliqués dans de nombreuses activités enzymatiques intervenant notamment dans la photosynthèse, la respiration oxydative, la protection contre les radicaux libres ou encore la biosynthèse des lipides (Fraústro Da Silva et Williams, 2001). Le CMA permet une meilleure absorption des oligo-éléments peu mobiles dans les sols, tels que le Cu, le Zn, le Fe, le Mn et le Co (Harley et Smith, 1983 ; Graham et Syverten, 1989 ; Oihabi *et al.*, 1993 ; Meddich *et al.*, 2000).

### **5. Exploitation des CMA dans les cultures de blé**

Le phosphore formé dans les pousses et la masse sèche de plantes colonisées par les mycorhizes étaient plus nombreux que celles des plantes sans mycorhizes (Al-Amir et al. 2013). c'est la raison pour laquelle les mycorhizes sont utilisées comme engrais bio afin de diminuer l'utilisation des l'engrais chimiques, en particulier l'engrais phosphoré (Ortas, 2012),

Les mycorhizes vasculaires arbusculaires améliorent la prise d'azote par la plante mycorhizée par rapport à la plante non mycorhizée. (Lubna et al.2020) Car, l'azote (N) est un nutriment important qui rehausse la prise des éléments nutritifs dans des sols pauvres (Jin et al, 2005). Il est obtenu par les hyphes extraradicaux de champignons AM sous différentes formes tel que le  $\text{NH}_4^+$  (Tobar et al, 1994).

L'infection mycorhizienne de la racine de blé provoque également une augmentation de la teneur en protéines (Tobar et al, 1994).



**Figure 20** : Racine de blé colonisée avec hyphes colorés en bleu (Vidal-Ribeil, 2015).

### **5.1. Mycorhization du blé sous l'effet du semis direct**

La modification des conditions du sol sous l'effet du semis direct (KLADIVKO, 2001) induit à une stimulation de l'activité et de la biomasse des micro-organismes sur les premiers centimètres du sol (ROPER et GUPTA, 1995). Cette augmentation s'observe pour la population bactérienne comme pour la population fongique (WARDLE, 1995). De nombreuses études montrent que dans les systèmes de travail du sol de conservation, la biomasse microbienne présente une forte stratification verticale tandis qu'elle est répartie de façon homogène sur la profondeur de la couche de sol labourée (ANDRADE et al., 2003).

L'augmentation de la MO en surface grâce au semis direct favorise la biomasse et la diversité des micro-organismes dans la partie superficielle du sol. En effet, la zone 0-5 cm voit une augmentation significative des champignons mais aussi l'apparition de nouvelles espèces non présentes en labour. Ainsi ces champignons participent activement à l'agrégation des sols, ce qui a pour conséquence une meilleure stabilisation du sol.



***Conclusion***

Les techniques de l'agriculture, à travers ses principes du semis direct, la rotation des cultures et les résidus des récoltes, présente plusieurs intérêts, qui engendrent l'amélioration des performances économiques, environnementales des systèmes de production.

En effet l'intérêt d'intégrer la lentille dans la rotation du blé, se perçoit par sa capacité à lui fournir ses besoins azotés, à travers une fixation symbiotique de l'azote atmosphérique qui s'établit grâce aux bactéries rhizobium trouvés dans leurs nodules racinaires.

Le semis direct a également connu un important succès en agriculture de conservation, essentiellement dans l'évolution du potentiel productif des sols des régions semi arides. A travers l'amélioration des propriétés physiques, chimiques et biologiques de l'environnement racinaire du blé.

Plusieurs études ont montré que la perturbation du sol entraîne, la détérioration de la structure des sols, leurs appauvrissements en matière organique et en éléments nutritifs et plus précisément une réduction de la colonisation des CMA et des hyphes extra-racinaires des CMA qui produisent de la glomaline nécessaire à la stabilité de la structure physique du sol.

De ce fait, le semis direct est utilisé en agriculture de conservation afin de stimuler les fonctions écosystémiques du sol, car il favorise la colonisation mycorhizienne des racines du blé, qui assure l'apport en nutriment comme le phosphore formé dans les pousses et la masse sèche des céréales colonisées par ces mycorhizes.

## *Références Bibliographiques*

**Abdellaoui Z, 2011.** Etude comparative de l'effet du travail conventionnel, semis direct et travail minimum sur le comportement de blé dur. Rencontres Méditerranéennes du Semis Direct. Zaragoza. Série A.

**Abdellaoui Z., 2007.** Etude de L'effet de la Fertilisation Azotée sur les Propriétés Techno-Fonctionnelles des Protéines de Blé. *Thèse de Magister. Institut National Agronomique. EL-HARRACH. Département Sciences Alimentaire.*

**Abdellaoui, Z., Tissekrat, H., Belhadj A. & Zaghouane, O. 2010.** Etude comparative de l'effet du travail conventionnel, semis direct et travail minimum sur le comportement du blé dur. Actes du 4ème rencontre méditerranéen du semis direct. Sétif, Algérie, 68-82

**Aboudrare, A. 2009.** Agronomie durable : principes et pratiques. Rapport de formation continue au profit des ingénieurs et des techniciens de l'ORLVAO de l'Ouazazate et de l'association Migrations et Développement. Projet FAO/TCP/MOR/3201 (D) relatif au renforcement des capacités locales pour développer les produits de qualité de montagne – Cas du Safran. Avril 2009

**Aibar J., 2006.** La lutte contre les mauvaises herbes pour les céréales en semis direct : Principaux problèmes. *Options méditerranéennes*, Série A, Numéro 69.

**Aichouba A, Hennine F, 2018.** Activité antibactérienne d'extraits phénolique de *Lens culinaris* ; université Djilali Bounaama khemis Miliana, département biologie

**Ait S., et Ait K., 2008** Contribution à l'étude de l'interaction génotype x milieu, pour la qualité technologiques chez le blé dur en Algérie'', *Thèses de doctorat, département de biologie, Université BADJI mokhtar de Annaba.*

**Ait-Abdallah-Djennadi F., Dekkiche N., Ghalem-Djender Z., Oumdjekane K., 2010.** Cultures et couts de production des grandes cultures.

**Akhtar MS, Siddiqui ZA 2008** Arbuscular mycorrhizal fungi as potential bioprotectants against plant pathogens. *In: Siddiqui ZA, Akhtar MS et Futai K. (eds) Mycorrhizae: Sustainable agriculture and forestry. Springer Netherlands, pp: 61–97.*

**Akiyama K., Matsuzaki K, Hayashi H. 2005** Plant sesquiterpenes induce hyphal branching in arbuscular mycorrhizal fungi. *Nature*, 435: 824-827.

**Alhachemi M 2014** Effet De La Fertilisation Phosphatée Sur Quelques Paramètres Biométriques Et Biochimique Du Blé. *Mémoire D'ingénieur d'Etat. UKMO. OUARGLA. Département des Sciences Agronomiques.*

**Al-Kaisi M M., Yin X, 2005** Tillage and Crop Residue Effects on Soil Carbon and Carbon Dioxide Emission in Corn-Soybean Rotations. *Journal of Environmental Quality* 34. Pp 437- 445.

**Azcón-Aguilar C, Jaizme-Vega MC, Calvet C, 2002** Plant defense responses induced by arbuscular mycorrhizal fungi, *In: Gianinazzi S, Schuepp H, Barea JM (Eds), Mycorrhizal Technology in Agriculture, Birkhauser press, Basel, pp. 187–198.*

**Belaid Djiamal, 2016.** Livre la production de légume secs en Algérie ; Eddition 2016

**Balesdent J., Chenu C., et Balabane M., 2000** Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil and Tillage Research* 53. Pp 215-230

**Balzergue C, Puech-Pagès V, Bécard G, Rochange SF. 2011** The regulation of arbuscular mycorrhizal symbiosis by phosphate in pea involves early and systemic signalling events. *Journal of experimental botany* 62 : 1049–1060.

**Balzergue C., 2012.** Régulation de la symbiose endomycorhizienne par le phosphate. Thèse de Doctorat, Laboratoire de Recherche en Sciences Végétales, Université Paul Sabatier – Toulouse III, Toulouse, France. 345p.

**Baron G, 2016** Étude De L'impact de Différents Niveaux de Diversité Génétique Sur la Mycorhization du Blé Tendre. Université Angers. INRA. P 104.

**Bécard G., Doude D.D., Pfeffer P.E., 1992** Extensive invitro hyphal growth of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi in the presence of CO<sub>2</sub> and flavonols. *Appl. Environ. Microbiol*, 58 :821-825.

Bécard G., Kosuta S., Tamasloukht M., Séjalon-Delmas N., Roux C. 2004 Partner communication in the arbuscular mycorrhizal interaction. *Canadian Journal of Botany*. 82, 1186–1197

**Belaid Djiamal, 2016.** Livre la production de légume secs en Algérie ; Eddition 2016

**Belagrouz A., 2013** Analyse du Comportement du Blé Tendre, Variété El WIFAK (*Triticum aestivum L.*) Conduite en Labour Conventionnel, Travail Minimum et Semis Direct sur Les Hautes Plaines Sétifiennes. *Thèse magister. UFAS. Sétif. Département des Sciences Agronomiques.*

**Benabdallah M., 2016** Les caractères et les effets d'une fertilisation biologique par le grignon d'olive sur le rendement des cultures des céréales. *Université De Tlemcen. Département Agronomie.*

**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 z. 2018** Etude de l'effet des phytohormones sur la croissance du blé dur (*Triticum durum Desf.*) var.Kebir cultivée dans des conditions salines. *Thèse de doctorat. Université des Frères Mentouri Constantine1. Département de Biologie et Ecologie Végétale.*

**Besserer A, Puech-pages V, Kiefer P, Gomez-Roldan V, Jauneau A, Roy S, Portais J.C, Roux C, Becard G, Sejalon-Delmas N, 2006** Strigolactones stimulate arbuscular mycorrhizal fungi by activating mitochondria. *PLoS Biology*, 4: e226

**Bevege D.I. Bowen G.D. 1975** Endogone strain and host plant difference in development of vesicular-arbuscular mycorrhizas. In: Endomycorrhizas (Ed. by F. E. Sanders, B. Mosse & P. B. Tinker), Academic Press, New York and London. 149-174 pp

**Blaszkowskiet J, 2003** Arbuscular mycorrhizal fungi (Glomeromycota), Endogone and Complexipes species deposited in the Department of plant pathology, University of Agriculture in Szczecin, Poland,230 p.

**Bolandnazar S, Aliasgarzad N, Neishabury MR, Chaparzadeh N. 2007** Mycorrhizal colonization improves onion (*Allium cepa L.*) yield and water use efficiency under water deficit condition. *Scientia Horticulturae* 114: 11-15.

**Bonfante P., Genre A. 2010** Mechanisms underlying beneficial plant–fungus interactions in mycorrhizal symbiosis. *Nature Communications*. 1, 48.

**Bonfante p, Bianciotto v, 1995** presymbiotic versus symbiotic phase in arbuscular endomycorrhizal fungi : morphology and cytology. In :varma, A.,Hock, B(Eds),Mycorrhiza. Springer,Berlin, pp :229-247.

**Boswell .E.P, R.T. Koide, D.L. Shumway and H.D. Addy., 1998.** Winter wheat cover cropping, VA mycorrhizal fungi and maize growth and yield. *Agriculture Ecosystem and Environnement* 67: 55-65

**Boulal, H. Zaghouane, O., El-mourid, M. & Rezgui, S.2007.** Guide pratique de la conduite des céréales d'automne (blé et orge) dans le Maghreb (Algérie, Maroc et Tunisie). Edition *ITGC, INRA, ICARDA*, 176 p

**Bouzerzour H., Mahnane S. et Makhlouf M., 2006.** Une association pour une agriculture de conservation sur les hautes plaines orientales semi-arides d'Algérie

**Brighen H., Chaour A., 2016** Etude comparative des différents contaminants fongiques de quelques cultures du blé dur (*Triticum Durum*) et blé tendre (*Triticum aestivum*) de la région de Constantine. *Thèse Master. UFMC. Constantine. Département Microbiologie.*

**Brundrett M, 2004** Diversity and classification of mycorrhizal associations. *Biological Reviews*, 79(3), 473–495.

**Brundrett M, Bougher N, Dell B, Grove T, malajczuk N, 1996** Working with mycorrhizas in Forestry and Agriculture. Australian Centre for Internatioal Agricultural Research, Canberra.

**Brundrett MC (1999).** Mycorrhizal associations of Australian plants.

**Brundrett MC (1991)** Mycorrhizas in natural ecosystems. *Adv Ecol Res* 21: 171–213.

**CHABANE I, 2014.**Elaboration d'un système d'information sur l'Agriculture de conservation dans la wilaya de Sétif. Université Ferhat Abbas Sétif 1 faculté des sciences de la nature et de vie.

**Clerget Y., 2011** La biodiversité des céréales et leur utilisation par l'homme.

**Cubero, J. I. (1981).** Origin, taxonomy and domestication. Lentils. Slough, CAB, 15-38.

**Cure B., 1991** Simplification du travail du sol et évolution du parasitisme. Dans. *Perspectives agricoles*, 161. Pp 47-53

**Dalpe Y, Cranenbrouck S, Seguin S, Declerck S, 2005b** The Monoxenic culture of Arbuscular Mycorrhizal Fungi as a Tool for Systematics and Biodiversity. In : *In Vitro Culture of Mycorrhizas* eds : Declerck S, Strullu D-G, Fortin A, *Soil Biol*, 4 :31\_48.

**Dalpé Y, 2001** In vitro monoxenic culture of arbuscular mycorrhizal fungi : a major tool for taxonomical studies. In : Proc 3rd Natl. Symp. Mycorrhizal Symbioses, Guanajuato, Mexico, pp :325

**Denison RF, Kiers ET., 2011.** Life histories of symbiotic rhizobia and mycorrhizal fungi. *Current Biology*.vol 21(18), 775-785.

**Djelti H., 2014.** Etude de La Qualité du Blé Tendre Utilise en Meunière Algérienne. *Mémoire d'ingénieur d'état. UABB Tlemcen. Département Des Sciences De L'Agronomie Et Des Forêts.*

**DJERMOUN A, 2009** La production céréalière en Algérie : les principales caractéristiques. Université de Hassiba Benbouali de Chlef Revue Nature et Technologie. Pages 45 à 53.

**Dodd J. C, 2000** The role of arbuscular mycorrhizal fungi in agro and natural ecosystems. *Agricul* 29(1) :63-70.

**Duranti M, (2006).** Grain legume proteins and nutraceutical properties, *fitoterapia*.77(2006) 67-82.

**FAO. 2006.** Deuxième rapport national sur l'état des ressources phytogénétiques, INRAA. FAO (Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture).

**FAO, 2015.** Les principes de l'agriculture de conservation. FAO.

**FAO. (2016).**“Légumineuses Des graines nutritives pour un avenir durable“.13-22,36-37, 51-52

**Feillet P. 2000.** Le grain de blé : composition et utilisation. *INRA*. Paris.

**Feillet, P. (2000).** Le grain de blé : composition et utilisation. *INRA*. Paris. Feldman.

**Fortin J.A, Plenchette C, Piche Y. 2008** Les Mycorhizes : La Nouvelle, Révolution Verte. Ed. Multimondes. Ed. Quae. 131p.

**Founoune, H. (2001).** La symbiose ectomycorhizienne des acacias australiens en Afrique de l'Ouest : impact sur le développement de la plante hôte et sur le biofonctionnement du sol. Thèse de l'Université Moulay Ismaïl, Faculté des Sciences, Meknes, 186 p.

**Garbaye J. (2013).** La symbiose mycorhizienne, une association entre les plantes et les champignons. Paris. Edition Quae. P : 1-219.

**Garg N, Chandel S 2010** Arbuscular mycorrhizal networks: process and functions. A review *Agron. Sustain. Dev.* 30: 581–599.

**Gates., 1995** Ecophysiologie du blé Paris, 351p. Technique et documentation. Lavoisier, In : Etude de la contribution des paramètres phéno morphologique dans l'adaptation du blé tendre dans l'étage bioclimatique semi aride. *Mémoire de Magister. Fac. Sci. Agro/ Université El-hadj Lakhdar Batna.*

**Genre A, Chabaud M, Faccio A, Barker DG, Bonfante P, 2008** Prepenetration apparatus assembly precedes and predicts the colonization patterns of arbuscular mycorrhizal fungi within the root cortex of both *Medicago truncatula* and *Daucus carota* *The Plant cell* 20 : 1407\_20.

**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.

**Gianinazzi S, Gianinazzi-Pearson V, Trouvelot A. 1989** Potentialities and procedures for the use of endomycorrhizas with special emphasis on high value crops. *Biotechnology of fungi for improving plant growth*, (16), 41

**Gianinazzi Pearson, V., 1989** In vitro enhancement of spore germination and early hyphal growth of a vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus by host root exudates and plant flavonoids. *Symbiosis (Rehovot)*. 7:243-250.

**Gianinazzi S, Gianinazzi-Pearson V, Dexheimer J. 1979.** Enzymatic Studies on the Metabolism of Vesicular Arbuscular Mycorrhiza. Iii. Ultrastructural Localization of Acid and Alkaline Phosphatase in Onion Roots Infected By *Glomus Mosseae* (Nicol. & Gerd.). *New Phytologist* 82: 127–132.

**Gianinazzi-Pearson V, Gianinazzi S. 1978.** Enzymatic studies on the metabolism of vesicular-arbuscular mycorrhiza. Soluble alkaline phosphatase specific to mycorrhizal infection in onion roots. *Physiological Plant Pathology* 12: 45–53.

**Gildon, A., and Tinker, P. B. (1981).** A heavy metal tolerant strain of mycorrhizal fungus. *Trans. Br. Mycol. Soc.*, 77 : 648-649.

**Giovannetti M, Sbrana C, Avio L, Citernesi A S, Logi C. 1993** Differential hyphal morphogenesis in arbuscular mycorrhizal fungi during pre-infection stages. *The New Phytologist*, 125: 587-593.

**Gouasmi R., Badaoui N., 2017** Etude biochimique de l'influence du séchage sur la valeur nutritionnelle de deux variétés de blé dur Algériennes (Bousseleme et Siméto). *Thèse Master. UDB. Khemis Miliana. Département de Technologie.*

**Gordon B.(2002).** "Proteines végétales" .Ed.Tech et Doc., Lavoisier, Paris, 150-200

**Greenway, H. et Munns, R. (1980).** Mechanism of salt tolerance in non halophytes. *Annu. Rev. Plant Physiol.*, 31 : 149-190

**Guisso T 2001** La symbiose' mycorhizienne à arbuscules chez des espèces ligneuses: diversité des -Glomales, dépendance. mycorhizienne-, utilisation des phosphates naturels et tolérance à un stress hydrique. *Thèse de Doctorat. Université D'Ouagadougou. Burkinafaso.*

**Hacini N. 2014** Etude de l'interaction Génotype X Environnement et effet de l'origine de quelques cultivars de blé dur (*Triticum durum* Desf.) sur les aptitudes adaptatives et qualitatives. *Thèse de doctorat. UBMA. ANNABA. Département de Biologie.*

**Hamadache A., 2013.** Eléments de Phytotechnie Générale-Grandes Cultures– Tome 1 Le blé : 256 p.

**Hamadache A., et Abdellaoui Z., 1999** Effet du précédent cultural en relation avec la fertilisation azotée et le désherbage chimique sur la productivité du blé dur pluvial en zone subhumide. Dans. Premier symposium international sur la filière blé, Alger, 7-9 Février 1999.

**Hammer EC, Nasr H, Pallon J, Olsson PA, Wallander H. 2011.** Elemental composition of arbuscular mycorrhizal fungi at high salinity. *Mycorrhiza* 21: 117–129

**Harley et Smith, 1983.** Mycorrhizal Symbioses. Academic Press, Londres, 483 p.

**Harley JL, Harley EL (1987)** A check-list of mycorrhiza in the British flora. *New Phytologist* Supplement 2: 1–102.

**Harrier LA, Watson CA, 2004** The potential role of arbuscular mycorrhizal (AM) fungi in the bioprotection of plants against soil-borne pathogens in organic and/or other sustainable farming systems. *Pest Manag. Sci* 60: 149–157

**Harrison MJ, Van Buuren ML. 1995.** A phosphate transporter from the mycorrhizal fungus *Glomus versiforme*. *Nature* 378: 626–629.

**Hausse B., Fester T. 2005** Molecular and cell biology of arbuscular, mycorrhizal symbiosis. *Planta*, 221: 184-196.

**Hazmoune T, 2000** « Erosion des variétés de blé dur cultivées en Algérie. Perspectives », *Option Méditerranéennes*, pp: 291-294.

**Hibbett, D.S., Binder, M., Bischoff, J.F., Blackwell, M., Cannon, P.F., Eriksson, O.E., Huhndorf, S., James, T., Kirk, P.M., Lucking, R., Thorsten Lumbsch, H., Lutzoni, F., Matheny, P.B., McLaughlin, D.J., Powell, M.J., Redhead, S., Schoch, C.L., Spatafora, J.W., Stalpers, J.A., Vilgalys, R., Aime, M.C., Aptroot, A., Bauer, R., Begerow, D., Benny, G.L., Castlebury, L.A., Crous, P.W., Dai, Y.C., Gams, W., Geiser, D.M., Griffith, G.W., Gueidan, C., Hawksworth, D.L., Hestmark, G., Hosaka, K., Humber, R.A., Hyde, K.D., Ironside, J.E., Koljalg, U., Kurtzman, C.P., Larsson, K.H., Lichtwardt, R., Longcore, J., Miadlikowska, J., Miller, A., Moncalvo, J.M., Mozley Standridge, S., Oberwinkler, F., Parmasto, E., Reeb, V., Rogers, J.D., Roux, C., Ryvarden, L., Sampaio, J.P., Schussler, A., Sugiyama, J., Thorn, R.G., Tibell, L., Untereiner, W.A., Walker, C., Wang, Z., Weir, A., Weiss, M., White, M.M., Winka, K., Yao, Y.J. and Zhang, N. (2007)** A higher-level phylogenetic classification of the Fungi. *Mycological Research*, 111 (5): 509-547

**Hijri M., Sycorova Z., Oehl F., Ineichen K., Mader P., Wiemken A., Redecker D., 2006.** Communities of arbuscular mycorrhizal fungi in arable soils are not necessarily low in diversity. *Mol. Ecol.* 15 : 2277-2289.

**Hirrel M C, Gerdemann J W. 1979** Enhanced carbon transfer between onions infected with a vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus. *New Phytologist.* 83, 731–738.

**Ho I, Trappe J M. 1973** Translocation of <sup>14</sup>C from Festuca Plants to their Endomycorrhizal Fungi. *Nature*, 244, 30–31.

**Honrubia M. 2009** Las micorrizas: una relación planta-hongo que dura más de 400 millones de años. *Anales del Jardín Botánico de Madrid.* 66S1: 133-144.

- Jansa, J., A. Mozafar, G. Kuhn, T. Anken, R. Ruh., I. Sanders and E. Frossard, 2003.** Soil tillage affects the community structure of mycorrhizal fungi in maize roots. *Ecology Application* 13:1164-1176.
- Jasper D. A., L. K. Abboth and A. D. Robinson. 1991** The effect of soil disturbance on vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi in soil different vegetation types. *New Phytol.* 118 : 471 – 482.
- Javot H., Penmetsa R., Terzaghi N., Cook D., Harrison M., 2007.** A *Medicago truncatula* phosphate transporter indispensable for the arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 104: 1720-1725.
- Juge, C., J. Samson, C. Bastien, H. Vierheilig, A. Coughlan, and Y. Piche. 2002.** Breaking dormancy of spores of the arbuscularmycorrhizal fungus *Glomus irregulare*: a critical coldstorage period. *Mycorrhiza.* 12:37-42.
- Kabir Z. and R.T. Koide, 2000** The effects of dandelion or a cover crop on mycorrhizal inoculum potential, soil aggregation and yield of maize. *Agriculture, Ecosystem and Environment* 78:167-174
- Kadir N., 2015** Effet du cuivre sur des bactéries rhizosphériques du blé dur. *Mémoire de magister, département sciences biologiques, université des sciences et de la technologie HOUARI Boumediene.*
- Kalarasse A. 2018** Effet des altérations de la semence sur le développement de la culture et la qualité du rendement chez le blé. *Thèse Master. Université 8 Mai 1945 Guelma. Département Écologie et Génie de l'Environnement (EGE).*
- Karakas, A. (2011).** Motivational Attitudes of ELT Students towards Using Computers for Writing and Communication. *The Journal of Teaching English with Technology*, 11(3), 37-53.
- 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.
- Kherch medjden H., Bouchafaa B., 2010** La Politique Céréalière en Algérie.
- Kladivko E.J., 2001** Tillage systems and soil ecology. *Soil et Tillage Research* 61. Pp 61-76.

**Koske RE, Gemma JN, Flynn T (1992).** Mycorrhizae in Hawaiian angiosperms: a survey with implications for the origin of the native flora. *American J. of Botany* 79: 853–862

**Kosuta S, Chabaud M, Lougnon G, Gough C, Denarie J, Barker D G, Becard, G. 2003** A diffusible factor from arbuscular fungi induces symbiosisspecific MtENOD11 expression in roots of *Medicago truncatula*. *Plant Physiology*, 131: 952-962.

**Lambert DH, Cole HJ, Baker DE, 1980** Adaptation of vesicular-arbuscular mycorrhizae to edaphic factors. *New Phytologist* 85: 513-520.

**Latreche F., 2011** Le rendement et l'efficience d'utilisation de l'eau de la culture de blé dur (*Triticum durum* Desf.) sous les effets du précédent cultural et de l'outil de labour du sol en environnement semi-aride. *Thèse magister. UFAS Sétif. Département des Sciences Agronomique*

**Laurent, Guillaume Leturcq, Ivo Mello, Jeannine Corbonnois, Roberto Verdum,** Revue franco-brésilienne de géographie- journals.openedition.org, 2011

**Le Tacon, F. (1985).** Les mycorrhizes : une coopération entre plantes et ' champignons. *La Recherche*, 166: 624–632

**Linderman RG, 1992** VA mycorrhizae and soil microbial interactions. *In: Mycorrhizae in Sustainable Agriculture*, eds, Bethelenfalvay, G. J, and Linderman, R. G, ASA Special Publication No. 54, Madison, WI, pp: 45–70

**Lingua G, D'Agostino G, Massa N, Antosiano M, Berta G, 2002** Mycorrhiza-induced differential response to a yellows disease in tomato. *Mycorrhiza* 12; 191–198.

**Liu G, Hu X, Sun B, Yang T, Shi J, Zhang L, Zhao Y. 2013.** Phosphatase Wip1 negatively regulates neutrophil development through MAPK-STAT1. *Blood* 121: 519–529.

**Lubna Ahmed Abdulkarim1, Bahar Jalal Mahmood2, Azad Ahmad Abdullah 2020** Succession Effect of Wheat Cultivation After Some Crops on Mycorrhizal Infection, Yield, and Quality of Wheat. *ZANCO Journal of Pure and Applied Sciences* The official scientific journal of Salahaddin University-Erbil.

**MADR, 2006** Données statistiques du Ministère de l'agriculture. Bureau des statistiques.

**MADR, 2018** Données statistiques du Ministère de l'agriculture.

**Mahouachi, J, Socorro AR., Talon M, 2006** Responses of papaya seedlings (*Caricapapaya* L.) to water stress and re-hydration: growth, photosynthesis and mineral nutrient imbalance. *Plant and Soil*. 281, 137–146.

**Maldonado-Mendoza IE, Dewbre GR, Harrison MJ, Samuel T, Noble R, Parkway SN. 2001.** A phosphate transporter gene from the extra-radical mycelium of an arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus irregularis* regulated in response to phosphate in the environment. *Molecular Plant-Microbe Interactions* 14: 1140–1148.

**Mald M. et Redjel N, 2000** «Produire du blé dur et /ou conserver l'écosystème Standardisation des politiques. Comportement des agriculteurs et dégradation de l'écosystème », Symposium Blé: Enjeux et stratégies. Alger 7-9 février, 2000, pp: 39-47

**Marulanda A, Azcón R, Ruiz-Lozano JM. 2003** Contribution of six arbuscular mycorrhizal fungal isolates to water uptake by *Lactuca sativa* plants under drought stress. *Physiologia Plantarum* 119: 526–533.

**McCarty G. W., Lyssenko N.N., et Starr J.L., 1998** Short-term changes in soil carbon and nitrogen pools during tillage management transition. *Soil Science Society of America Journal*, 62, 15641571

**Mekaoussi R., 2015** Etude de comportement variétal du blé dur (*Triticum durum* Desf.) vis-à-vis de *Rhopalosiphum maidis* (Homoptera : Aphididae) dans la région de Batna en vue de l'amélioration de la plante. *Thèse magister.UBI.BATNA. Institut des Sciences Vétérinaires et des Sciences Agronomiques.*

**Menasria H, 2012.**Effet du semis direct et l'association de la luzerne annuelle sur le comportement de blé dur (*Triticum durum*) dans une région semi-aride. Université Mohamed kheidar Biskra. Département agronomie.

**Menge, J.A. (1982).** Effect of soil fumigant and fungicides on vesicular-arbuscular fungi. *Phytopathology*, 72 : 125-1182.

**Mesrane D., 2018** L'évolution de la production de blé dur (*Triticum durum*) dans la Daïra de Bouira et El Hachimia. *Thèse Master. UAMO Bouira. Département des Sciences Agronomiques .*

**Mikola, P. (1988).** Ectendomycorrhiza of conifers. *Silva Fenn* 22:19–27.

**Miller RM, Reinhardt DR, Jastrow JD. 1995** External hyphal production of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi in pasture and tallgrass prairie communities. *Oecologia* 103:17-23.

**Morsli L., 2010** Adaptation du blé dur (*Triticum durum* Desf) dans les conditions des hautes plaines constantinoises. *Thèses de doctorat. Université BADJI mokhtar d'Annaba .Département de Biologie.*

**Mosse, B. 1956** Fructifications of an Endogone species causing endotrophic mycorrhiza in fruit plants. *Annals of Botany*, 20(2), 349-362.

**Moule C., 1971** Céréales 2. Phytotechnie spéciale. (Ed). La maison rustique, Paris, m236p.

**Mrabet R., 2001a.** Le Semis Direct: Une technologie avancée pour une Agriculture durable au Maroc. Bulletin de Transfert de Technologie en Agriculture MADREF-DERD

**Mrabet, R. 2001.** No-Tillage System: Research Findings, Needed Developments and Future Challenges for Moroccan Dryland Agriculture. In: proceedings of International Congress on Conservation Agriculture. Garcia-Torres *et al.* (Eds). Madrid, Spain. October 1-5, 2001.

**Nadjem K., (2012).** Contribution a l'étude des effets du semis direct sur L'efficience d'utilisation de l'eau et le comportement variétal de la culture de blé en région semi-aride. *Thèse Magister. Université Ferhat Abbas Sétif.*

**Nedjah I., 2015** Changements physiologiques chez des plantes (Blé dur *Triticum durum* Desf.) exposées à une pollution par un métal lourd (plomb). *Thèse de doctorat. UBMA. ANNABA. Département de Biologie.*

**Oehl F, Souza FA, Sieverding E. 2008.** Revision of Scutellospora and description of five new genera and three new families in the arbuscular mycorrhiza forming Glomeromycetes. *Mycotaxon* 106: 311–360

**Oehl, F., Sieverding, E., Ineichen, K., Ris, E. A., Boller, T. and Wiemken, A. (2005).** Communitystructure of arbuscular mycorrhizal fungi at different soil depths in extensively and intensively managed agroecosystems. *New phytologist*, vol. 165, p. 273-283.

**Peigné J., Ball B.C., Roger-Estrade J., et David C., 2007** Is conservation tillage suitable for organic farming ? A review. *Soil Use and Management* 23. Pp 129-144

**Peterson R.L, Howarth M.J, Whittier D.P, 1981** Interactions between a fungal Endophyte and gametophyte cells in *Psilotumnudum*. *Canadian Journal of Botany* 59; 711-720

**Petterson, L.R. et Massicotte, H.B (2004)** *Exploring structural definitions of mycorrhizas, with emphasis on nutrient-exchange interfaces*. *Canadian Journal of Botany*, 82: 1074–1088.

**Plenchette, C., and Corpron, I. (1987).** Influence of PK fertilisation on VA mycorrhizal fungi population. In : *Mycorrhizae in the next decade*, Sylvia D.M., Hung L.L., Graham J.H. eds. University of Florida, Gainsville, USA, 35.

**Pocock K., Duckett J.G. 1984** A comparative ultrastructural analysis of the fungal endophytes in *Cryptothallus mirabilis* Hulm. and other British thalloid hepatics. *Journal of Bryology* 13, 227–233.

**Pozo MJ, Slezack-Deschaumes S, Dumas-Gaudot E, Gianinazzi S, Azcón-Aguilar C 2002** Plant defense responses induced by arbuscular mycorrhizal fungi, In: Gianinazzi S, Schuepp H, Barea JM (Eds), *Mycorrhizal Technology in Agriculture*, Birkhauser, Basel, pp: 103–112

**Pumplin N, Zhang X, Noar R, Harrison M. 2012** Polar localization of a symbiosis-specific phosphate transporter is mediated by a transient reorientation of secretion. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 109: 665–672.

**Redhead J F, 1980).** Mycorrhiza in natural tropical forest. In: *Tropical Mycorrhiza Research*, Mikola P. (ed.), Clarendon press, Oxford, pp. 127-142.

**Richardson AE, Hocking PJ, SimpsonRJ, George TS 2009** Plant mechanisms to optimise access to soil phosphorus. *Crop & Pasture Science* 60, 124-143.

**Saskatchewan Pulse Grower. 2016.** Inoculation and fertility

**Schneider, A et Huyghe, C. (2015).** “Les légumineuses pour des systèmes agricoles et alimentaires durables“. Edition Quae,21-23,31

**Sadouki M., Boutouchent Y., 2018** Etude de la variabilité morpho physiologique du blé dur (*Triticum durum* Desf) dans les conditions climatique du Haut Chélif. . *Thèse Master. UDB. Khemis-Miliana. Département de Biologie.*

**Sanyal SK, De Datta SK, 1991** Chemistry of phosphorus transformations in soil. *Advances in Soil Science* 16, 1-120.

**Saskatchewan Pulse Grower. 2016.** Inoculation and fertility

**Schneider, A et Huyghe, C. (2015).** “Les légumineuses pour des systèmes agricoles et alimentaires durables“. Edition Quae,21-23,31

**Schwarzott, D. and A. Schüßler, 2001.** A simple and reliable method for SSU rRNA gene DNA extraction, amplification and cloning AM fungal spores. *Mycorrhiza* 10: 203-207

**Selosse, A., and Le Tacon, F. (1997).** Des mycorhizes à l’origine de la flore terrestre. *J. Bot. Soc. bot. Fr.*, 3 : 21-25

**Simon, L., Bousquet, J., Levesque R.C., and Lafonde M, 1993** Origin and diversification of endomycorrhizal fungi and coincidence with vascular land plants. *Nature*, 363 : 67-69

**Siouda A. Benkhelifa Z, 2016** Etude éco physiologique des quelques écotypes de blé dur (*Triticum durum Desf.*) dans la région semi-aride de Sétif. *Thèse Master. UBBA. Bordj Bou Arreridj. Département des Sciences Biologiques.*

**Slama A., Ben Salem M., Ben Naceur M., Zid E.D. (2005)** Les céréales en Tunisie : production, effet de la sécheresse et mécanismes de résistance. Institut national de la recherche agronomique de Tunisie (INRAT).

**Smith S E, Smith F A, 2012** Fresh perspectives on the roles of arbuscular mycorrhizal fungi in plant nutrition and growth *Mycologia* 104 :1-13.

**Smith S. E, Read D J. 2008** Mycorrhizal symbiosis (3rd ed, p.815). Clarendon Press, Oxford.

**Smith S.E, Read D.J, 1997** Mycorrhizal symbiosis. 2nd ed. Academic Press, San Diego, Calif. USA

**Soualmia B. 2014** Etude comparative de l’effet de trois types d’engrais (weatstart, weatgrow, et weatgeen) sur le rendement de la culture de blé dur *Triticum durum Desf* (Var simeto) dans la région de Guelma. *Thèse Master. Université 08 Mai 45 Guelma. Département d’Ecologie et Génie de l’environnement.*

- St-Arnaud M., C. Hamel B. Vimard M. Caron, and J.A. Fortin. 1996** Enhanced hyphal growth and spore production of the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus irregulare* in an in vitro system in the absence of host roots. *Mycological Research*. 100:328-332.
- Tahiri-Alaoui A, Antoniw JF 1996** Cloning of genes associated with the colonisation of tomato roots by the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus mosseae*. *Agronomie* 16: 699–707.
- Tamasloukht M., Sejalon-Delmas N., Kluever A., Jauneau A., Roux C., Becard G., Franken P. 2003** Root factors induce mitochondrial-related gene expression and fungal respiration during the developmental switch from asymbiosis to presymbiosis in the arbuscular mycorrhizal fungus *Gigaspora rosea*. *Plant Physiology*, 131: 1468-1478.
- Tamasloukht M., Waschke A., Franken, P. 2007** Root exudate-stimulated RNA accumulation in the arbuscular mycorrhizal fungus *Gigaspora rosea*. *Soil Biology & Biochemistry*, 39: 1824-1827
- Trappe, J.M., Molina, R. and Castellano M. 1984** Reactions of mycorrhizal fungi and mycorrhiza formation to pesticides. *Annu. Rev. Phytopathol.*, 22 : 331–359.
- Trotta A, Varese G.C, Gnani E, Fusconi A, Sampo S, Berta G 1996** Interactions between the soilborne root pathogen *Phytophthora nicotianae* var. *parasitica* and the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus mosseae* in tomato plants. *Plant Soil* 185: 199–209.
- Vidal-Ribeil V 2015** Étude de la mycorrhization de variétés populations de blé en culture pure et en association avec une légumineuse. *INRA. Du Rheu unité SAD Paysage*.
- Weidmann, S., Sanchez, L., Descombin, J., Chatagnier, O., Gianinazzi, S., Gianinazzi-Pearson, V. 2004** Fungal elicitation of signal transduction-related plant genes precedes mycorrhiza establishment and requires the *dmi3* gene in *Medicago truncatula*. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 17: 1385-1393.
- Wright A.L., Hons F.M., Lemon R.G., McFarland M.L., et Nichols R.L., 2007** Stratification of nutrients in soil for different tillage regimes and cotton rotations. *Soil and Tillage Research* 96. Pp 19-27.
- Yadav, S. S., McNeil, D., & Stevenson, P. C. (Eds.). (2007).** Lentil: An ancient crop for modern times. Springer Science & Business Media.

**Zaghouane O., Bouzerzour H., Houassine D., Makhlouf M., Abdellaoui Z. et Ameroun R., 2011.** La situation du programme de développement de l'agriculture de conservation en Algérie (2004-2011). *Céréaliculture*.

**Zaghouane O., 2009.** Elaboration d'un système d'information sur l'agriculture de conservation dans la wilaya de Sétif, Mémoire de magistère : université de Sétif.

**ZOULIM S. 2017** Etude de la réponse de deux variétés de blé dur (*Triticum turgidum*) soumises à un stress salin en présence d'un inoculum mycorhizien. *Thèse Master. UMMTO TIZI-OUZOU. Département des Sciences Agronomiques.*