

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud MAMMARI Tizi-Ouzou
Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques
Département des Sciences Agronomiques



Mémoire de Fin d'Etude



En vue de l'obtention d'un Diplôme de Master

En science agronomique

Option : production végétale

Thème

Etude Bibliographique sur les Symbioses chez
Triticum durum L. Conduit en Agriculture de
Conservation sous Climat semi-aride

Présenté par :

M^{elle} HAMDIS Amal

M^{elle} KACI Yasmine

Devant le jury :

Président : M^{me} OMARI. O

Maître Assistante classe A

Promotrice : M^{me} BOUDIAF NAIT KACI. M

Maître de conférences classe A

Co-promotrice : M^{me} MADI DJEDID. N

Doctorante

Examineur : M^{me} KOURABA

Maître Assistante classe A

Promotion2019/2020

Résumé :

L'établissement d'un système de culture basé sur l'agriculture de conservation en milieu semi-aride (hauts plateaux), revient aux pratiques conventionnelles qui ont atteint leurs limites face aux pertes continues de la fertilité des sols qui peuvent conduire à une stérilité irréversible à long terme. L'agriculture de conservation basée sur la rotation culturale et le semis direct, améliore la fertilité du sol grâce à leur enrichissement biologique. En effet l'une des performances obtenue de ces pratiques de conservation est l'élévation de la biodisponibilité du phosphore pour la culture du blé à travers l'accroissement de la mycorhization de ses racines.

Mots clés : semis direct, rotation, blé, phosphore.

Abstract :

The establishment of a cropping system based on conservation agriculture in a semi-arid environment (highlands) comes down to the wheat / wheat monoculture and the wheat / fallow rotation which have reached their limit in improving the wheat production. This has resulted in continued soil depletion of organic matter, fragility to erosion and loss of long-term fertility which can lead to irreversible sterility. Conservation agriculture based on rotational diversity and direct seeding can improve soil fertility through high levels of organic matter which will ensure, in the long term, improved yields and system sustainability. Indeed, one of the performances obtained from these conservation practices is the enrichment of soils with nitrogen and the bioavailability of phosphorus for crops through the involvement of ecosystem services.

Keyword: semi-direct, rotation, corn, nitrogen, phosphorus.

ملخص

إن إنشاء نظام زراعي قائم على الزراعة المحافظة على الموارد في البيئات شبه القاحلة (المرتفعات) يعود إلى الممارسات التقليدية التي وصلت إلى حدودها في مواجهة الخسائر المستمرة في خصوبة التربة والتي يمكن أن تؤدي إلى العقم. لا رجعة فيه على المدى الطويل. تعمل الزراعة المحافظة على الموارد القائمة على تناوب المحاصيل والبذر المباشر على تحسين خصوبة التربة من خلال إثرائها البيولوجي. في الواقع، أحد العروض التي تم الحصول عليها من ممارسات الحفظ هذه هو زيادة التوافر الحيوي للفوسفور لزراعة القمح من خلال زيادة تكسير جذوره.

الكلمات المفتاحية: شبه مباشر، دوران، قمح، نيتروجين، فوسفور

Remerciement

En préambule à ce mémoire, nous souhaitons adresser notre plus grande gratitude à Dieu qui nous a apporté son aide le long de notre parcours universitaire, et sans lequel la réalisation du présent travail n'aurait pas pu être possible.

Nos remerciements vont par la suite à notre promotrice, M^{me} BOUDIAF. NAIT KACI. M. maître de conférences classe A à l'UMMTO pour nous 'avoir encadré, mais aussi pour son aide, ses conseils, et à M^{me} MADI .DJEDID .N doctorante qui nous a guidé dans la conduite de ce travail et d'avoir pris le temps de corriger et de finaliser ce travail.

On tient à exprimer nos sincères remerciements à :

M^{me} OMARI.O Maître Assistant classe A, pour avoir accepté de présider et juger ce travail.

M^{me} KORABA Maître Assistant classe A à l'UMMTO, pour avoir accepté de faire partie du jury et d'évaluer ce mémoire.

A tous nos enseignants, de licence jusqu'au master II, auxquels nous devons notre formation et nos compétences chacun par son nom.

Et de même, nous remercions toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.



DEDICACES

Je dédie ce modeste travail à ceux qui ont donné un sens à mon existence, en m'offrant une éducation digne de confiance, ceux qui ont attendu avec patience les fruits de leur bonne éducation à mes très chers parents : Belkacem et Fatma

A la mémoire de ma grand -mère qui a toujours souhaiter de me voir finaliser mon cycle
d'étude

A mes chers frères : Kader ; Fayçal

A mes cousines et cousins (Radia ; Elza ; Khaled ; Karim ; Abdenour et Aghiles
et les deux poussin Moumouh et Mayas)

A mes tantes : Djadjiga ; Faroudja ; Farida et leurs maris

A tous mes amies en particulier : Chahinez ; Soumaya ; Thiziri

A ma binôme : Yasmine

A tous ceux qui m'aiment et qui sont les plus chères pour moi.

A tous ceux qui m'ont aidé durant mon parcours universitaire

Ainsi mes camarades de promotion (M2 production végétal 2020)

AMAL





Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A la mémoire de ma grand-mère.

*A l'homme, mon précieux offre du dieu, qui doit ma vie, ma réussite et tout mon respect : mon
cher père Ibrahim.*

*A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui
n'a épargné aucun effort pour me rendre heureuse : mon adorable mère Malika.*

A mon adorable sœur et son mari.

A mes chers frères en particulier Aghiles .

*A mes chers petits neveux et nièces : Massil ,Sylian , Aksil, Dassine, Alyssia , Nelia , Ania, Iman,
Hadjer , Romaiassa , Sarah .*

A mes belles sœurs : Sabrina ,Malika , Naima.

A mes deux copines d'enfances : Nissa ,lynda.

*A l'ensemble de mes amies, je tiens à les remercier de leur soutien et surtout de leur amitié :
Massicylia , Saliha .*

A ma binôme Amel pour sa patience et son sérieux.

A toute la famille Kaci du grand au petit

A toute la promotion de Production végétale 2019 /2020.

*A tous ceux qui sont chers et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin, d'une manière ou
d'une autre, ils vont trouver ici le témoignage d'une fidélité et d'une amitié infinie.*

Yasmine



LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 . Superficies (ha) en agriculture de conservation par continent (Kassamet <i>al.</i> ,2010)	5
Tableau 2 : évolution de la culture de blé dur en Algérie (période 2010-2015).(MADR, 2017).....	12

LISTE DES FIGURES

Figure 01 : Les principes fondamentaux de l'agriculture de conservation (FAO, 2012).....	4
Figure 02 : Semi directe (semis sans labour)	6
Figure 03 : épi de blé.....	15
Figure 04 : Épillets du blé	15
Figure 05 : Épillet et fleur de blé.....	16
Figure 06 : les différents stades de la période végétative du blé.....	18
Figure 07 : les différents stades de la période reproductrice	20
Figure 08 : représentation schématique de la rhizosphère	25
Figure 09 : Schéma représentatif de la morphologie racinaire d'une racine endomycorhizée, le champignon en question est un champignon endomycorhizien à vésicule et à arbuscule. (ZOULIM,2017).....	31
Figure 10 : schéma décrivant le mécanisme de pénétration du champignon mycorhiziens dans la racine et la formation de l'appareil de pré-pénétration (d'après Genre et <i>al.</i> , 2005 in HADDOUCHE ,2017)	33
Figure 11 : types de colonisation racinaire des champignons mycorhiziens à arbuscules (D'après Smith et Smith, 1997 in HADDOUCHE ,2017)	35
Figure 12 : prolifération des hyphes, formation des arbuscules et des vésicules (Brundret et <i>al.</i> , 1996).	35
Figure 13 : vésicules du champignon endomycorhize (M.Lecomte ,2013).	36
Figure 14 : un petit arbuscule sur la photo (en face de la flèche) Il s'agit d'une zone où le champignon traverse la proie (sans entrer dans la cellule en provoquant une invagination de la membrane plasmique) pour mettre en place les échanges	36
Figure 15 : Schéma représentant l'importance des hyphes des mycorhizes sur l'extension racinaire (www.smnf.fr).....	37

LISTE DES ABREVIATIONS

- AC : Agriculture de Conservation
- °C : degré Celsius
- CMA : champignons mycorhiziennes arbusculaire.
- C.E : conductivité électrique !!!
- cm : centimètre
- C/N : rapport massique carbone sur azote
- CO₂ : Dioxyde de carbone
- FAO : Organisation mondiale de l'Agriculture et de l'Alimentation (Food and Alimentation Organisation)
- fig: figure
- ha: *hectare*
- km: kilomètre
- m : mètre
- MAT : Matière Azote Totale
- mm : millimètre
- N : azote
- NH₂ : Ammoniacates
- N₂O : Protoxyde d'azote (Oxyde nitreux)
- P₂O₅ : pentoxyde de phosphore
- P : phosphore
- q : quintaux
- q/ha : quintal par hectare
- 50° (°) : degré

- SD : Semis -Direct

- tab : tableau

- TC : Travail Conventionnel

- TCS : Techniques Culturelles Simplifiées

-% : pour cent (pourcentage)

SOMMAIRE

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

Introduction	1
1.Présentation de l’agriculture de conservation	3
1.1. Définition	3
1.2. Principes fondamentaux de l’Agriculture de Conservation	3
1. 3. L’Agriculture de Conservation dans le monde.....	4
1.4. L’Agriculture de Conservation en Algérie.....	5
1.5. Semis Direct en Agriculture de Conservation.....	6
1.5.1. Définition du Semis direct.....	6
1.5.2. Différents types de semis direct	7
1.5. 3. Perspectives de développement du semis direct en Algérie.....	7
1.5.4. Effets du semis direct sur les composantes du sol	8
1.6.1. Rotation culturale en agriculture de conservation	9
1.6.1. Bénéfices des légumineuses dans une rotation	10
1.6 .2. Intégration du pois fourrager dans la culture du blé	10
1.6.2.1. Pois fourrager	10
1.6.2.2. Intérêt du pois fourrager dans la rotation	11
2. Présentation de la culture du blé	12
2.1. Production du blé en Algérie	12
2.2. Importance agronomique et socioéconomique du blé	13

2.3. Classification du blé dur.....	13
2.3.1. Classification génétique	13
2.3.2. Classification botanique	13
2.4. Caractères Morphologiques	14
2.4.1 Appareil végétatif.....	14
2.4.2. Appareil radiculaire.....	16
2.4.3. Appareil reproducteur	16
2.5. Cycle végétatif du blé.....	16
2.5.1. Période végétative	16
2.5.1.1. Stade de semis	17
2.5.1.2. Stade germination- levée	17
2.5.1.3. Stade levée-tallage.....	17
2.5.2. Période reproductrice	18
2.5.2.1. Stade montaison – gonflement	18
2.5.2.2. Stade d'épiaison	18
2.5.2.3. Stade épiaison – fécondation.....	19
2.5.3. Maturation du grain.....	19
2.6. Exigences du blé	20
2.6.1. Exigences édaphiques	20
2.6.2. Exigences climatiques	21
2.6.2.1. Température	21
2.6.2.2. Eau	21
2.6.2.3. Lumière	21

2.6.2.4. Fertilisation	21
3.la rhizosphère.....	24
3.1. Définition de la rhizosphère	24
3.1.1. L'endorhizosphère.....	24
3.1.1. L'endorhizosphère.....	24
3.1.2. Le rhizoplan.....	24
3.1.3. L'ectorhézosphère	25
3.2. Les sécrétions racinaires.....	25
3.2.1 Mucigel	25
3.2.2 Les exsudats	25
3.3. Rôle de la rhizosphère	25
3.4. Facteurs déterminant l'activité de la rhizosphérique.....	26
3.5. Les interactions entre les microorganismes de la rhizosphère	27
3.5.1. Commensalisme	27
3.5.2. Mutualisme	27
3.5.3. Antagonisme	27
3.5.3.1. Compétitions	27
3.5.3.2. Hyperparasitisme	28
3.5.4. Symbiose	28
3.5.5. Parasitisme	28
3.6 Stratégies adoptées pour améliorer la qualité de la production	28
3.6.1. Symbiose mycorhizienne	28
3.6.2. Différents types de mycorhizes	29
3.6.2.1. Ectomycorhizes	29

3.6.2.2. Ectendomycorhizes	29
3.6.2.3. Endomycorhizes	30
3.7. La reproduction du champignon endomycorhizien	31
3.8. Infection endomycorhizienne	31
3.9. Cycle de vie d'un champignon endomycorhizien AM	32
3.9.1. Germination de la spore	32
3.9.2. Formation de l'appressorium et colonisation de la racine	33
3.9.3. Formation des arbuscules	34
3.9.4. Formation de vésicules	35
3.10. Intérêts de la mycorhization	36
3.11. Intérêt d'une symbiose mycorhizienne pour le Blé	37
Conclusion.....	39

Références bibliographiques

Résumé

Introduction

En Algérie, Les produits céréaliers occupent une place stratégique dans le système alimentaire et dans l'économie nationale. Cette caractéristique est perçue d'une manière claire à travers toutes les phases de la filière (Djermoun, 2009). Mais le rendement moyen du blé ne dépasse pas 10 q/ha dans les zones semi-arides, (Sahnoune et al., 2013). Cette situation est due essentiellement à la production qui reste tributaire des facteurs agro-climatiques d'une part et d'autre part des facteurs d'ordre technique. (Djennadi, 2006 ; Djermoun, 2009 ; Abdellaoui et al, 2010). Dans cette perspective, Une nouvelle approche visant l'amélioration de la production et la préservation de l'environnement est actuellement testée et utilisée à travers le monde, cette approche correspond à l'Agriculture de Conservation, basée sur les trois principes de semis direct, la couverture permanente du sol et la diversification et l'allongement des rotations (Abdellaoui et Zeghouane, 2006 ; Kassam et Friedrich, 2010 ; M'Rabet, 2010).

En effet le semis direct permet de conserver et d'améliorer le potentiel agronomique des sols. (Aboudrare, 2009 ; Mrabet, 2001). La rotation des cultures demeure un élément important pour le maintien et l'amélioration des propriétés physico-chimiques, elle permet ; la gestion des adventices, la limitation des maladies et l'enrichissement des sols en azote, ainsi que la rotation participe la stabilité du rendement et à l'amélioration des systèmes de production (Berner et al., 2013 ; Keith et Balduim, 2006).

Outre la préservation des ressources locales (eau et sol) l'AC permet également aux espèces céréalières cultivées de mieux interagir au niveau racinaire avec des champignons mycorhiziens qui permettent, à la plante de s'adapter à certains facteurs abiotiques grâce à des modifications morphologiques (Rodriguez et al., 2004). En effet la mycorhization améliore l'aptitude de la plante hôte à tolérer les différents types de stress (sécheresse, salinité et haute température) tout en augmentant ses capacités de croissance et d'absorption de nutriments (Augé, 2001 ; Rodriguez et al., 2004, Al-Karaki et al., 2004, Fortin et al., 2013). Bien que la mycorhization est une règle générale chez les céréales, la colonisation de leurs racines dépend de la sensibilité de l'espèce et de la variété à être infectée par les Champignons Mycorhiziens à Arbuscules (Trouvelot et al., 1982 ; Boyetchko et Tewari, 1995).

Dans ce contexte, cette thématique a pour objectifs l'étude des symbioses chez les céréales conduites en agriculture de conservation. Pour répondre aux objectifs fixés à ce travail, nous l'avons mené comme suite :

Une synthèse bibliographique portant sur :

- L'agriculture de conservation
- Présentation de la culture du Blé
- Et la mycorhizosphere du blé

Et enfin nous terminerons par une conclusion.

Chapitre 1

Agriculture de Conservation

1. Présentation de l'agriculture de conservation

1.1. Définition

L'agriculture de conservation est apparue comme une alternative à l'agriculture conventionnelle pour assurer une régularité aux rendements et protéger la ressource en sol contre l'érosion et l'évapotranspiration, dans des zones bioclimatiques où la pluviométrie est rare et irrégulière (Ben-Salem *et al*, 2006).

L'agriculture de conservation 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 (Chabane, 2014). Dans les cultures extensives, la gestion du sol, l'irrigation et la fertilisation représentent les coûts majeurs de production, il faut ajouter à ces coûts la perte de potentiel du sol car les labours intensifs que l'on fait provoquer un appauvrissement dû à l'érosion. Grâce à l'agriculture de conservation, nous parvenons à réduire ces coûts, et de plus nous améliorons la qualité du sol. (Escribano, 2006).

Cependant, l'adoption de ces techniques a des conséquences sur le choix des rotations, l'utilisation des cultures intermédiaires, la gestion des résidus, la sélection des variétés et la densité de semis, le contrôle des ravageurs et des adventices, la gestion de la fertilité du sol et sur le choix du bon équipement. (Labreuche *et al*, 2007).

1. 2. Principes fondamentaux de l'Agriculture de Conservation

Les grands principes de l'AC sont les mêmes quelles que soient les conditions pédoclimatiques ou socio-économiques FAO (2011), (fig.1):

- ✓ Un travail du sol réduit ou « minimal » (allant jusqu'à l'absence totale de ce dernier, cas des systèmes de SD).
- ✓ Une couverture végétale permanente du sol par un mulch végétal vivant ou mort (paille).
- ✓ La diversification systématique des rotations culturales (notamment dans le cas des cultures annuelles), ou associations culturales dans le cas des cultures pérennes (Lakab, 2012).

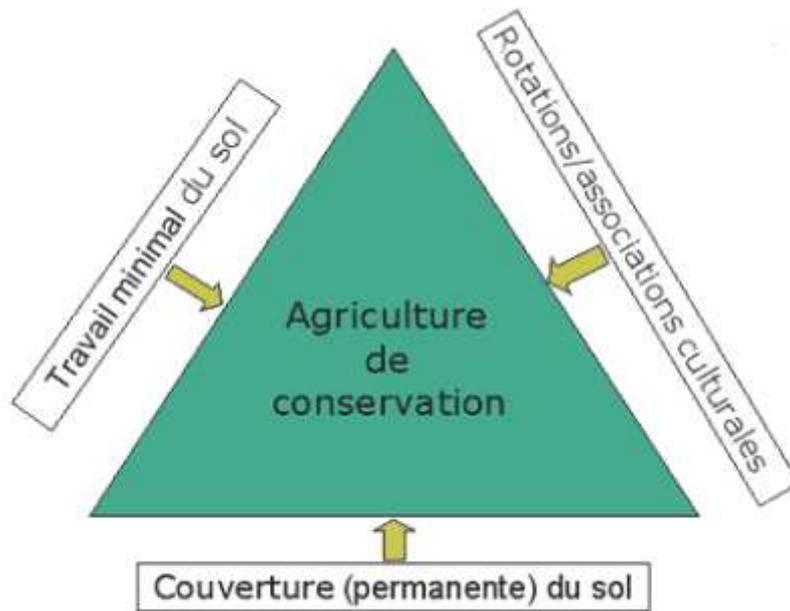


Figure1 : Les principes fondamentaux de l'agriculture de conservation (FAO, 2011)

1. 3. L'Agriculture de Conservation dans le monde

L'agriculture de conservation est un système qui s'inscrit dans une démarche agro écologique, (Kassam A et Friedrich T, (2009). Ce système de production connaît un intérêt croissant dans la plupart des pays à travers le monde, près de 106 millions d'hectares des cultures arables sont cultivées en agriculture de conservation. (LI et *al*,2011).

Le semis direct, est l'une des techniques de l'agriculture de conservation, élargi pour des sols et des climats pensés antérieurement inadéquats pour pratiquer cette pratique avec succès. Il est maintenant pratiqué par les agriculteurs du cercle polaire (exemple : Finlande), au niveau de l'équateur (exemple : Kenya, Ouganda), à environ 50° de latitude Sud (exemple : les îles Malouines). A 3000 m d'altitude (exemple : Bolivie, Colombie), à partir des conditions extrêmement sèches, avec 250 mm par an (exemple : l'Australie occidentale), aux zones extrêmement pluvieuses à 2000 mm par année (exemple : Brésil) ou 3000 mm par an (exemple : Chili). (Lakab, 2012).

Selon(Kassam A *et* Friedrich T, 2010) les techniques de l'agriculture de conservation, notamment le semis direct, connaissent un formidable succès et continue à se dissiper pour atteindre environ **117 millions d'hectares** dans tous les continent.

Tableau 1. Superficies (ha) des terres agricoles cultivées en agriculture de conservation dans chaque continent (Kassam A *et* Friedrich T, 2010)

Continent	Superficie (ha)	Pourcentage (%)
Amérique Latine	55 630 000	47,60
Amérique du Nord	39 981 000	34,20
Australie et Nouvelle Zélande	17 162 000	14,70
Asie	2 630 000	2,20
Europe	1 150 000	1,00
Afrique	368 000	0,30
Total	116 921 000	100

1.4.L' Agriculture de Conservation en Algérie

En Algérie, l'intensification de l'agriculture pour une production accrue a permis d'accroître les niveaux de productivité, mais elle n'a pas empêché les effets négatifs sur l'environnement (Lakab 2012).

Selon Abdellaoui *et al* (2010), le phénomène de dégradation du sol présent dans les hauts plateaux et les hautes plaines, zones de pratique de la céréaliculture, est dû à plusieurs facteurs : le déficit hydrique et les pratiques culturales inadaptées qui ne suivent pas l'évolution pédoclimatique du milieu. En effet, le labour conventionnel a atteint ses limites de développement dans ces régions, car les terres labourées sont sujettes à l'érosion et à la baisse de fertilité impliquant des dégradations physiques parfois irréversibles. Pour limiter ce phénomène et raisonner avec le concept de l'agriculture durable, le recours aux Semis Direct serait le plus conseillé mais son application est encore à son stade embryonnaire (Lakab ,2012).

1.5. Semis Direct en Agriculture de Conservation

Dans le cadre de l'AC, le semis direct est un nouveau mode d'exploitation des ressources naturelles en sol et en eau, diffusée au nom du développement durable. (Lahmar, 2006 ; FAO, 2007) ; Il constitue une alternative aux systèmes conventionnels de production adoptés par les agriculteurs, pour préserver le potentiel biologique et physicochimique des sols et les protéger des risques de l'érosion tout en limitant les frais de mécanisation. Le semis direct se voit ainsi comme premier pilier dans la restauration de la fertilité des sols (Masmoudi,2012).

1.5.1. Définition du Semis direct

Le terme générique du semis direct recouvre plusieurs réalités : semis sans labour (fig.2), c'est- à-dire dans les résidus de la culture précédente, semis dans un mulch plus ou moins épais formé grâce à une plante de couverture cultivée, semis dans un couvert végétal vivace, semis dans un paillage rapporté. Suivant les systèmes pratiqués, les conséquences sur la fertilité, sur la production et sur le calendrier cultural ne sont pas les mêmes ; le choix d'un système plutôt qu'un autre dépend d'une situation écologique et sociale donnée, du point de vue de l'exploitation, la construction des assolements, des rotations et des associations végétales est différente. (Raunet *et al*, 1998).



Figure2 : Semi directe (semi sans labour) (anonyme 1)

1.5.2. Différents types de semis direct

En fonction du type de couvert végétal sur lequel se fait le semis direct, on peut distinguer trois grands types de semis direct (FAO, 2007) :

- Une couverture mixte ayant plusieurs fonctions : à la culture principale est associée (en culture intercalaire ou dérobée) une plante de couverture dont la production servira à la consommation humaine. A l'intersaison une plante fourragère est installée
- La couverture morte constituée des résidus de récolte de la culture précédente et les résidus d'une plante de couverture ayant une forte production de biomasse.
- Une couverture vivante constituée d'une plante fourragère dont la partie aérienne est desséchée avant l'installation de la culture principale. Le système est géré de façon que la plante de couverture reprenne son développement normal une fois que la culture principale a mûri.

1.5. 3. Perspectives de développement du semis direct en Algérie

Les techniques simplifiées et le semis direct sous couvert végétal ont fait de grands progrès dans le monde et même dans les pays méditerranéens, mais pas en Algérie. L'idée d'introduire ces techniques directement aux niveaux des exploitations, a émergé suite à la soumission d'un projet sur l'efficacité d'utilisation de l'eau dans le cadre INCO-MED, au cours de l'année 2002. Cette idée a évolué par la suite vers la création d'une association entre chercheurs et agriculteurs, dont l'objectif est de créer un programme de recherche adéquat sur le semis direct et s'orienté vers la diversification des systèmes de production, mis en place dans les zones de production céréalière (Bouzerzouet *al*, 2006).

Cependant, la mise en œuvre d'un tel programme nécessite des apports financiers tant pour le programme de recherche que pour le développement. De plus, les agriculteurs auront besoin d'un soutien financier pour l'acquisition des équipements spécifiques (Abdellaoui *et* Houassine, 2006).

Ainsi, un premier essai de longue durée sur le semis direct est réalisé par la suite en 2004(début de l'essai) à la ferme de démonstration et de production de semences d'Oued Smar à Alger.

Afin d'évaluer l'effet du mode de gestion du sol sur le comportement du blé et sur l'évolution de la structure du sol et la conservation en eau (Abdellaoui et *al.*, 2011)

1.5.4. Effets du semis direct sur les composantes du sol

Plusieurs études montrent que le Semis Direct améliore différentes composantes principales du sol qui assurent le maintien de sa fertilité et de sa durabilité à savoir ;

a/ Structure du sol

La structure est très variable au sein des couches des sols cultivés non seulement dans le temps (sous l'action des systèmes de culture, du climat), mais aussi dans l'espace. Elle présente donc une forte variabilité, selon les conditions locales, à savoir la circulation d'eau, l'activité biologique et l'aération. Des résultats d'essais de différentes techniques de semis sur le blé dur, montrent une nette amélioration de la stabilité structurale à la surface du sol, ce qui revient à son enrichissement de surface en matière organique (Benniou, 2008 ; Bellemou, 2012).

b/ Densité apparente

La densité apparente constitue une première estimation de la porosité globale du sol. Elle est principalement contrôlée par plusieurs facteurs à savoir, des facteurs hydrologiques, biologiques et culturels (Strudley et *al.*, 2008). Des études actuelles, montrent que l'application du semis direct sur les sols à court terme, c'est-à-dire sur une durée de moins de 10 ans, aboutit à une augmentation de la densité apparente dans les 20 premiers centimètres du sol (Tayeb-bey et Yahiaoui, 2017).

c/Porosité du sol

La porosité du sol est une caractéristique majeure contrôlant les propriétés hydrodynamiques du sol et le développement racinaire des plantes, mais aussi un indicateur physique de la qualité du sol influencé par les différentes techniques culturales (Lahlou, et *al.*, 2005) Les sols non travaillés présentent une structure plus compacte et une porosité totale souvent plus faible que celle des sols labourés ou travaillés avec un outil à dent. Par conséquent la proportion de pores saturés en eau (% WFPS : Water Filled Pore Space) est souvent plus grande dans les systèmes non travaillés (Franzluebbbers et *al.*, 1995).

d/ Conservation de l'eau

De nombreuses études s'accordent que le sol non travaillé retient plus d'eau (Dao, 1993 ; Arshad *et al.*, 1999 ; Ferreras *et al.*, 2000 ; Baumhardt & Jones, 2002 ; Bhattacharyya *et al.*, 2006) du fait de la modification de l'espace poral mais aussi du fait de la présence des résidus en surface qui réduisent l'évaporation (Munawar *et al.*, 1990 ; Guérif, 1994). D'après Al-ouda (2010) la quantité de l'eau dans les 20 cm de surface du sol a diminué significativement d'un type de travail de sol à un autre comme suit SD, TCS, TC. Dans une culture de blé dur au niveau de l'horizon (0-20cm), Abdellaoui *et al.*, (2010) affirment que le semis direct et les travaux simplifiés permettent une meilleure rétention en eau par rapport au labour conventionnel avec la charrue au soc.

e/Activité biologiques

D'après des études comparatives des techniques de travail du sol, montrent que le semis direct améliore la teneur en matière organique dans les sols cultivés, Ce qui améliore les propriétés physico-chimiques de ces derniers afin d'assurer de meilleures conditions de développement aux végétaux qui les occupent. (Xanxo *et al.*, 2006). Le Semis Direct ou la faible perturbation du sol et la présence des résidus en surface, créent des conditions favorables au développement de la biodiversité, qui participe au recyclage de la matière organique. Cette augmentation s'observe pour la population bactérienne comme pour la population fongique. 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 (Tayeb-bey et Yahiaoui, 2017).

1.5. Rotation culturale en agriculture de conservation

L'introduction de légumineuses dans des systèmes céréaliers intensifs à haut niveau de fertilisation azotée constitue l'un des principes de l'**agriculture de conservation**, car elle permet la réduction de l'utilisation de fertilisants azotés, diminuer la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre. (Nemecek *et al.*, 2008). Ainsi, dans le cadre d'une agriculture de conservation il est conseillé de semer une culture de blé après un précédent cultural du type légumineux.

1.6. Bénéfices des légumineuses dans une rotation

L'insertion des légumineuses dans les rotations principalement constituées de céréales d'hivers est un levier de diversification des systèmes de culture, qui s'accompagne ;

- ✓ D'une fixation azotée de l'air grâce à symbiose avec des bactéries du genre *Rhizobium* hébergées dans des nodules racinaires, permettent de diminuer l'utilisation d'engrais minéraux à l'échelle de la rotation, et donc de réduire les émissions de gaz à effet de serre liées à la production et à l'utilisation d'engrais (Voisin et al. 2013).
- ✓ L'enrichissement des sols en matière organique, qui résulte des résidus de cultures riches en azote.
 - ✓ De plus, le rapport C/N des légumineuses est compris entre 15 et 20, donc leur incorporation entraîne une réorganisation de l'azote et ainsi peu d'émissions de N₂O par le sol (Duc et al. 2010). Le risque de lixiviation hivernale de nitrates après une culture de légumineuse peut par ailleurs être maîtrisé par l'implantation de cultures intermédiaires, ou de certaines cultures d'hiver capables de bien valoriser les reliquats (Vertès et al. 2010).
- ✓ D'une augmentation de l'activité biologique du sol, dont les champignons mycorhiziens (Gianinazzi et al. 2010 ; Wezel et al., 2014).
- ✓ De plus, cette diversification des espèces dans une rotation casse le cycle de certaines maladies et adventices, limitant ainsi l'utilisation de pesticides (Wezel et al., 2014).

1.6.1. Intégration du pois fourrager dans la culture du blé

1.6.1.1. Pois fourrager

Le pois fourrager (*Pisum sativum* L.) est une légumineuse fourragère de grand intérêt nutritionnel et environnemental. Les premières traces de culture du pois datent du début du Néolithique. Il était dans l'Antiquité et au Moyen Âge un aliment de base en Europe et dans le bassin méditerranéen. La FAO considère l'Ethiopie et l'Asie occidentale comme centres de diversification, avec des centres secondaires dans le sud de l'Asie et la région méditerranéenne. Actuellement, on trouve **Pisum sativum** L. dans tous les pays tempérés et dans la plupart des hautes terres tropicales (Brink et al., 2006).

Les agriculteurs accordent beaucoup d'intérêt à cette culture en raison de ses effets bénéfiques sur le sol et de la qualité de son fourrage, riche en protéines et bien valorisé en alimentation animale. Cultivé en pur en mélange ou en rotation avec une céréale, il peut être

utilisé en foin (16% MAT), en ensilage (18% MAT) ou en graines (25% MAT) comme source de protéines dans une ration alimentaire à base de céréales. Même ses résidus de culture (fanes ou pailles) sont de bonne valeur alimentaire (Oelke et *al.*, 1991). Néanmoins, son niveau de production faible et instable reste tributaire des conditions climatiques locales car la quasi-totalité de sa superficie est ensemencée en conditions pluviales avec des populations traditionnelles non améliorées.

1.6.1.2. Intérêt du pois fourrager dans la rotation

Le pois fourrager est l'un des meilleurs précédents du blé, car son intégration dans la rotation présente plusieurs intérêts ;

L'intérêt économique du pois se perçoit à l'échelle de la rotation en intégrant les effets de précédent : une économie d'azote sur la culture suivante, un gain de rendement du blé, une possible réduction des phytosanitaires, et, à terme, une meilleure robustesse et productivité des cultures. (Biarnes, 2019).

L'intérêt agronomique du pois se distingue par sa capacité à fournir ses besoins en azote par une simple fixation symbiotique de l'azote atmosphérique. Cette fixation se fait grâce à une interaction entre les plantes de pois et les souches de rhizobium qui sont des bactéries Gram négatif, en forme de bâtonnets mobiles. Ces bactéries induisent chez la plante la formation des nodules sur les racines. En grande culture, l'agriculteur peut utiliser le pois en tête de rotation pour profiter de l'enrichissement du sol en azote. Malgré ces caractéristiques nutritionnelles et agronomiques, une régression des superficies des cultures des légumineuses et en particulier le pois a été observée. Cette régression est due à plusieurs contraintes biotique est abiotique, notamment les ravageurs et les maladies (Broughton et Dilworth, 1971).

Chapitre 2

Le blé dur

2. Présentation de la culture du blé

Le blé dur est une ancienne culture dont l'origine remonte à la venue des arabes, il constitue la première ressource alimentaire pour l'humanité et la principale source de protéines. Il fournit également une ressource privilégiée pour l'alimentation animale et de multiples applications industrielles. Le blé occupe la première place dans la production mondiale, il assure 15% de ses besoins énergétiques pour la population humaine. Le blé est cultivé principalement dans les pays du bassin méditerranéen à climat arides et semi-arides là où l'agriculture est dans la plus mauvaise passe. Ces régions se caractérisent par l'augmentation de la température couplée à la baisse des précipitations, en plus la désertification et la sécheresse. (Gouasmi et Badaoui, 2017).

2.1. Production du blé en Algérie

La production céréalière en Algérie présente une caractéristique fondamentale depuis l'indépendance à travers l'extrême variabilité du volume des récoltes. Cette particularité témoigne d'une maîtrise insuffisante de cette culture et de l'indice des aléas climatiques. Cette production est conduite en extensif, elle constitue la principale activité, notamment dans les zones arides et semi-arides. Les terres annuellement semées représentent 3,6 millions d'hectares, la superficie occupée par le blé dur est, en moyenne, de 1.3 millions d'hectares, durant la période 2010-2015 (tab.2) et sa production durant cette période n'a pas tellement changé ; elle a passé de 20.385.000 quintaux à 20.199.390 quintaux, soit une baisse de production de 185.610 q. Ceci est expliqué essentiellement par le déficit pluviométrique surtout pendant le stade de remplissage du grain et également, par les mauvaises conditions d'installation de la culture (MADR, 2017)

Tableau 2 : évolution de la culture de blé dur en Algérie (période 2010- 2015)

Année	Superficie (ha)	Production (q)	Rendement (q/ha)
2010	1.181.774	20.385.000	17,2
2011	1.230.414	21.957.900	17,8
2012	1.342.881	24.071.180	17,9
2013	1.180.332	23.323.694	19,8
2014	1.182.127	18.443.334	15,6
2015	1.314.014	20,199.390	16,0

Source : MADR, (2017)

2.2. Importance agronomique et socioéconomique du blé

Le blé est une culture importante pour plusieurs raisons, parmi lesquelles (Feddal ,2015)

- ✓ Le commerce mondial du blé dépasse le commerce de tous les autres grains combinés.
- ✓ La surface réservée à ce type de cultures est de 743 millions d'hectares, plus grande que la surface de toutes les autres cultures réunies.
- ✓ De la production de protéine totale, trois quarts viennent des végétaux. Le blé lui seul contribue à la même quantité de protéine d'origine animale, comme viande, lait, et œufs.
- ✓ Selon les régions, les différents types de blé sont sélectionnés pour leur adaptation à la zone ou au climat et pour leur rendement.
- ✓ Le blé dur est principalement cultivé par les pays situés autour du bassin méditerranéen, sur le continent américain (Amérique du Sud et Etats Unies) ainsi que l'Inde et la Chine.

2.3. Classification du blé dur

2.3.1. Classification génétique

L'origine génétique du blé dur remonte au croisement réalisé entre deux espèces ancestrales **Triticum monococcum** et une graminée sauvage **Aegilops speltoides**.

Le blé dur est appelé **Triticum durum** à cause de la dureté de son grain. Il possède, à l'inverse des espèces ancestrales originaires de Syrie et de Palestine $2n=4x=28$ Chromosomes. Le genre **Triticum** est divisé en cinq espèces :

Triticum monococcum (L) MK $2n=14$, génomes AA.

Triticum turgidum (L) Thell $2n=28$, génomes AABB.

Triticum timopheevi (Zuhk) MK $2n=28$, génomes AABB.

Triticum aestivum (L) Thell $2n=42$, génomes AABBDD.

Triticum zhukovskyi (Men et Er) $2n=42$, génomes AAAABB. (AMIRA et al.,2013)

2.3.2. Classification botanique

Le blé dur est une plante herbacée, appartenant au groupe des céréales à paille et dont la classification botanique est la suivante (Slama et al., 1995 ; Derbal, 2009) :

Embranchement : Spermaphytes

S/Embranchement : Angiospermes

Classe : Monocotylédones

Super ordre : Commeliniflorales

Ordre : Poales

Famille : Graminacées

Genre *Triticum* sp.

Espèce : *Triticum durum* Desf.

2.4. Caractères Morphologiques

L'appareil végétatif du blé se caractérise par les caractères morphologiques suivants (Gouasmi et Badaoui,2017)

2.4.1 Appareil végétatif

➤ Tige et feuille

La tige ne commence vraiment à prendre son caractère de tige qu'au début de la phase végétative, la tige en quelque sorte télescopée à partir d'un massif cellulaire qui forme le plateau de tallage. La tige elle-même ou chaume s'allonge considérablement à la montaison, et porte 7 ou 8 feuilles rubanées, engainantes sur toute la longueur d'un entre nœud. Les feuilles ont des nervures parallèles et sont terminées en pointe (Hacini, 2014).

➤ Épi

L'épi apparaît enveloppé dans la dernière feuille, lorsque le développement de la tige est terminé, et après quelques jours on peut étudier sa structure en détail. C'est l'épiaison. L'épi comporte une tige pleine ou rachis coudée et étranglée à intervalles réguliers (fig.3) et portant alternativement à droite et à gauche un épillet (Gouasmi et Badaoui,2017).



Figure 03 : épi de blé

➤ **Épillets**

Ne comportent pas de pédoncule il est attaché directement sur le rachis (fig.4). Les épillets sont nombreux (jusqu'à vingt-cinq). Ils représentent un petit groupe de fleurs, insérées sur l'axe de l'épi. Il est protégé à sa base par deux glumes (bractées), les fleurs sont protégées par des glumelles et des glumellules. Après la fécondation, la fleur donne naissance à un fruit unique, le caryopse ou grain, qui comporte un embryon ou germe plaqué sur les réserves (Hacini, 2014).

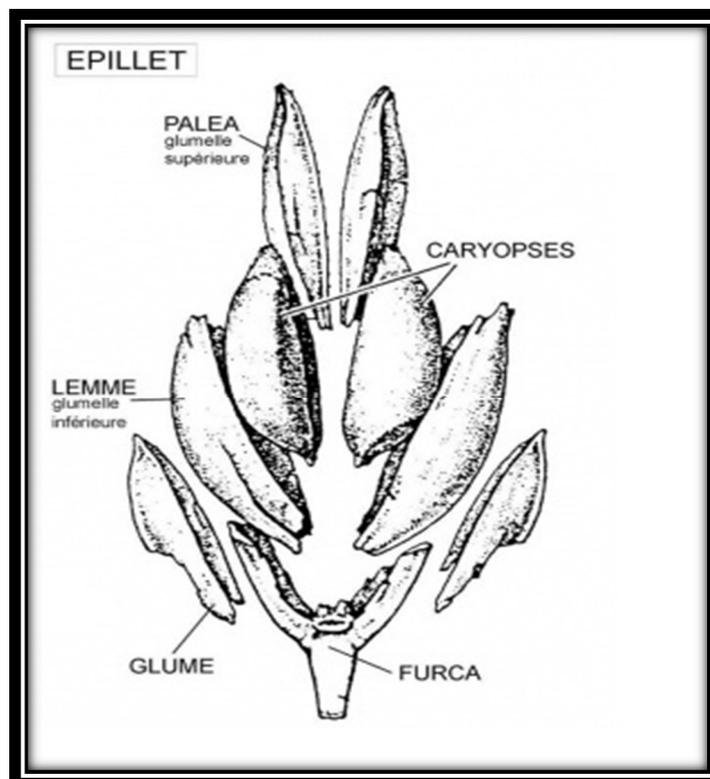


Figure 04 : Épillets du blé

2.4.2. Appareil racinaire

L'appareil racinaire du type fasciculé peu développé, 55% du poids total des racines se trouve entre 0 et 25 cm de profondeur, 17,5% entre 25 et 50 cm, 14,9% entre 50 et 75%, 12% au-delà. En terre très profonde, les racines descendent jusqu'à 1,50 mètre (Gouasmi et Badaoui,2017).

2.4.3. Appareil reproducteur

Les fleurs sont groupées en inflorescences de type épi, ce dernier est composé d'épillets, qui est une petite grappe d'une à cinq fleurs enveloppées chacune par deux glumelles (fig.5) (Moule, 1971). L'épi est constitué d'un axe appelé le rachis sur lequel sont fixés les épillets (Belaid, 1996). Le blé est une plante monoïque à fleurs parfaites, qui se reproduisent par voie sexuée et par l'autofécondation (espèce autogame). Il existe un pourcentage faible (< 3%) de pollinisation croisée. (Mekoussi ,2015)

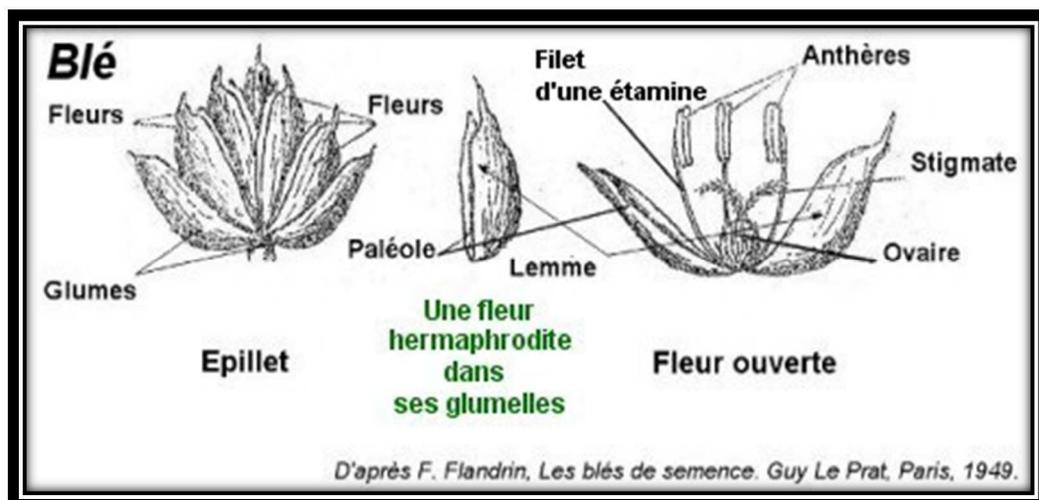


Figure 5 : Épillet et fleur de blé.

2.5. Cycle végétatif du blé

2.5.1. Période végétative

Elle se caractérise par un développement strictement herbacé et s'étend du semis jusqu'à fin tallage. Elle se divise en trois stades (fig.6 et 7) ;

2.5.1.1. Stade de semis

La production du blé dépend du choix de la variété, adaptée au climat et au sol de la zone, de la date du semis, de la densité de semis et de la profondeur de semis.

Les systèmes de cultures ont favorisé divers types de blé

- le blé d'hiver est semé à l'automne. Il caractérise les régions méditerranéennes et tempérées ;

- le blé de printemps est semé au printemps dans les pays à hiver plus rude.

La différence principale avec le blé d'hiver et le blé de printemps, est que ce dernier supporte assez difficilement les températures basses. (Nedjah , I ,2015)

2.5.1.2. Stade 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,S et Ait,K,2008).

2.5.1.3. Stade levée-tallage

Selon Soltner (1988) in Gouasmi et Badaoui, (2017), Cette phase est un mode de développement propre aux graminées, caractérisée par la formation du plateau de tallage, l'émission de talles et la sortie de nouvelles racines. Cette phase a besoin des températures moyennes de 09 à 22°C. Le tallage est marqué par l'apparition d'une tige secondaire, une talle, à la base de la première feuille. Les autres feuilles poussent elles aussi leurs talles vertes.

À l'intérieur de la tige, on peut trouver ce qu'on appelle la pointe de croissance. Elle commence à ressembler à un épi de blé. Initialement, la pointe est sous terre, protégée contre le gel. Au fur et à mesure de la reprise de la végétation, la pointe de croissance va s'élever dans la tige (Nedjah, I,2015).

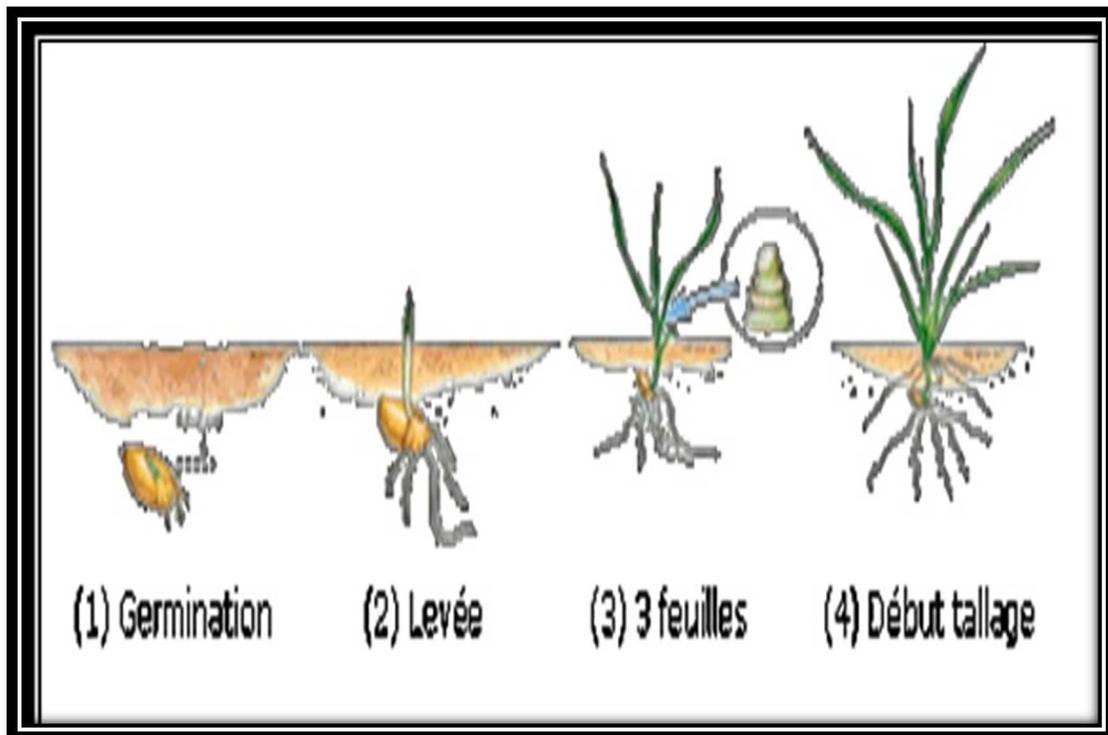


Figure 06 : les différents stades de la période végétative du blé

2.5.2. Période reproductrice

Elle comprend la formation et la croissance de l'épi (fig .6) et elle se caractérise par

2.5.2.1. Stade montaison – gonflement

La montaison débute à la fin du tallage, elle est caractérisée par l'allongement des 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, K ,2012).

2.5.2.2. 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. (Gouasmi et Badaoui,2017)

2.5.2.3. Stade épiaison – fécondation

C'est au cours de cette période que s'achève la formation des organes floraux et que va s'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,S et Ait,K,2008).

2.5.3. Maturation du grain

C'est la dernière phase du cycle végétatif. D'après Belaid (1996) la maturation correspond à l'accumulation de l'amidon dans les grains. Par la suite, les grains perdent leur humidité, 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) (Nadjem,2012).

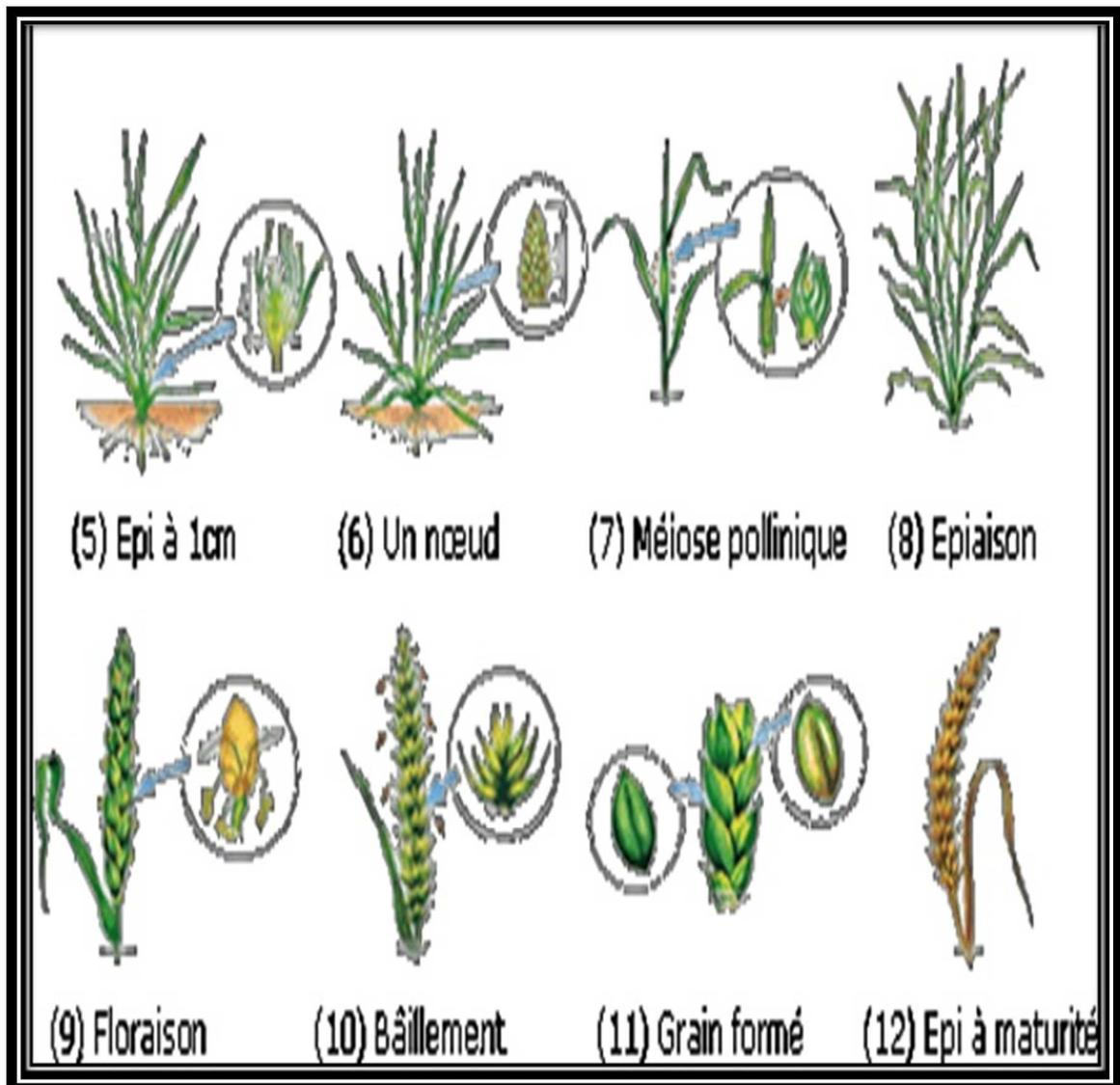


Figure 07 : les différents stades de la période reproductrice

2.6. Exigences du blé

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 les exigences on peut citer :

2.6.1. 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. La culture de blé est modérément tolérante à l'alcalinité du sol dont la C.E. (M. Benabdallah ,2016)

2.6.2. Exigences climatiques

2.6.2.1. Température

Une température supérieure à 0° (zéro de végétation du blé) est exigée pour la germination des céréales. Cependant l'optimum se situe entre 20°C et 22°C. La température conditionne la nitrification et l'activité végétative du blé au cours du tallage et de la montaison (M.Benabdellah ,2016).

2.6.2.2. Eau

Selon Soltner (1990) in Benabdallah (2016), l'eau a une grande importance dans la croissance de la plante. En plus de l'eau de constitution des cellules et de celle qui rentre dans les synthèses glucidiques catalysées par la chlorophylle, l'eau est le véhicule des éléments minéraux solubles de la sève brute. A cet égard, Clément et Parts (1970) in Benabdallah (2016) voient qu'il est intéressant de définir le coefficient de transpiration du blé, c'est-à-dire la quantité d'eau qui doit traverser la plante pour l'élaboration d'une certaine quantité de matière sèche. Pour le blé, suivant les variétés, la valeur du coefficient de transpiration varie de 450 à 550 grammes d'eau pour un gramme de matière sèche.

2.6.2.3. Lumière

La lumière est la source d'énergie qui permet à la plante de décomposer le CO₂ 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. 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 (M. Benabdallah ,2016).

2.6.2.4. Fertilisation

Le blé a besoin de ces trois éléments essentiels et le rôle de chaque élément sur le plan de blé est le suivant :

• L'azote

L'azote est un élément indispensable à la culture et la croissance du blé. En effet, c'est le pivot de la production de biomasse, du rendement et de la qualité des produits récoltés. C'est l'élément essentiel de la synthèse protéique par la formation du radical amine (NH₂) indispensable aux liaisons peptidiques.

Dans le cas d'un apport unique, s'il est trop précoce, il entraîne la formation des talles, mais peut provoquer un risque de carences à la montaison. L'apport est dans ce cas mal valorisé. Situé en fin de tallage, il est beaucoup mieux utilisé. En effet après minéralisation, l'azote disponible à la montaison favorise la montaison et la formation des épis et se termine par un bon remplissage du grain et un taux protéique satisfaisant. (Boutra et *al.*, 2017)

• Le phosphore

Le phosphore se trouve dans la plante sous forme minérale (Duthil, 1973). Mais il est beaucoup plus fréquemment présent combiné sous forme organique. Sa répartition dans les tissus est très inégale et augmente généralement avec la teneur en azote. La teneur des végétaux en phosphore est soumise à des variations très importantes ; elle dépend principalement de la nature de l'espèce, de l'âge de la plante et de l'organe analysé ; elle dépend également, dans une moindre mesure, de la richesse du sol en P₂O₅ ; elle dépend enfin très faiblement de la présence d'autres éléments minéraux donnant lieu à des antagonismes avec l'acide phosphorique (Gervy, 1970). Le phosphore 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 de la plante (Boutra et *al.*, 2017).

• Le potassium

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 assimilât vers les organes de réserves (grains, bulbes et tubercules)
(Boutra et *al.*,2017).

Chapitre 3

La rhizosphère

3.1. Définition de la rhizosphère

Le terme rhizosphère (« rhizo » vient du grec « *rhiza* » signifiant racine, « sphère » vient du latin « *sphaera* » signifiant balle, ballon ou globe, proposé par Lorenz Hiltner en 1904 en désignant spécifiquement l'interaction entre les bactéries et les racines des légumineuses. Actuellement, la définition de la rhizosphère est plus précise et elle correspond à la zone du sol dans laquelle la microflore tellurique est soumise aux influences des racines (Westover et al., 1997) La rhizosphère peut être divisée en deux sous-compartiments distincts (Fig.7); la rhizosphère au sens strict, elle correspond à la fine couche de sol qui adhère fermement aux racines et le rhizoplan ou surface des racines dont la microflore est extraite par agitation vigoureuse des racines (Brahim, 1998).

La rhizosphère est profondément modifiée par l'activité et le métabolisme de la racine. Elle diffère de la masse du sol par son pH, son potentiel d'oxydoréduction, par l'abondance et la composition de la matière organique et enfin par sa forte activité biologique qui se traduit par une teneur élevée en CO₂. Ainsi, malgré le petit volume qu'occupe la rhizosphère dans le sol, elle joue un rôle central dans le maintien du système sol-plante (Benhacene et al ,2016). Le volume de la rhizosphère est variable selon le développement racinaire : il représente entre 0,1 et 1% du sol global des écosystèmes forestiers et près de 100% des premiers centimètres des sols prairiaux. Cette zone d'interaction peut être divisée en trois zones distinctes : l'endorhizosphère (intérieur de la racine), le rhizoplan (surface racinaire) et l'ectorhizosphère ou le sol rhizosphérique (sol lié à la racine par opposition au sol distant) (Schroder , et Hartmann ., 2003).

3.1.1. L'endorhizosphère

Certaines bactéries vivent au contact direct de la racine, voire même pénètrent dans les tissus rhizodermiques et corticaux, sans pour autant être parasites ou prédatrices. Ceci souligne le fait que l'interface entre la racine et la microflore s'étend à l'intérieur de la racine (Schroder P, Hartmann A. (2003).

3.1.2. Le rhizoplan

Selon (Schroder et Hartmann., 2003) Le rhizoplan désigne la surface racinaire et les bactéries qui sont fortement adhérentes aux racines.

3.1.3. L'ectorrhéosphère

Représente la zone extérieure qui se trouve directement après le rhizoplan (Schroder et, Hartmann., 2003).

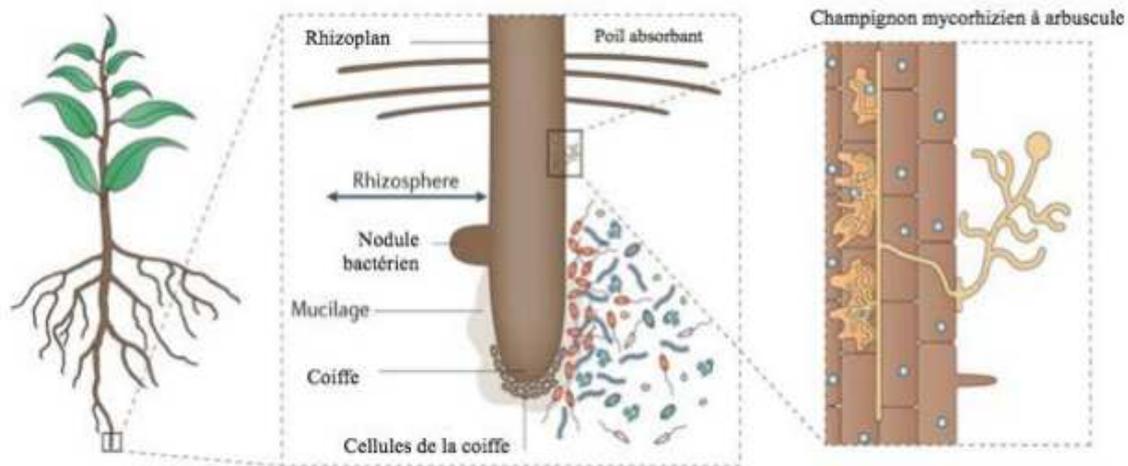


Figure 08 : représentation schématique de la rhizosphère (Caroline De Tender, 2013-2014)

3.2. Les sécrétions racinaires

3.2.1 Mucigel

Le mucigel correspond aux composés gélatineux de nature polysaccharidique produit à la fois par la racine et les populations microbiennes de la rhizosphère. Ce gel favorise le contact entre les particules du sol et la surface racinaire et améliore le transfert des éléments minéraux de l'eau vers la racine. Il assure une fonction de lubrification permettant la progression de la racine dans le sol (Stengel et Gelin, 1998)

3.2.2 Les exsudats

Les exsudats sont des composés solubles de faible poids moléculaire sécrétés par la racine par la voie passive (Oukkal, 2014). Ils sont reconnus pour être une source essentielle d'énergie pour les microorganismes du sol (Chaillou, 2008)

3.3. Rôle de la rhizosphère

En effet, il existe une double relation fonctionnelle qui est établie dans la rhizosphère, ces relations concernent l'effet des racines sur le milieu environnant, ainsi que la réponse de la microflore à l'activité racinaire. Le rôle de la rhizosphère peut être résumé dans les points suivants :

-La rhizosphère joue un rôle essentiel dans les processus de phytoremédiation (Maalem et Dalal., 2014)

-Elle est le siège des processus physiques et chimiques spécifiques liés à l'alimentation hydrique et minérale des plantes (Gobat et *al.*, 2003).

-Elle est apparue comme le lieu privilégié des échanges de matière et d'énergie : la libération de composés organique, l'absorption d'eau et d'ions, la synthèse des métabolites microbien divers et variés.

-La rhizosphère est une région du sol riche en gaz carbonique et pauvre en oxygène dissous, la rhizosphère et de ce fait un site réducteur, où se développe une activité dénitrifiante, réduisant l'ion nitrate en oxyde d'azote, voir en ammoniacque (Gobat et *al.*, 2003)

-Elle contribue à modifier les propriétés des sols : propriétés biologiques, biodiversités et activités microbiennes, fertilité et qualité du sol (Gobat et *al.*, 2003).

-Dans la rhizosphère la synthèse de phosphatase mène à une augmentation de la disponibilité du phosphore, et en contrepartie son assimilation par les plantes (Hinsinger et *al.*, 2005).

-La rhizosphère est une niche écologique qui éveille et stimule diverses activités microbiennes en participant ainsi, au fonctionnement des cycles des nutriments majeurs et des oligoéléments comme le carbone, l'azote, phosphore, le fer...etc. (Goba tat *al.*, 2003).

-La rhizosphère joue un rôle singulier dans la régulation de la santé et de la nutrition des plantes, en lien avec la nature des exsudats racinaires (Hinsinger et *al.*, 2005).

3.4. Facteurs déterminant l'activité rhizosphérique

D'une façon générale, l'activité rhizosphérique dépend de plusieurs facteurs de l'environnement édaphique, notamment la teneur du sol en eau et en oxygène, sa température, sa teneur en éléments assimilables, la présence de composés phytotoxiques, la présence des molécules signal libérés au cours des échanges entre les racines des plantes et les microorganismes qui leur sont associés (champignons, bactéries, cyanobactéries...).

Les signaux rhizosphériques influent sur l'expression génique « épigénétique ». Ils sont souvent « phytobénéfiques » en améliorant par exemple l'architecture, la croissance et le fonctionnement du système racinaire (Gobat et al, 2003).

3.5. Les interactions entre les microorganismes de la rhizosphère

La rhizosphère est une zone riche en populations microbiennes. Les interactions entre ces microorganismes et la plante sont nombreuses et très intenses, elles sont catalysées par les exsudats racinaires. Ces derniers sont des sucres solubles dans l'eau, des antibiotiques, des acides organiques et des composés volatils dont la quantité et la qualité peuvent changer considérablement en réponse à une variété et à une combinaison de facteurs et de conditions, qui favorisent certains groupes de microorganismes au dépend d'autres au sein de la communauté microbienne (Curl et Truelove, 1986).

3.5.1. Commensalisme

Le commensalisme existe au niveau de la rhizosphère notamment par des changements dans les conditions environnementales (humidité, pH, le potentiel osmotique, etc....), rendant ainsi un climat favorable pour le développement d'un autre. Aussi, certains organismes dégradent ou neutralisent des substances toxiques favorisant ainsi la croissance des autres (Curl et Truelove, 1986).

3.5.2. Mutualisme

Le mutualisme ou symbiose est une association mutuellement avantageuse aux microorganismes partenaires, exemple : de *Proteus vulgaris* qui a besoin de biotine, mais qui synthétise l'acide nicotinique requis par *Bacillus polymyx* qui le transforme en biotine (Dommergues et Mangenot, 1970).

3.5.3. Antagonisme

En écologie, le terme d'antagonisme désigne une inhibition ou une action défavorable d'un organisme vis-à-vis d'un autre à l'intérieur d'une population microbienne mixte (Curl et Truelove, 1986) L'antagonisme se manifeste généralement soit par une compétition, un hyperparasitisme, une production de sidérophores ou par une antibiose.

3.5.3.1. Compétitions

La compétition entre deux ou plusieurs microorganismes concerne soit les éléments nutritifs, l'espace ou les autres facteurs environnementaux qui deviennent limitatifs pour la croissance. L'effet sélectif des exsudats racinaires sur la microflore serait le résultat de la compétition qui oppose des souches à croissance lente et des souches à croissance rapide, ces dernières sont particulièrement favorisées dans la rhizosphère. La fréquence élevée des

Fusarium dans la rhizosphère serait due au pouvoir compétitif de ce champignon. (Dommergues et Mangenot, 1970).

3.5.3.2. Hyperparasitisme

L'hyperparasitisme est l'attaque directe d'un microorganisme par un autre dans un but nutritionnel. La rhizosphère qui héberge une large variété de populations microbiennes, constitue un milieu favorable pour l'apparition du parasitisme (Gagné, 1984).

3.5.4. Symbiose

Plus que d'autre processus, le fonctionnement de symbiose repose sur l'interaction étroite entre les trois composantes qui sont le sol, les microorganismes du sol et la plante. Le sol détermine les conditions physico-chimiques, dont certaines sont indispensables à l'établissement de la symbiose. La symbiose entre bactéries de la famille des *Rhizobiacées* (*Rhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Azorhizobium*) et les plantes de la famille des Fabacées, anciennement famille des légumineuses, est la plus connue et la plus étudiée. Cette association forme des nodosités sur des racines. Certaines bactéries du genre *Rhizobium* ont la propriété de fixer N₂. La plante fournit le site, sous forme de la nodosité, et le couvert, sous forme de sucre et d'acides aminés. En fixant l'azote, la bactérie fournit à la plante un nutriment qui favorise sa croissance dans la plupart des sols non cultivés. La symbiose *Rhizobia*-légumineuse a été utilisée dans les systèmes de rotation de cultures pour augmenter la fertilité du sol bien avant l'identification des *Rhizobia* par Hellriegel et Wilfarth en 1888 (Gobat et al., 2003)

3.5.5. Parasitisme

Le parasitisme est l'attaque directe d'un microorganisme par un autre dans un but nutritionnel, dont un des protagonistes (le parasite) tire profit (en se nourrissant, en s'abritant ou en se reproduisant) aux dépens d'un hôte. La rhizosphère qui héberge une large variété de populations microbiennes, constitue un milieu favorable pour l'apparition du parasitisme (Benhacene et al., 2016).

3.6 Stratégies adoptées pour améliorer la qualité de la production

3.6.1. Symbiose mycorhizienne

Le mot symbiose fut utilisé pour la première fois par l'allemand Frank (1877) pour qualifier la coexistence d'organismes différents. Les symbioses mutualistes, où les partenaires coexistent activement d'un point de vue physiologique, écologique et reproductif (Harley,

1989). Elles furent pendant longtemps jugées peu importantes dans les processus écologiques (Lambers *et al.*, 2009). Il est actuellement admis que la symbiose mycorhizienne est une association obligatoire et à bénéfice réciproque entre une racine de plante et un champignon (Hamza ,2014).

La presque totalité des plantes vertes terrestres vivent en symbiose mycorhizienne. Seuls des membres de quelques familles en sont quelques fois dépourvus, par exemple, les crucifères et les chénopodiacées.

La symbiose mycorhizienne prend différentes formes, appelées ectomycorhizes, endomycorhizes ou ectendomycorhizes, selon les caractères anatomiques de l'association, qui dépendent en fait directement des partenaires impliqués.

La classification des mycorhizes est basée donc 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 (Hamza ,2014).

3.6.2. Différents types de mycorhizes

3.6.2.1. Ectomycorhizes

Environ 3% des végétaux ont seulement établi ce genre de mycorhize (Mousain, 1997). Ce sont des associations où le champignon entoure les cellules vivantes des racines, mais ne les pénètre pas ; le mycélium progresse entre les cellules du cortex racinaires pour former le réseaux intercellulaire de Hartig, les ectomycorhizes développent un manteau, formé d'hyphes qui recouvrent la surface de la racine ; Des cordons mycéliens s'écartent du manteau vers le sol environnant, habituellement les poils absorbants ne se développent pas sur les ectomycorhiziens, et les racines sont courtes et souvent ramifiées (Oukkal,2014).

3.6.2.2. Ectendomycorhizes

Ce sont des mycorhizes présentant à la fois des structures d'ectomycorhizes et des endomycorhizes. Le champignon forme un manteau, un réseau de Hartig à partir des hyphes de la base du manteau ou des hyphes du réseau de Hartig, une ramification en forme de coin très aigu perce la paroi cellulaire et représente la formation endomycorhizienne. (Zoulim,2017).

3.6.2.3. Endomycorhizes

Les endomycorhizes présentent un mycélium qui pénètre dans le cortex racinaire, en formant des digitations appelées *arbuscules* qui repoussent la membrane plasmique des cellules du parenchyme cortical en créant une surface propice aux échanges entre les deux partenaires ; en outre, il y a souvent formation de *vésicules* dont le rôle est de stocker les nutriments (Zoulim,2017). Parmi les endomycorhizes on site :

Mycorhizes à arbuscule(CAM)

Parmi les associations endomycorhiziennes, ce sont les champignons mycorhiziens à arbuscules (CMA) qui 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 (Smith et Read, 1997) ligneuses, herbacées, les mousses, fougères, gymnospermes et angiospermes plusieurs conifères et la majorité des plantes à fleurs, mono et dicotylédones. (Hamza,2014)

Le champignon mycorhizien à arbuscule forme plusieurs structures à l'intérieur des racines (Figure 3), principalement des arbuscules, des vésicules des spores et des hyphes non spécialisés (Tommerup, 1984). On utilise le terme propagule pour les désigner puisque toutes ces structures servent à propager l'espèce (Fortin et al, 2008).

Structure des champignons mycorhiziens à arbuscule

-**Spore** ; La spore sert d'organe de stockage et de propagation des CMA. Elle germe et donne naissance à des filaments mycéliens, qui forment des appressoriums et qui se différencient à l'intérieur des racines en arbuscules et dans certains cas en vésicules (Hamza,2014).

- **Arbuscule** ; L'arbuscule est l'unité au niveau de laquelle se produisent les échanges entre l'hôte et le champignon. C'est une ramification latérale des hyphes fongiques dans les cellules du cortex racinaire où le champignon pénètre et croît à l'intérieur. La membrane de la cellule hôte s'invagine et enveloppe le champignon, ce nouveau compartiment fournit un contact direct entre le champignon et la plante (Hamza,2014)

-**Vésicule** : La vésicule est une structure de stockage à paroi fine, à contenu lipidique et apparaît généralement dans les espaces intercellulaires (Hamza,2014)

- **Hyphe extraradiculaire** : L'hyphe extraradiculaire produit par le champignon mycorhizien à arbuscule est un des organes de propagation et peut coloniser une plante autre que la plante dont ils sont issus (Hamza,2014)

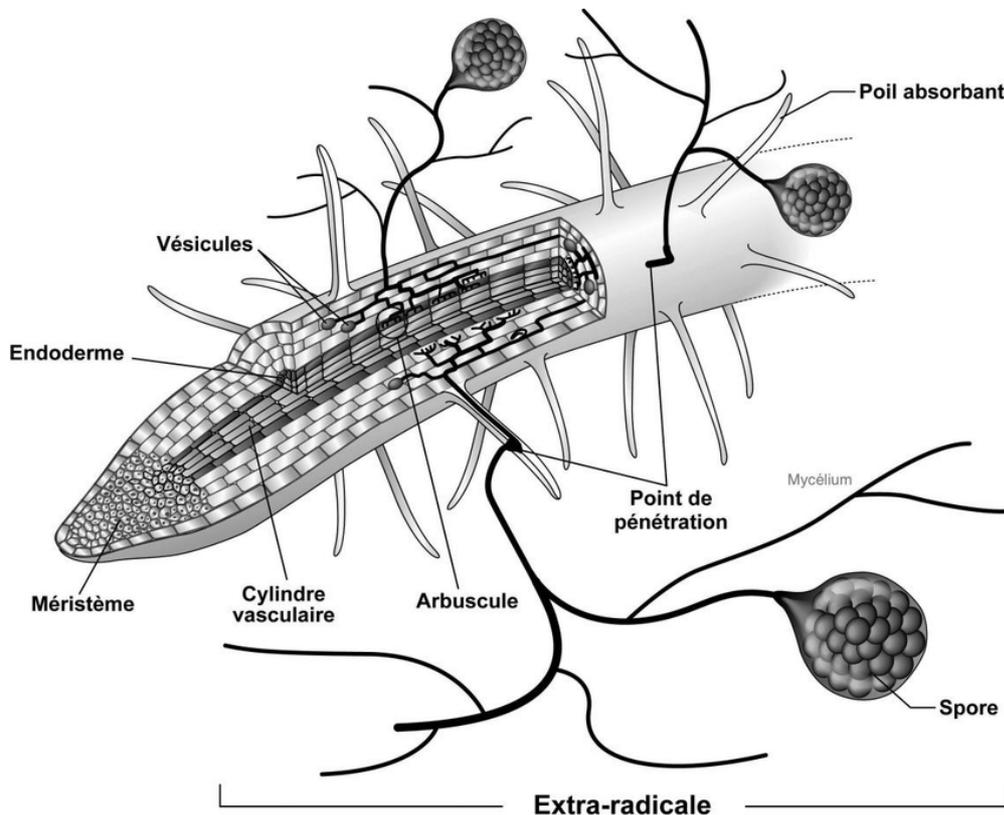


Figure 09 : Schéma représentatif de la morphologie racinaire d'une racine endomycorhizée, le champignon en question est un champignon endomycorhizien à vésicule et à arbuscule. (Zoulim,2017)

3.7. La reproduction du champignon endomycorhizien

La reproduction du champignon endomycorhizien ne se fait que lorsque la symbiose est établie : le mycélium s'étend dans la rhizosphère et les spores se forment à l'extrémité de branchement hyphal. Tout système champignons endomycorhizien AM peut inclure une plante hôte (Oukkal, 2014).

3.8. Infection endomycorhizienne

L'infection endomycorhizienne a lieu uniquement dans la zone apicale des jeunes racines. Le champignon répond à la présence des exsudats racinaires de la plante par une augmentation de la croissance et de la ramification des hyphes mycéliennes. Ces derniers adhèrent à la racine et différencient au contact du rhizoderme une structure spécialisée

l'appressorium. La formation de ce dernier nécessite un processus de reconnaissance entre les deux partenaires déclenchés par des signaux de la plante hôte. La pénétration du champignon est caractérisée par la production localisée d'hydrolases, qui vont dégrader la paroi de la plante et par conséquent permettre la progression du filament à l'intérieur de la racine (Duhoux et Nicole, 2004 in Haddouche, 2017).

3.9. Cycle de vie d'un champignon endomycorhizien AM

Les champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA) sont des symbiotes obligatoires, qui ne peuvent se développer qu'en présence d'une plante hôte. Certains mycorhizes peuvent se développer en absence de plante hôte, mais le développement de leurs hyphes reste limité (Diop *et al.*, 1994). La colonisation des cellules corticales de la racine passe par plusieurs étapes au cours desquelles se produisent des modifications anatomiques et physiologiques importantes. Des modifications de l'architecture ultra structurale sont observées, telles que l'invagination du plasmalemme autour du mycélium, la fragmentation de la vacuole, la disparition des amyloplastés et l'augmentation du nombre de vésicules de Golgi et de mitochondries (Haddouche, 2017).

L'infection de la plante hôte peut être initiée à partir de plusieurs propagules (fig.9): spores, fragments racinaires mycorhizés, hyphes présentes dans le sol ou même des vésicules isolées. Les spores germent en donnant un promycélium (Stade 1), qui développe un appressorium lorsqu'il rencontre une racine (Stade 2). Ensuite, le champignon pénètre dans la racine en formant un mycélium secondaire et des arbuscules (Stade 3). Le mycélium progresse entre les cellules racinaires, se renfle en vésicules (Stade 4). Le mycorhize ainsi formé produit un réseau extramatriciel qui est à l'origine des spores qui seront libérées dans le sol après maturation (Stade 5). Lors de la sénescence de la racine ou des tissus corticaux, les vésicules sont libérées dans le sol et se développent selon un mode saprophytique (Haddouche, 2017).

3.9.1. Germination de la spore

Le déclenchement de la germination des spores et la croissance de mycélium sont stimulés par la présence des racines de la plante hôte et les exsudats racinaires des plantes riches en sucres, composés phénoliques et acides aminés. C'est la raison pour laquelle les champignons mycorhiziens arbusculaires nécessitent la présence des racines de la plante hôte, pour se développer (Giovanetti *et al.*, 1993).

Koske et Gemma (1992) suggèrent que la croissance fongique est stimulée par des composés volatils, contenus dans les exsudats racinaires, notamment le CO₂, comme source de carbone.

Dans le sol, la germination de la spore est sous le contrôle de plusieurs facteurs externes tels que l'humidité, la température, le pH, la salinité et endogènes, tels que le stade de maturation, la dormance et la taille de la spore (Gemma et Koske, 1988).

3.9.2. Formation de l'appressorium et colonisation de la racine

Après germination, les spores développent un mycélium fongique. Ce dernier entre en contact avec la racine, ce qui permet la formation des structures appelées appressoria, dont le rôle réside dans la propagation du mycélium intraracinaire (Giovannetti et *al.*, 1996). Les mycéliums pénètrent et se développent entre les cellules du rhizoderme et colonisent les parties superficielles du cortex racinaire (Smith et Read, 1997). L'infection a lieu dans la zone d'élongation de la racine, ce qui influence l'apparition des racines latérales qui, à leur tour, sont infectées et permettent l'extension de la mycorhize (Fig.10).

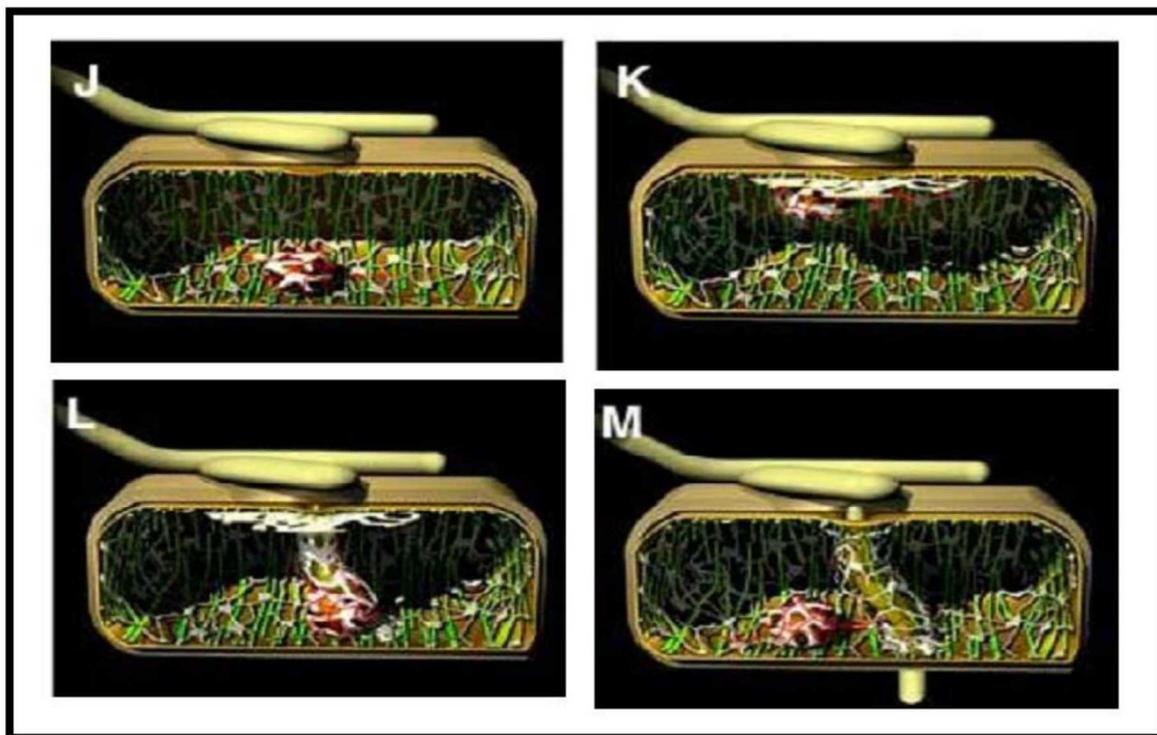


Figure 10 : schéma décrivant le mécanisme de pénétration du champignon mycorhizien dans la racine et la formation de l'appareil de pré-pénétration (d'après Genre et *al.*, 2005)

J : contact entre le champignon et une cellule épithéliale de la racine au niveau de l'appressorium

K : au contact du champignon, le noyau (n) de la cellule végétale migre à la surface de la

racine, à proximité de l'appressorium.

L : en migrant vers la face basale de la cellule, le noyau entraîne la formation d'une structure tubulaire riche en cytosquelette et en réticulum endoplasmique : l'appareil de pré-pénétration

M : un hyphes du champignon (Hp) traverse la cellule végétale et pénètre la racine par l'intermédiaire de : l'appareil de pré-pénétration (PPA).

Code couleur : vert ; microtubules, rouge ; micro-filaments d'actine ; blanc ; réticulum endoplasmique.

3.9.3. Formation des arbuscules

Une ramification du mycélium dans les cellules, au contact de l'endoderme, permet l'élaboration des arbuscules qui ont comme rôle, d'augmenter la surface de communication entre le mycélium fongique et la cellule hôte, via l'invagination du plasmalemme. Cette surface, appelée interface arbusculaire est le siège favorisé des échanges entre les deux partenaires.

Deux types de colonisation racinaire sont généralement différenciées en fonction de la structure de l'arbuscule :

- Le type *Arum* et le type *Paris*. Le type *Arum* se distingue par une phase intercellulaire de croissance d'hyphes et une production d'arbuscules terminaux sur les branches d'hyphes intracellulaires.
- Le type *Paris* se caractérise par une croissance d'hyphes intracellulaires considérables, formant des enroulements et portant des petits arbuscules. (Smith et Read, 1997)

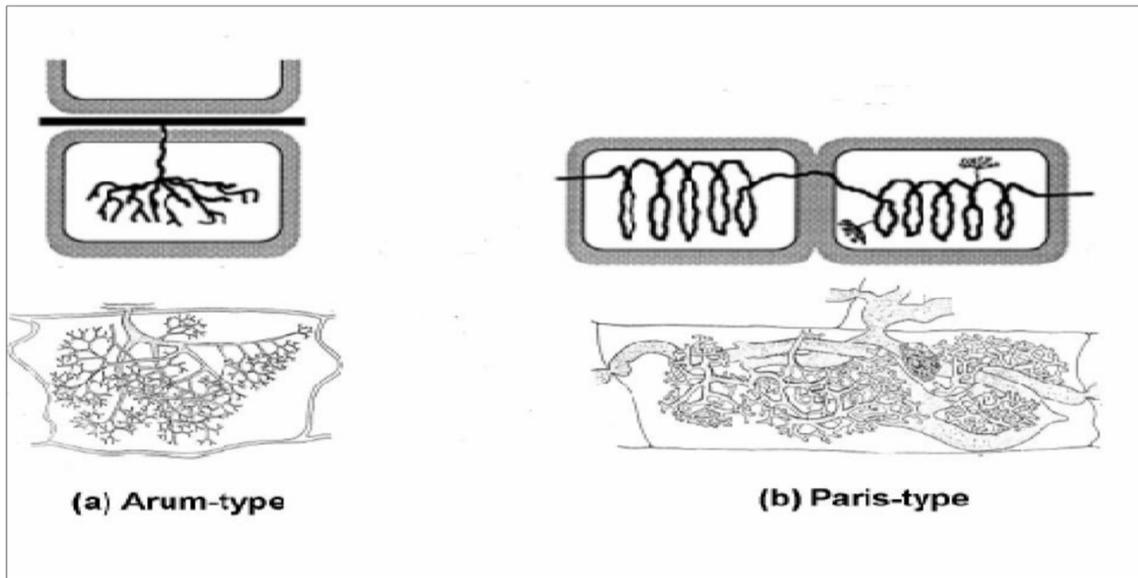


Figure 11: types de colonisation racinaire des champignons mycorhiziens à arbuscules
(D'après Smith et Smith, 1997)

3.9.4. Formation de vésicules

Le renflement du mycélium qui progresse dans et entre les cellules racinaires aboutit à la formation des vésicules (Fig.12 et 13), qui ont des formes ovoïdes, possédant plusieurs noyaux et des lipides. Lors de la sénescence de la racine, les vésicules sont débarrassées dans le sol, où elles peuvent générer de nouvelles mycorhizes (Haddouche,2017).

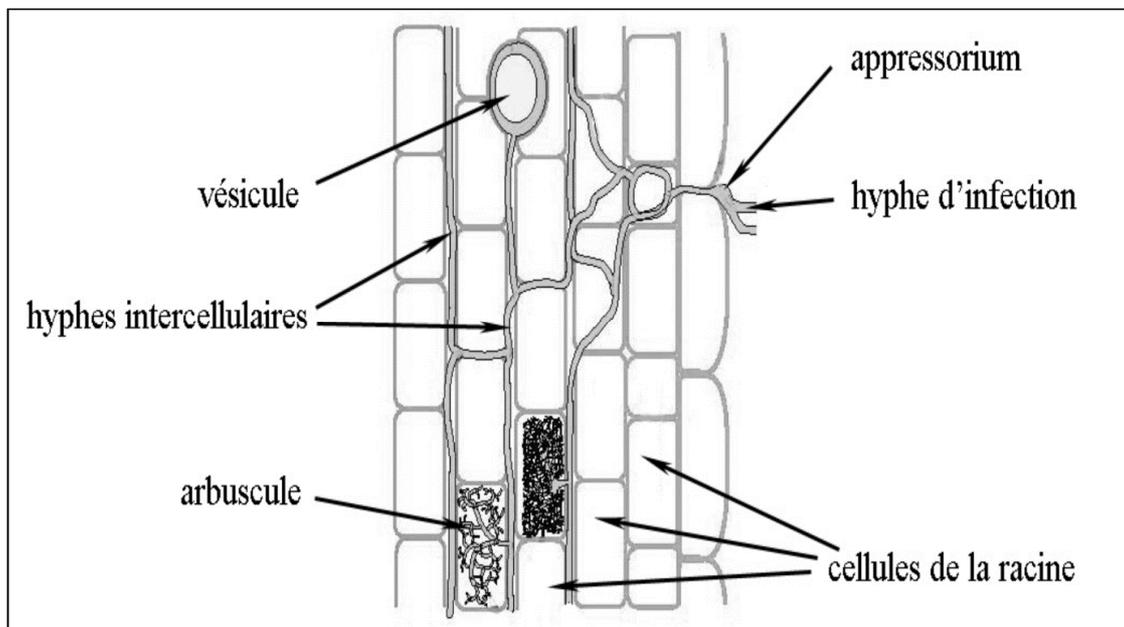


Figure 12 : prolifération des hyphes, formation des arbuscules et des vésicules (Brundret et *al.*, 1996).

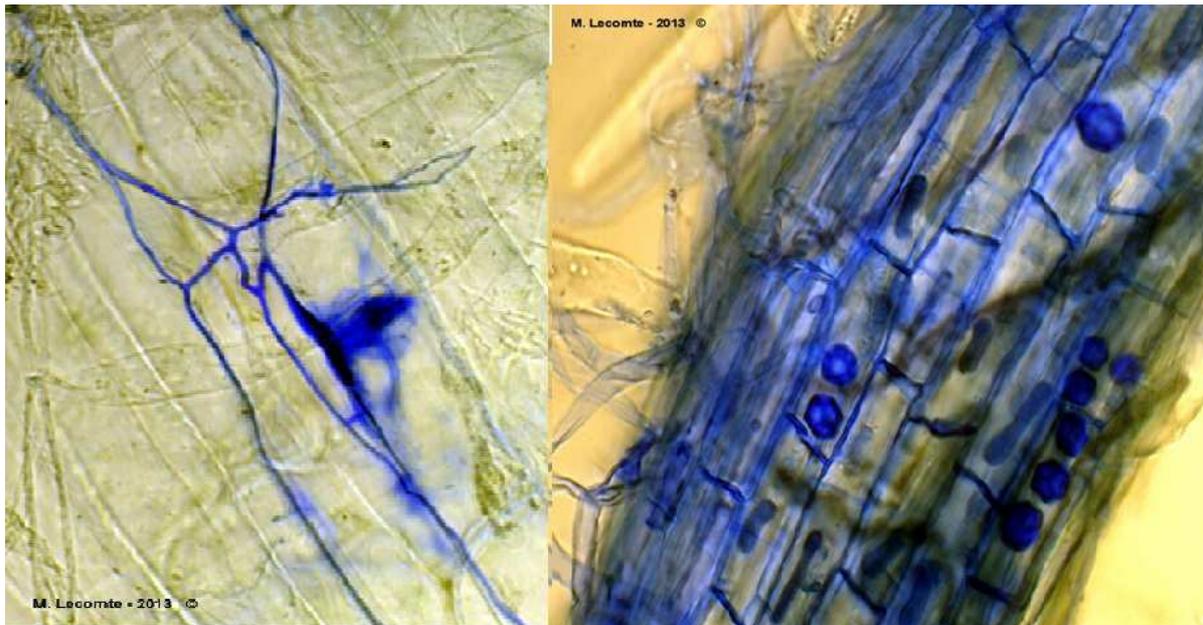


Figure 13: vésicules du champignon endomycorhize (M.Lecomte ,2013).

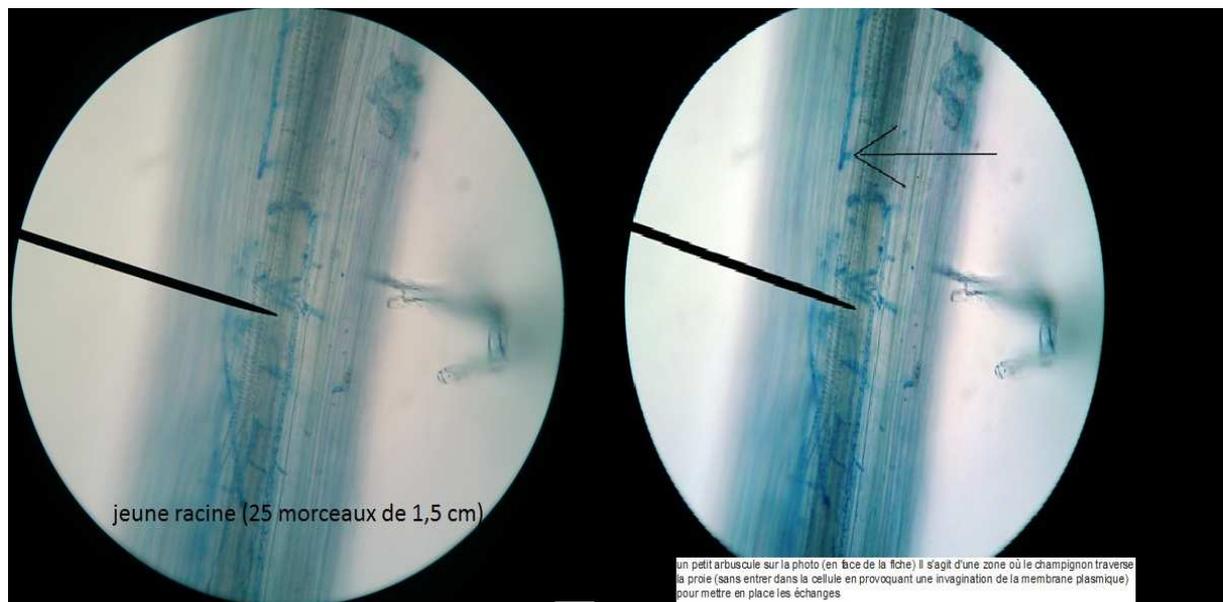


Figure 14 : un petit arbuscule sur la photo (en face de la flèche) Il s'agit d'une zone où le champignon traverse la proie (sans entrer dans la cellule en provoquant une invagination de la membrane plasmique) pour mettre en place les échanges.

3.10. Intérêts de la mycorhization

De nombreux auteurs rapportent que les mycorhizes stimulent la croissance des végétaux ce qui serait dû à une meilleure alimentation hydrique et minérale (Zoulim,2017). ce

qui entraîne une croissance végétale améliorée. Il a également été démontré que les mycorhizes augmentent l'absorption d'eau et / ou modifie d'une autre manière la physiologie de la plante pour réduire la réponse au stress à la sécheresse du sol (R.G Linderman).

Les mycorhizes améliorent également la stabilisation des agrégats du sol. Cette stabilisation se produit par deux mécanismes : le mycélium des mycorhizes par son enchevêtrement et sa sécrétion d'une substance glyco-protéique appelée la *glomaline*, permet de lier les agrégats du sol entre eux (Douds, 2004 in Ouldkaci et al. ,2016).

3.11. Intérêt d'une symbiose mycorhizienne pour le Blé

Les intérêts de cette symbiose sont importants pour la plante hôte.

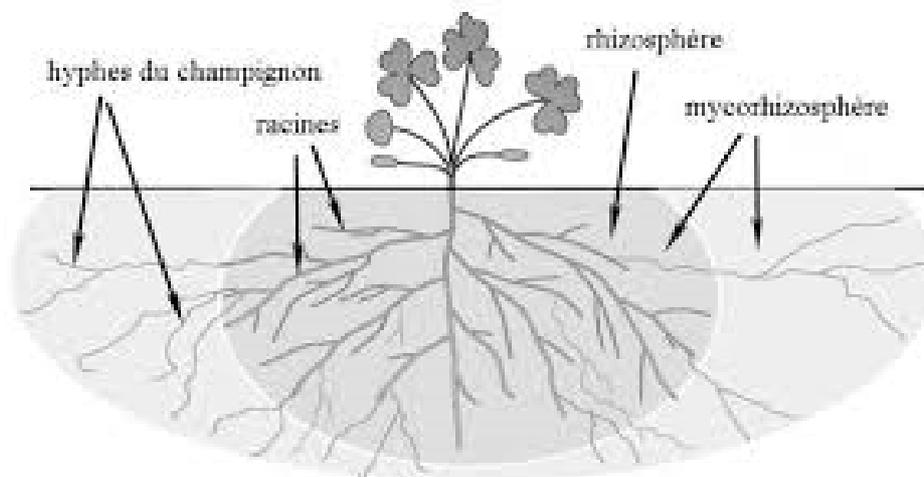


Figure 15 : Schéma représentant l'importance des hyphes des mycorhizes sur l'extension racinaire (www.smnf.fr)

Premièrement, leurs hyphes sont souvent considérés comme une extension des racines. En effet, on peut trouver 2 à 25 km d'hyphes par km de sol en fonction des pentes cultivés, des conditions météorologiques et de l'activité de l'Homme sur le sol (Eckhard, 2000). Grâce à son réseau mycélien à l'intérieur de la racine mais surtout à l'extérieur, le volume de sol exploré par le champignon est bien plus grand que celui parcouru par les racines seules. Il peut donc avoir accès à des ressources supplémentaires en eau et en éléments minéraux qui sont transmis ensuite à la plante hôte au niveau des racines. De plus, le réseau mycélien peut s'étendre dans le sol jusqu'aux racines voisines et donc mettre en relation toute une communauté de plantes dont les transferts de nutriments sont possibles via les hyphes (Figure : Extension racinaire).

Le principal avantage pour la plante est donc une meilleure nutrition hydrique et minérale en particulier en phosphate (Smith & Read, 2008). En fonction de l'association plante champignon, l'interaction peut conduire à une augmentation des teneurs en phosphate dans les tissus et/ou favoriser la production de biomasse (Grunwald et al., 2009). Dans la plupart des sols, le phosphate est un facteur limitant (Brito et al., 2008) et difficilement accessible pour la plante. Les mycorhizes possédant des phosphatases acides et basiques peuvent dégrader la matière organique proche. Le phosphate est transmis à la plante sous forme de polyphosphate au niveau des arbuscules (Nouaim and Chaussod, 1996). La plante fournit également au champignon du carbone sous forme de sucres. La part de sucres impliquée dans la symbiose représente généralement de 4 à 20% du carbone issu de la photosynthèse (Harrison, 1997 ; Brioto et al., 2008). En effet, une carence en phosphate entraîne une accumulation de sucres et d'amidon dans les feuilles (Hammond & White, 2008). Le transport des sucres contenus dans les feuilles via le phloème vers les racines en développement précède et participe à la mise en place d'une partie des réponses à la carence.

Enfin la mycorhization augmente la capacité d'absorption des éléments nutritifs, augmente la résistance envers les stress (maladies, sécheresse, salinité, chocs de transplantation), améliore la croissance, le rendement, la vigueur et l'établissement des végétaux et joue un rôle majeur dans l'agrégation des particules du sol.

Conclusion

L'objectif global assigné à cette recherche bibliographique est d'améliorer la compréhension du comportement des sols sous l'agriculture de conservation (AC), comme mode d'adaptation au changement climatique en milieu semi-aride. Elle a été orientée essentiellement vers l'étude de l'effet du semis direct (SD) et la rotation culturale sur les propriétés physico-chimiques et biologiques des Terres et sur leurs productions agricoles. En effet ces techniques de conservation présentent plusieurs intérêts, qui engendrent l'amélioration des performances économiques, environnementales des systèmes de production.

Ces performances reviennent à l'amélioration des propriétés des sols ainsi que le rendement des cultures, une diminution des émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, l'atténuation et l'adaptation au changement climatique et une meilleure utilisation des services écosystémiques qui augmentent la fertilité des sols. En effet l'insertion du pois fourrager dans le système de culture du blé, lui donne une meilleure efficacité de prélèvement de N, car le pois fourrager, a la particularité de pouvoir être cultivés sans utiliser d'engrais azotés, et d'être une source d'azote au niveau du système de culture. Cette propriété leur confère un rôle particulier dans la gestion des flux d'azote au sein des systèmes de culture, et dans les bilans environnementaux qui en découlent. Leur intérêt réside également dans l'amélioration de la structure du sol grâce à l'approfondissement de leur système racinaire à différents niveaux dans le sol.

Il en résulte également sous l'effet du semis direct, une mycorhization plus importante des racines du blé. Ces symbiotes fongiques sont les principaux composants du sol qui interviennent dans le déroulement des principaux cycles biogéochimiques des sols. En effet ces champignons favorisent l'acquisition d'eau et du phosphore qui confère une meilleure résistance aux stress et de meilleurs rendements pour le blé.

Articles consultés :

- **Abdelkader Djermoun**, la production des céréales en Algérie : les principes caractéristiques, Revue Nature 1 juin 2009 , p 45 à 53.
- Abdellaoui Z ; TESKRAT H ; Belhadj A et Zaghouane O, 2010.** Étude comparative de l'effet du travail conventionnel, semis direct et travail minimum sur le comportement d'une culture de blé dur dans la zone subhumide. Options méditerranéennes. Série A. Numéro 96 : pp71-87.
- Ait,S et Ait,K** , ‘ 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, ,2008.
- **Amira et Fadel, 2013.**La Sélection Variétale du Blé Dur à Partir des Paramètres Technologiques.
- Barbara Mosse**”Mycorrhiza in a Sustainable Agriculture ; Biological Agricul/Ure and Horticulture, 1 986, Vol 3, pp. 1 9 1 -209.
- Baylis, 1970 New Phytol. (1967) 66, 231-243.** EXPERIMENTS ON THE ECOLOGICAL SIGNIFICANCE OF PHYCOMYCETOUS MYCORRHIZAS BY G. T . S. BAYLI S Botany Department, University of Otago {Received 10 October 1966}.
- Belaid D., 1996.** Aspects de la céréaliculture Algérienne. Ed. Office des publications universitaires, Ben-Aknoun (Alger), 206 p.
- **Benabdellah, M,2016.** Les caractères et les effets d'une fertilisation biologique par le grignon d'olive sur le rendement des cultures des céréales.
- Benniou R., 2008.** Les systèmes de production dans les milieux semi-arides en Algérie: analyse agronomique de leur diversité et des systèmes de culture céréaliers dans les Hautes Plaines Sétifiennes. Thèse de Doctorat, INA-Alger ; 293 p.
- Ben-Salem H., L. Zaibet, et M. Ben-Hammouda. 2006.** Perspectives de l'adoption du semis direct en Tunisie. Une approche économique. Options Méditerranéennes, Série A, Numéro 69,pp69-75.
- Bonfante-Fasolo P (1984),** Anatomy and morphology of VA mycorrhizae, In VA mycorrhiza, Powell, CL et Bagayaraj, DJ, CRC Press, Boca Raton, 5-33.

- Boutra et Haouam,2017** ; Etude du système de production utilisée en zone nord de Constantine cas du réseau d'amélioration du blé dur.
- Bouzerzour H., S. Mahnane, M. Makhlouf, 2006**. Une association pour une agriculture de conservation sur les hautes plaines orientales semi-arides d'Algérie. Options Méditerranéennes, Série A, Numéro 69.pp 107-111.
- **Brink M, Belay G. 2006**. Céréales et légumes secs, ressources végétales de l'Afrique tropicale. Fondation Prota, Wageningen, Pays-Bas. P:102
- **Broughton, W.J. et Dilworth, M.J. 1971**. Control of leghemoglobin synthesis in snake beans. Biochemistry Journal, 125: 1075-1080.
- **Chabane,2014** ; ELABORATION D'UN SYSTEME D'INFORMATION SUR L'AGRICULTURE DE CONSERVATION DANS LA WILAYA DE SETIF.
- **Campbell R., Greaves M. P. (1990)**. Anatomy and community structure of the rhizosphere. In: the rhizosphere. Lynch I. M. (Eds). Wiley Series in Ecological and Applied Microbiology. 11-34.
- **Chaillou S., 2008** : Développement racinaire, fonctionnement de la rhizosphère et nutrition minérale.pp : 1-6.
- Curl E A., Truelove B. (1986)**. The rhizosphere, Advanced series in agriculture sciences. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 288.
- Diop T.A., Plenchette C., and Strullu D.G., 1994**. *In vitro* culture of sheared Mycorrhizal roots, Symbiosis. 17:217-227.
- **Dodd, J.C. (1994)**. Approaches to the studyof the extraradical mycelium of arbuscular mycorrhizal fungi. Dans :*Impact of arbuscular mycorrhizas on sustainableagriculture and natural ecosystems*, Gianinazzi, S. et Schüepp,H. (éds). BirkhauserVerlag, Basel, Switzerland, pp. 147-166.
- **DommerguesY.,F.Mangenot. (1970)**. Ecologie Microbienne du sol. Eds. Masson et Cie, Paris, 796 p.
- **Duc G., Mignolet C., Carrouée B., Huyghe C., 2010**. Importance économique passée et présente des légumineuses : rôle historique dans les assolements et facteurs d'évolution. Innovations Agronomiques 11, 1-24.

- Duhoux et Nicole M., 2004.** Atlas de biologie végétale : Association et interactions chez les plantes .Ed. Dunod, Paris. 166 p.
- Escribano J., 2006.** Étude des effets de l'agriculture de conservation par rapport à l'agriculture traditionnelle. Options Méditerranéennes, Série A, Numéro 69.pp 57-61.
- Feddal ,2015 ;** problématique de l'introduction des techniques culturales simplifiées pour la mise en place des grandes cultures en Algérie
- **Fortin JA,Plenchette C, Piche Y (2008),** les mycorhizes la nouvelle révolution verte, édition Multi Mondes.
- **Frank AB (1877),** Über die biologischenVerhältnisse des Thallus einigerKrustenflechten.— Beiträgezur Biologie der Pflanz en , vol. 2, pp. 123-2 00.
- Franzluebbers A.J., Hons F.M. et zuberer D.A. 1995.**Tillage and crop effects on seasonal soil carbon and nitrogen dynamics. SoilSci. Soc. Am.J., 59, 1618-1624.
- Gagné S., Antoun H., Richard C. (1985).**Inhibition of phytopathogenic fungi by bacteria from soils and legume rhizosphere. Canadian Journal of Microbiology. 31:856-860.
- G. Andrade¹, K.L. Mihara², R.G. Linderman² and G.J. Bethlenfalvay^{2,3}** Soil aggregation status and rhizobacteria in the mycorrhizosphere” *Plant and Soil* **202**: 89–96, 1998.
- **Gemma J.N., and Koske R.E., 1988.** Seasonal variation in spore abundance and dormancy of *Gogaspora gigantean* and in mycorrhizal inoculums potential of a dune soil. Mycologia. 80: 211-216.
- Gianinazzi, S. et al., 2010.** Agroecology: The key role of arbuscular mycorrhizas in ecosystem services. *Mycorrhiza*, 20(8), pp.519–530.
- Giovanetti M., Avivio L., and Sbrana C., 1993.** Factors affection appressorium developmentin the vésicular-arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus mossae*. New phytologist. 123: 114-122.
- **Giovannetti M., Sbrana C., Citernesi A.S., and Avio L., 1996.** Analysis of factors involved in fungal recognition responses to host derived signals by arbuscular mycorrhizal fungi. New Phytologist. 133: 65-71.

- **Gouasmi et Badaoui,2017** ; Etude biochimique de l'influence du séchage sur la valeur nutritionnelle de deux variétés de blé dur Algériennes (Bousseleme et Siméto).
- **Hacini, N,**''Etude de l'interaction Génotype X Environnement et effet de l'origine de quelques cultivars de blé dur (*Triticumdurum*Desf.) sur les aptitudes adaptatives et qualitatives'', Thèses de doctorat, département de biologie, Université BADJI Mokhtar de Annaba, 2014.
- Haddouche,2017** ; Contribution à l'étude des symbioses mycorhiziennes chez le pistachier de l'Atlas (*Pistaciaatlantica*Desf.) : cas de la population de dayate Saadi Hassi-Delâa (wilaya de Laghouat).
- **Hamza,2014** ; Application des mycorhizes arbusculaires en culture maraîchère cas de la pastèque (*Citrulluslanatus*).
- **Harley JL (1989)**, The significance of mycorrhiza. *MycologicalRecherch*92: 129-139.
- Impact des incendies sur les caractéristiques de la rhizosphère : cas d'une subéraie mise en défens (**Taksebt, Zekri**)(**Melle Khelfaoui Lamia Melle Saad Lynda**).
- **Jayachandran K., Schwab A.P. et Hetrick B.A.D. (1992)**. Mineralization of organic phosphorus by vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Siololy and Biochemistry*, 24 : 897-903.
- **Jean-François Briat, Dominique Job**.Les sols et la vie souterraine : Des enjeux majeurs en agroécologie .
- **J.M.Gobat, M. Aragno, W. Matthez. (2003)**. Le sol vivant : bases de pédologie biologique des sols. Presses Polytechniques et Universitaires, Lausan. 5-6p.
- **Kadir, N,**''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, 2015.
- **Kassam A et Friderich T, 2010**. Conservation Agriculture: Concepts, worldwide experience, and lessons for success of CA-based systems in the semi-arid Mediterranean environments. *Options Méditerranéennes*, A n°. 96, 2010. 41p.

- Labreuche J., T. Viloingt, D. Caboulet, J.P. Daouze, R. Duval, A. Ganteil, L. Jouy, L. Quere, H. Boizard, J. Roger-Estrade, 2007.** Evaluation des impacts environnementaux des Techniques Culturales Sans labour (TCSL) en France. Partie I: La pratique des TCSL en France. ADEME.
- **Lahmar R., 2006.** Opportunités et limites de l'agriculture de conservation en Méditerranée. Les enseignements du projet KASSA Options Méditerranéennes, Série A, Numéro 69.pp 11-18.
- **Lakab,2012 ;** EFFET DE LA FERTILISATION AZOTÉE SUR LA CULTURE DU BLÉ DUR (*Triticum durum* Desf.) VARIÉTÉ « Bousselam » ET SUR LA DÉCOMPOSITION DE LA MATIÈRE ORGANIQUE EN SEMIS DIRECT DANS LA REGION SEMI-ARIDE DE SÉTIF.
- **LI L, HUANG G, ZHANG R, BILL B, GUANGDI L et KWONG Y-C, 2011.** Benefits of Conservation Agriculture on Soil and Water Conservation and Its Progress in China. *Agricultural Sciences in China* 2011, 10(6): pp 850-859.
- Lambers H, Mougel C, Jaillarrd B, Hinsinger P (2009),** Plant-microbe-soil interactions in the rhizosphere: an evolutionary perspective. *Plant Soil*. 321: 83-115.
- Maalem Ahlem, SansriDalal. (2014).** Activité anti-phytopathogènes de quelques souches rhizosphériques appartenant aux groupes des actinomycètes filamenteux et des *Pseudomonas spp fluorescents*. Université 8 Mai 1945 Guelma. 22p.
- **Marschner H. 1995.** Mineral nutrition of higher plants, 2nd edn. London: Academic Press.
- **Masmoudi,2012 ;** Etude de certains paramètres de durabilité des systèmes de production céréaliculture-élevage dans le contexte de l'intégration des techniques de l'agriculture de conservation.
- **Mosse, B. (1973).** Advances in the study of Vesicular-Arbuscular Mycorrhiza. *Annual Review of Phytopathology*, 11 : 171-196.
- Mousain D., MatumotoPintro P et QuiquampoixH ., 1997 :** le Role des mycorhizes dans la nutrition phosphatée des arbres forestiers. Laboratoire de recherches sur symbiotes des recines .Ed. INRA de Montpellier.15p.

- **Mouas Bourbia, Sophia.** (2012). Biodisponibilité du potassium dans la rhizosphère de *Olea europea L.* Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou. 19-20p.
- **Moule C., 1971.** Céréales 2. Phytotechnie spéciale. (Ed). La maison rustique, Paris, 236p.
- **Nadjem, K,** “ 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.”, mémoire de magister, département des sciences agronomiques, Université FERHAT Abbas Sétif ,2012.
- **Nedjah , I,** “Changements physiologiques chez des plantes (Blé dur *Triticum durum* Desf.) exposées à une pollution par un métal lourd (plomb)”, Thèses de doctorat, département de biologie, Université BADJI Mokhtar de Annaba, 2015.
- **Nemecek, T. et al., 2008.** Environmental impacts of introducing grain legumes into European crop rotations. *European Journal of Agronomy*, 28, pp.380–393
- **OELKE E.A., OPLINGER E.S., HANSON C.V., DAVIS D.W., PUTNAM D.H., FULLER E.I., ROSEN C.J. (1991)** :*Dry field pea, Alternative crops manual*, College of Agriculture and Life sciences cooperative extension service, University of Wisconsin-Madison, WI 53706.
- **Oukkal,2014** ;Mis en évidence des symbiotes mycorhizien dans les racines de l'olivier (*oleaeuropeaL.*) après apport de margines sous une oliveraie de l'I.T.A.F de Sidi Aich (Wilaya de Bejaïa).
- **Ouldkaci et Sai,2016** ; L'effet de l'inoculum mycorhiziens sur 2 variétés de blé dur (Bousselam, Siméto) conduit en stress salin.
- **Olsen SR ,Moora M, Liira J, Kõljalg U, Zobel M, Sen R. 2003.** Divergent arbuscular mycorrhizal fungal communities colonize roots of *Pulsatilla* spp. in boreal Scots pine forest and grassland soils. *New Phytologist*160: 581–593.
- **Philippe, Hinsinger.** «Les racines au cœur du fonctionnement de la rhizosphère », In *Montpellier SUPAgro - CirAD - Inra - IrDI*, n°101, mai-juin2010, 17.
- **Raunet M., L. Seguy, C. FovetRabots, 1998.**Semis direct sur couverture végétale permanente du sol : de la technique au concept. Document obtenu sur le site Cirad du réseau

<http://agroecologie.cirad.fr>. 23-28 mars 1998, Anae, Cirad, Fafala, Fifamanor, Fofifa, Tala. Montpellier, France, Cirad, collection Colloques, 658 p.

-**R.AZCON ET J. A. OCAMPO**1980.FACTORS AFFECTING THE VESICULARARBUSCULAR INFECTION AND MYCORRHIZAL DEPENDENCY OF THIRTEEN WHEAT CULTIVARS. *New Phytol*(1981) 87, 677-685

-**R.G Linderman**. “Mycorrhizal interaction with the rhizosphere microflora: The mycorrhizosphere effect”

- **Rhizosphere**: A new frontier for soil biogeochemistry Philippe Hinsinger *, Claude Plassard, Benoît Jaillard *Journal of Geochemical Exploration* 88 (2006) 210 – 213.

- **Schroder P, Hartmann A.** (2003). Global Soils: New Developments in Rhizosphere Research. *J. Soils & Sediments* 3 (4). 227p.

- **Smith S.E., and Read D.J., 1997.** Mycorrhizal symbiosis. San Diego. CA, USA: Academic Press.

- **Smith SE, Read DJ (1997),** Mycorrhizal symbiosis. Second edition. Academic Press ; Harcourt Brace and Company Publishers, 605p.

-**Sol : interface fragile**,De Pierre Stengel, Sandrine Gelin1998.

-**Strudley M.W., Green, T.R. and Ascough, J.C., 2008.** Etude des états de surface du sol et de leur dynamique pour différentes pratiques de travail du sol. Mise au point d'un indicateur de ruissellement, Thèse de doctorat : université de Strasbourg, 73-38 p.

-Studie van de bacteriële diversiteit van de rhizosfeer van *Lactuca sativa* en *Fragaria ananassa* in functie van de ziekte weerbaarheid ,Academiejaar 2013 – 2014 ; ir. Caroline De Tender.

- **Tayeb- bey et Yahiaoui,2017 ;** Comparaison de l’effet de différentes techniques de travail du sol:(travail conventionnel, technique culturale simplifiée et semis direct) sur la production de blé dur (*Triticum durum*.L.) en zone semi-aride. Région de Sétif.

-**Tommerup IC (1984),** Persistence of infectivity by germinated spores of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi in soil. *Trans Br Mycol Soc* 82:275–282.

- **Véronique, B. Vincent L. 2019.** Les atouts du pois. Ed v.biarnes@terresinovia.fr;
Vincent LECOMTE (v.lecomte@terresinovia.fr)

- **Vertès, F. et al., 2010.** Connaître et maximiser les bénéfices environnementaux liés à l'azote chez les légumineuses, à l'échelle de la culture, de la rotation et de l'exploitation.
Innovations agronomiques, 11, pp.25–44.

- **Voisin, A.-S. et al., 2013.** Legumes for feed, food, biomaterials and bioenergy in Europe: a review. *Agronomy for Sustainable Development*

- **Westover K.M., Kennedy A.C., Kelley S.E. (1997).** Patterns of rhizosphere microbial community structure associated with Co-occurring plant species. *Journal of Ecology*. 85: 563-873.

- **Wezel, A. et al., 2014.** Agroecological practices for sustainable agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(1), pp.1–20.

- **Xanxo L., A. Solans, C. Cantero-Martínez , 2006.** Système de production de cultures fourragères en semis direct dans la zone de la Seud'Urgell, à Lleida, en Espagne. *Options Méditerranéennes, Série A, numéro 69*: pp: 7-36.

- **Zoulim, 2017 ;** Etude de la réponse de deux variétés de blé dur (*Triticum turgidum*) soumises à un stress salin en présence d'un inoculum mycorhizien.

Sites consultés :

- http://www.biophyt.ch/documents/cours_paris.pdf.

- <http://www.nature.com/nrmicro/journal/v11/n11/full/nrmicro3109.html>.

<https://www.google.com/url?sa=i&url=http%3A%2F%2Fwww.souvenirsdephotographe.fr%2Fannexe1.html&psig=AOvVaw0HIcvHS0wrsCgTgan0O2CB&ust=1607820652999000&source=images&cd=vfe&ved=0CAMQjB1qFwoTCNiD3emcx-0CFQAAAAAdAAAAABAD>

(anonyme 1)

- <https://www.google.com/url?sa=i&url=http%3A%2F%2Fdocplayer.fr%2F58981527-Republique-algerienne-democratique-et-populaire-universite-hassiba-benbouali-chlef-faculte-des-sciences-agronomiques-et-sciences-biologiques.html&psig=AOvVaw3cmds8AUdoaA7WfyD1LB4E&ust=1607815015434000&>

[source=images&cd=vfe&ved=0CAMQjB1qFwoTCNCcwteex-0CFOAAAAAdAAAAABAD](https://www.google.com/search?source=images&cd=vfe&ved=0CAMQjB1qFwoTCNCcwteex-0CFOAAAAAdAAAAABAD)

(anonyme 2)