

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



Mémoire de Fin d'Etudes

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

Filière : biotechnologie

Spécialité : Biotechnologie et Valorisation des Plantes

Thème

**Biodisponibilité du phosphore dans la
mycorhizosphère de l'orge (*Hordeum vulgare* L.)
(variété Fouara) sous climat semi-aride**

Présenté par

ELKECHAI OUSSAMA

Présenté devant le jury composé de :

Président : Mr LIMANE A.

M.C.B.

UMMTO

Promoteur : Mme BOUDIAF NAIT KACI M.

M.C.A.

UMMTO

Co-promoteur : Mme MADI DJEDID N.

DOCTORANTE

UMMTO

Examinatrice : Mme MOHAMED OUALI D.

M.A.A.

UMMTO

Remerciements

Au terme de ce modeste travail, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et nos vifs remerciements à :

*Notre promotrice **Mme BOUDIAF NAIT KACI**, M.C.A à l'Université Moloud Mammeri Tizi-ouzou d'avoir dirigé ce travail.*

***Mme Madi Djedid** notre co-promotrice doctorante à l'Université Moloud Mammeri Tizi ouzou pour sa patience, son orientation, son soutien pendant la réalisation de ce travail.*

***Mr Limane**, M.C.B et **Mme Mouhamed Ouali**, M.A.A à l'Université Moloud Mammeri Tizi-ouzou d'avoir accepté d'examiner le travail.*

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont participé directement ou indirectement à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce

mémoire A mes

chers parents,

*pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et
leurs prières tout au long de mes études,*

*A ma très cher sœur yamina pour son appui et son
encouragement,*

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

*A mes amis (es) Rezki abela , Souhil slimi et Anis fernane , Fateh Eljouzi,
ainsi que mes collègues de la promotion 2019/2020.*

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

Merci d'être toujours là pour moi.

ELKECHAI OUSSAMA

Résumé

En Algérie l'orge (*Hordeum vulgare* L.) présente un double intérêt dans l'alimentation humaine et animale surtout dans la région semi-aride, où la sécheresse et la détérioration de la qualité des sols constituent les contraintes agronomiques les plus importantes pour la production céréalière. Dans ce contexte, l'Agriculture de conservation constitue une stratégie efficace pour l'optimisation des rendements et des profits tout en garantissant la fourniture des services et des avantages environnementaux, à travers l'application des techniques agricoles du semis direct, la rotation et l'association des cultures. Ainsi il en découle de ces pratiques, l'amélioration de la fertilité phosphatée des sols grâce à la préservation et la stimulation des interactions plantes-microorganismes, cette stratégie devrait être étudiée en biotechnologie végétal.

Mots clés ; Orge, semis-direct, mycorrhizosphère, phosphore.

Abstract

In Algeria barley (*Hordeum vulgare L.*) has dual interest ; for human and animal nutrition, especially in the semi-arid region, where drought stress and deterioration of soil quality constitute the most important agronomic constraints for cereal production. In this context, Conservation Agriculture constitutes an effective strategy for optimizing yields and profits while ensuring the provision of environmental services and benefits, through the application of agricultural techniques of no-till, rotation and crop diversification, allow the phosphate fertilization of the soil through stimulation of plant-microorganism interactions. This strategy must be studied in biotechnology and valorisation of plants.

Keywords : Barley, no-till, mycorrhizosphere, phosphorus.

Liste des figures

Figure 1 : champ de culture de l'orge.....	3
Figure 2 : classes d'orges selon le degré de fertilité des épillets et la compacité de l'épi.....	6
Figure 3 : Epillet d'orge à deux rangs à gauche et d'orge à six rangs à droite.....	7
Figure 4 : présentation schématique des différentes parties de l'orge.....	8
Figure 5 : les principales parties du grain de l'orge	9
Figure 6 : des images qui montre le jaunissement de la feuille de l'orge (a) et la réduction de la taille des épis (b).....	11
Figure 7 : les différents niveaux de carence en phosphore chez l'orge.....	12
Figure 8 : Carence en potassium pour la plante de l'orge.....	12
Figure 9 : Répartition des climats en Algérie selon la classification de Köppen	14
Figure 10 : Particularités des pratiques de l'agriculture de conservation.....	17
Figure 11 : Cycle du phosphore dans le sol.....	19
Figure 12 : Photo d'ectomycorhize formée de l'association entre une racine et un champignon	25
Figure 13 : Photos des lames observées au microscope (X400).....	25
Figure 14 : Schéma des différentes étapes de colonisation des champignons AV.....	26
Figure 15 : les principaux types mycorhiziens actuels représentés sur une coupe transversale d'une racine modifiée	27
Figure 16 : Schéma représentant l'importance des hyphes des mycorhizes sur l'extension racinaire.....	28

Figure 17 : Schématisation de l'établissement de la symbiose mycorhizienne (A) et du cycle de vie des CMA ((B)	31
Figure 18 : Préparation de la dilution du sol.....	35
Figure 19 : notation de la colonisation mycorhizienne en classe de 0 à 5.....	36
Figure 20 : notation d'abondance arbusculaire.....	37

Liste des tableaux

Tableau 1. Evolution des superficies, productions et rendements de l'orge en Algérie (2000 / 2006).....	4
--	---

Liste des abréviations

N : azote.

P : phosphore.

K : potassium.

Po : phosphore organique.

Pi : phosphore inorganique.

Cm : centimètre.

Mm : millimètre.

Um : micromètre.

AC : agriculture de conservation.

Ca : calcium.

O : oxygène.

Fe : fer.

Al : aluminium.

YI : indice de rendement.

MP : indice de la productivité moyenne.

CMA : champignon mycorhizien à arbuscules.

SSI : indice de sensibilité au stress.

TOL : indice de tolérance.

YSI : indice de la stabilité de rendement.

STI : indice de tolérance du stress.

GMP : indice de la moyenne géométrique.

IAA : acide B-indolacétique.

V : volume.

Résumé

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

SOMMAIRE

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction.....1

Chapitre I. Importance de l'orge

1	Présentation de l'orge	3
2	Production de l'orge	3
2.1	Production mondiale.....	3
2.2	Production de l'orge en Algérie	4
3	Classification et description de l'orge	5
3.1	Systematique de l'orge	5
3.2	Description de l'orge	7
3.2.1	Appareil végétatif.....	7
3.2.1.1	Système aérien	7
3.2.1.2	Système racinaire	8
3.2.2	Appareil reproducteur.....	8
3.2.2.1	Grain.....	8
4	Cycle de développement de l'orge	10
4.1	De la levée au début du tallage	10
4.2	Du début du tallage au début de la montée.....	10
4.3	Montaison (épiage).....	10
4.4	La période de croissance végétative et de maturité.....	10
5	Exigences de l'orge	10

5.1	Azote (N)	11
5.2	Phosphore (P).....	11
5.3	Potassium (K).....	12
6	Importance de la biotechnologie sur l'orge.....	12

Chapitre II. Production de l'orge en agriculture de conservation sous climats semi-aride

1	Climat semi-aride	14
2	Adaptation des cultures au climat semi-aride	15
3	Sélection des variétés d'orges résistantes au climat semi-aride.....	15
4	Techniques d'agriculture de conservation appliquées en région semi-aride	16

Chapitre III. Phosphore dans le sol

1	Sols sous climat semi-aride.....	18
2	Importance du phosphore en production végétale	18
3	Cycle du phosphore dans le sol.....	18
4	Les formes du phosphore dans le sol.....	19
4.1	Phosphore organique (Po).....	19
4.2	Phosphore inorganique (Pi)	19
5	Acquisition du phosphore par les racines	20
6	Stratégie d'amélioration de la biodisponibilité du P dans le continuum sol-rhizosphère- plante	21
6.1	Sélection des cultivars ou des génotypes plus efficaces pour l'acquisition du P	21
7	Rôle de la biotechnologie dans la biodisponibilité du P.....	22
7.1	Amélioration végétale	22
7.2	Valorisation des différentes formes de phosphore du sol via la stimulation des activités biologiques du sol	22

Chapitre IV. La mycorhization

1	Symbiose mycorhizienne.....	24
2	Différents types de mycorhizes.....	24
2.1	Ectomycorhizes.....	24
2.2	Endomycorhizes.....	25
2.2.1	Endomycorhizes a vésicules et arbuscules.....	26
2.2.2	Endomycorhizes à pelotons d'hyphes cloisonnés.....	26
2.3	Ectendomycorhizes.....	26
3	La mycorhizosphère.....	27
4	Importance de l'association mycorhizienne.....	28
4.1	Amélioration des rendements.....	28
4.2	Amélioration des propriétés hydrique du sol.....	29
4.3	Absorption des éléments minéraux.....	29
4.4	Production de substances de croissance.....	29
4.5	Améliorations des propriétés physiques du sol.....	30
5	Impact de l'agriculture de conservation sur les champignons mycorhiziens.....	30
6	La colonisation des racines de l'orge par le champignon mycorhizien a arbuscule.....	30
7	Rôle des mycorhizes dans l'augmentation de la biodisponibilité du phosphore pour la plante.....	32

Chapitre V. Matériel et méthodes

1	Coloration des racines de l'orge.....	34
2	Méthodes utiliser pour l'identification des mycorhizes.....	34
2.1	Observation directe.....	34
2.2	Technique d'immersion.....	34
2.3	Méthode de la plaque de sol de Warcup.....	34

2.4	Méthode de la plaque de dilution	35
3	Méthode de quantification de la colonisation mychorizienne	35
4	Estimation du phosphore des sols assimilables par les plantes.....	37
5	Dosage du phosphore assimilable	37
	Conclusion et perspectives.....	38
	Références bibliographiques.	

Introduction

Introduction

En régions semi-arides, l'Orge (*Hordeum vulgare* L.) est soumis à une multitude de stress abiotiques, dont l'eau est le principal facteur limitant. Par conséquent, la recherche agronomique vise à sélectionner des géotypes à haut potentiel de rendement et à la productions plus régulières, peu sensibles aux variations climatiques d'un lieu de production à l'autre, et d'une année à une autre (Madic *et al.*, 2012). Elle vise également toute approche aboutissant à une meilleure valorisation des faibles précipitations reçues (Papathanasiou *et al.*, 2015 ; Hamli *et al.*, 2018). Dans ce contexte une nouvelle approche est apparue sous le nom d'Agriculture de Conservation (AC) dont le but principal est l'augmentation des rendements tout en préservant la ressource en sol et en eau. L'AC est basée sur les principes de semis direct, la rotation des cultures, et une couverture permanente du sol. Son objectif principal est d'améliorer la production agricole tout en préservant la fertilité des sols.

La fertilité du sol est définie comme sa capacité, dépendant des réserves naturelles de substances nutritives et de la quantité d'eau disponible, à nourrir les plantes et les animaux. Elle est influencée par les formes d'utilisation de la terre. L'activité des organismes vivants dans le sol joue un rôle particulièrement important dans cette fertilité (Menasseri-Aubry, 2015). Ainsi, les systèmes de cultures mettent en avant, le rôle des processus naturels inhérents au sol pour la fourniture d'éléments assimilables par la culture en place (Berner *et al.*, 2013 ; ITAB, 2016).

Le phosphore (P) est un composé essentiel du vivant. Il se retrouve notamment dans les acides nucléiques et les protéines. Par conséquent, c'est un élément génétique, énergétique et plastique de la matière vivante. Il favorise la croissance de la plante, son action étant conjuguée à celle de l'azote, le développement des racines, la rigidité des tissus, la reproduction et la qualité des produits végétaux. Dans le sol, le phosphore est lié à la matière organique et à la fraction minérale du sol (Gavériaux, 2012). Sa concentration dans la solution du sol est faible (UNIFA, 2016).

Cette réserve doit donc être constamment renouvelée afin de satisfaire la nutrition phosphatée de la culture. Pour ce faire, les plantes ont évolué pour élaborer des mécanismes facilitant l'acquisition du phosphate ; la formation d'associations symbiotiques avec les champignons du sol est une de ces stratégies (Karandashov et Bucher, 2005).

La contribution des champignons mycorrhiziens à arbuscules (CMA) dans la fertilité phosphatée des sols vient principalement de leur capacité à explorer un plus grand volume de sol grâce à l'établissement de nombreux hyphes donnant ainsi accès à une ressource en P supérieure pour la plante. Secondairement, et de manière plus faible, les CMA peuvent participer à rendre bio-disponible le P du sol grâce aux phosphatases qu'ils excrètent ; il s'agit d'enzymes qui dégradent le phosphore organique en orthophosphates. Les ions phosphates absorbés par les CMA ont trois allocations possibles : une partie est utilisée par le champignon, une autre partie est cédée à la plante via l'interface arbusculaire, et le reste est mis en réserve dans les vacuoles du CMA sous forme de polyphosphates (Gavériaux, 2012). Les CMA semblent donc potentiellement bénéfiques à la plante hôte en augmentant le prélèvement des ions phosphates pour la plante (Gosling *et al.*, 2006).

Les plantes ont développé divers mécanismes qui leur permettent de faire face à une carence en P et d'augmenter l'acquisition de cet élément. Les mécanismes comprennent des

Introduction

modifications de la croissance et de l'architecture des racines (White et *al.*, 2005), ainsi que la libération d'exsudats racinaires et les associations avec les microorganismes du sol (White et Hammond 2008 ; George et *al.*, 2011 b).

L'objectif de cette synthèse bibliographique est de comprendre les stratégies adoptées par *Hordeum vulgare* L. conduit avec des techniques d'agriculture de conservation sur des sols dégradés sous climat semi-aride. Ce travail s'inscrit dans les thématiques de recherche du laboratoire de recherche Ressources Naturelles de l'UMMTO.

Dans le premier chapitre de ce mémoire, nous présentons l'orge et ces exigences, l'importance de la biotechnologie végétale comme dans le développement de cette espèce. Le deuxième chapitre, s'articule autour de l'adaptation de l'orge sur les sols dégradés sous climat semi-aride en adoptant les techniques d'agro-écologie., Le rôle et l'importance du phosphore pour les plantes et les stratégies des végétaux afin de palier à ces carences, en détaillant les techniques qui seront présentés dans le troisième chapitre.

Le quatrième chapitre, est consacré à l'importance de l'association mycorhizienne pour l'orge (variété Fouara), et son rôle dans la gestion du stress minéral et hydrique. Une conclusion viendra clore ce travail. Et on termine avec un cinquième chapitre dont le quel on va citer le protocole utilisé dans la coloration des racines de l'orge, et les méthodes de l'identification et de quantification des mycorhizes, ainsi le dosage du phosphore assimilable. Une conclusion viendra clore ce travail

Chapitre I

Importance de L'orge

1 Présentation de l'orge

L'orge (*Hordeum vulgare* L.) constitue l'une des ressources alimentaires les plus importantes au monde. Elle est probablement la plus ancienne espèce cultivée par l'homme, sa culture remonte, aux périodes 5000 à 7000 ans avant J.C. (Pochlman, 1985). Des études conduites pour déterminer l'origine génétique, s'accordent à conclure que l'ancêtre sauvage de l'orge commune est probablement *H. vulgare ssp.spontaneum*, qui est encore présent au Moyen Orient et en Afrique du Nord (Bensemane, 2018).

L'orge est une espèce très adaptée aux systèmes de cultures pratiqués en zones sèches. Cette adaptation est liée à un cycle de développement plus court et à une meilleure vitesse de croissance en début du cycle. La culture de l'orge s'insère bien dans les milieux caractérisés par une grande variabilité climatique où elle constitue avec l'élevage ovin l'essentiel de l'activité agricole (Hakimi, 1989 ; Ceccarelli et al. 1998).

Dans les régions du Maroc, Chine, Inde et en Ethiopie l'orge est utilisée pour fabriquer des galettes et du couscous (Grando et al. 2006). Dans certains pays, l'orge trouve une utilisation dans l'alimentation des nourissants, en industrie alimentaire comme adoucissant, adjuvant et surtout comme boissons alcoolisées (Bothmer et al., 2003).



Figure 1 : champ de culture de l'orge (source1)

2 Production de l'orge

2.1 Production mondiale

Aujourd'hui, l'orge est l'une des sept céréales les plus cultivées dans le monde, elle occupe actuellement le quatrième rang dans la production mondiale derrière le maïs, le blé et le riz et avant le sorgho, l'avoine et le seigle ; en 2008, la production mondiale de l'orge était d'environ 138 millions de tonnes produites sur 56,6 millions d'hectares (FAO, 2008).

La production mondiale de l'orge avoisine les 135 millions de tonnes pour une superficie emblavée de près de 57 millions d'hectares. Les pays les plus producteurs au monde durant la période 2010-2011, sont : la Russie, l'Australie, l'Union Européenne l'Ukraine et le Canada (FAO, 2012).

La production mondiale de l'orge en 2016 est de 145,8 millions de tonnes, soit environ 1,6% (4,6 millions de tonnes) de plus que le niveau de 2015 avec des exportations de 3 millions de tonnes d'orge pour l'Australie, l'Union Européenne et l'Ukraine (FAO 2016).

2.2 Production de l'orge en Algérie

Après l'indépendance, l'Algérie a connu une forte dynamique démographique. Une des conséquences de cette pression démographique se vérifie à travers le déséquilibre des ressources agricoles, qui a conduit à une dépendance alimentaire extrêmement forte vis-à-vis de l'étranger, notamment pour les céréales. Cette dépendance revient également aux faibles niveaux de production locale liés aux conditions climatiques et au mode de culture traditionnel appliqué par la majorité des agriculteurs (Bessaoud *et al.*, 2019).

En Algérie, l'orge est classée la deuxième céréale après le blé dur en terme de quantité de production. Elle représente la glycophyte la plus résistante qui mérite une attention toute particulière, grâce à son intérêt dans l'alimentation humaine et animale surtout pour les régions arides et semi-aride et à sa contribution dans la valorisation des sols marginaux. (Tellah *et al.*, 2005).

La culture de l'orge est pratiquée, en Algérie, essentiellement sur les hauts plateaux (Adjel, 2018). Les superficies qui lui sont consacrées varient d'une année à l'autre avec une moyenne, sur plus d'un siècle (1901-2005), de 1 million d'hectares et une production moyenne variant de 1,6 à 18 millions q/an et une moyenne de rendement grain de 6.7 q/ha (Menad *et al.*, 2011). De 2000 à 2006 les superficies variaient de 200.000 à plus d'un million d'hectares, cependant les rendements restaient faibles et variables d'une année à l'autre de l'ordre de 5 à 15 q/ha (**Tab.1**).

Tableau 1. Evolution des superficies, productions et rendements de l'orge en Algérie (2000 / 2006) (MADRP, 2006) :

Période	Superficies (ha)	Production (q)	Rendement (qx/ha)
2000	215630	1632870	7.57
2001	515690	5746540	11.14
2002	401400	4161120	10.36
2003	782380	12219760	15.61
2004	915440	12116000	13.23
2005	684648	10328190	15.08
2006	812280	12358800	15.21

Le total de la production nationale des céréales est de 3,6 millions de tonnes, soit 1 million de tonnes d'orge cultivé dans quinze wilayas (Chlef, O.E.Bouaghi, Bouira, Tlemcen, Tiaret, S.B.Abbes, Guelma, Constantine, Medea, Mascara, Souk-Ahras, Mila, Ain-Defla, A.Temouchent, Relizane) (ONFAA, 2015).

3 Classification et description de l'orge

3.1 Systématique de l'orge

D'après (Chadefaud et Emberger, 1960), (Prats, 1960) et (Feillet, 2000), l'orge cultivée appartient à la classification suivante :

- Règne : Plantae
- Division : Magnoliophyta
- Classe : Liliopsida
- S/Classe : Commelinidae
- Ordre : Poales
- Famille : Poaceae (ex Graminée)
- S/Famille : Hordeoideae
- Tribu : Hordeae (Hordée)
- S/Tribu : Hordeine
- Genre : *Hordeum*
- Espèce : *Hordeum vulgare L.*

Selon Rasmusson (1987), le genre *Hordeum* comprend des espèces diploïdes ($2n=14$) dont les biotypes cultivés comme *Hordeum vulgare*, *Hordeum distichum*, *Hordeum intermedium*, et sauvage comme *Hordeum spontaneum*, *Hordeum agriocrithon* et *Hordeum pusillum*. L'espèce tétraploïde ($2n=28$) est constituée uniquement des biotypes sauvages comme *Hordeum murinum*, *Hordeum bulbosum*, *Hordeum jubatum* et *Hordeum nodosum*.

Selon Grillot (1959) les orges se classe selon le degré de fertilité des épillets et la compacité de l'épi en deux groupes (**Fig.2**).

- Le groupe des orges à six rangs :

Dont les épillets médians et latéraux sont fertiles et qui se subdivise selon le degré de compacité de l'épi en :

-- *Hordeum hexastichum* L. (escourgeon) a un épi compact composé sur chaque axe du rachis de 3 épillets fertiles.

-- *Hordeum tétrastichum* L. à un épi lâche composé sur chaque axe du rachis de 2 épillets fertiles.

- Le groupe des orges à 2 rangs :

Les épillets latéraux sont très rudimentaires et stériles, seul l'épillet central va se développer en grain :

- *Hordeum distichum* L. à un épi aplati et lâche composé de deux rangées d'épillets fertiles, sur chaque axe du rachis, entouré de 4 épillets stériles.

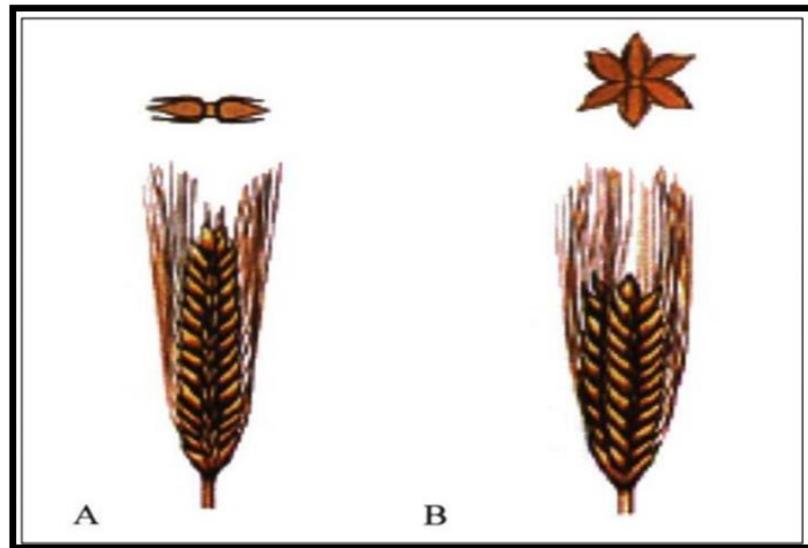


Figure 2 : classes d'orges selon le degré de fertilité des épillets et la compacité de l'épi (Grillot, 1959)

Selon Soltner (2005), les orges sont classées selon leur milieu de culture en trois groupes qui sont :

- Les orges d'hiver dont le cycle de développement varie de 240 à 265 jours, s'implantent en automne.
- Les orges de printemps dont le cycle de développement est très court (environ 120 à 150 jours), s'implantent au printemps.
- Les orges alternatives qui sont intermédiaires au plan tolérance au froid, entre les orges d'hivers et celles de printemps (**Fig.3**).

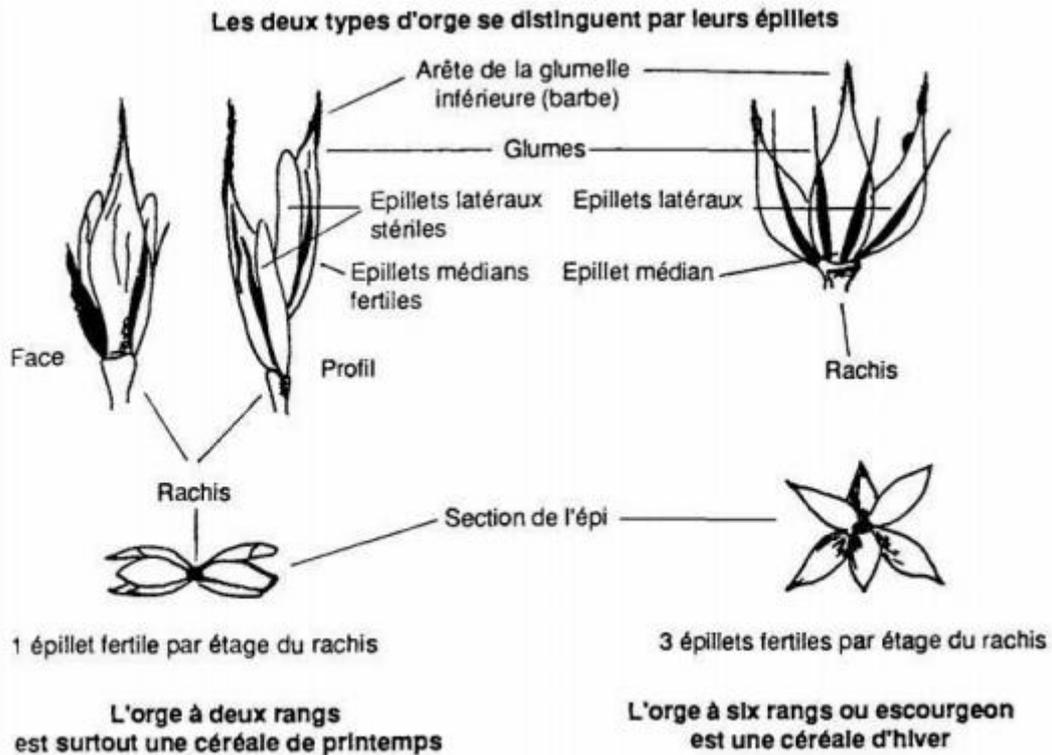


Figure 3 : Epillet d'orge à deux rangs à gauche et d'orge à six rangs à droite (Soltner, 2005).

3.2 Description de l'orge

3.2.1 Appareil végétatif

Selon (Hachi et *al.*, 2005), les graminées sont des plantes herbacées de petite taille, la plante se développe en produisant un certain nombre d'unités : les talles.

3.2.1.1 Système aérien

Sur la partie aérienne de l'orge, on distingue une tige principale « le maître brin » et des tiges adventives « les talles » qui naissent à la base de la plante (Boulal et *al.*, 2007). Quant aux entre-nœuds selon Belaid (1996), ils sont creux chez les blés tendres, l'orge et l'avoine, et pleins chez les blés durs, l'orge est caractérisée par un nombre de talles élevé par rapport au blé tendre (*Triticum aestivum* L.). La hauteur de la tige diffère selon les espèces, les variétés, et les conditions de culture, elle varie de 60 cm à 150 cm (Soltner, 1990).

L'orge est caractérisée par un fort tallage supérieur à celui du blé et un chaume plus faible, susceptible à la verse par rapport à celui du blé (Camille, 1980).

Les feuilles sont à nervures parallèles et formées de deux parties (**Fig.4**) : la partie inférieure entourant la jeune pousse ou la tige : c'est la gaine, la partie supérieure en forme de lame : c'est le limbe qui possède à sa base deux prolongements arqués glabres, embrassant plus ou moins complètement la tige : les oreillettes ou stipules. A la soudure du limbe et de la gaine se trouve

une membrane non vasculaire entourant, en partie, le chaume : la ligule qui est bien développée (Belaid, 1996 ; Camille, 1980).

3.2.1.2 Système racinaire

Il est composé de deux systèmes racinaires successifs :

- Un système séminal, fonctionnel seulement de la levée au début du tallage. Les racines de ce système sont au nombre de six (**Fig.4**), rarement sept (Benlaribi et *al.*, 1990 ; Hazmoune, 2006).
- Un système adventif ou coronal, apparaissant au moment où la plante émet ses talles. Ce système se substitue progressivement au précédent durant l'avancement du cycle biologique des céréales à paille. Il est de type fasciculé bien que moins puissant (Soltner, 2005).



Figure 4 : présentation schématique des différentes parties de l'orge (source2)

3.2.2 Appareil reproducteur

L'orge est autogame, son inflorescence est un épi composé d'unités morphologiques de base : les épillets « groupes de fleurs » enveloppées de leurs glumelles et incluses dans deux bractées ; les glumes (Belaid, 1996).

3.2.2.1 Grain

Le grain d'orge est composé de plusieurs parties : les enveloppes organisées en plusieurs assises (testa, péricarpe, glumelles), l'embryon, la couche à aleurone et l'albumen amylicé. (**Fig.5**)



Figure 5 : les principales parties du grain de l'orge (source 3)

3.2.2.1.1 Glumelles

Les glumelles constituent l'enveloppe externe du grain d'orge et représentent environ 10 % de son poids sec. On distingue les glumelles dorsales (lemma) des ventrales (palea).

Les glumelles sont principalement formées de cellulose (20 %), d'hémicellulose (30-45 %) et de lignine (10-20 %) (Höije et *al.*, 2005).

3.2.2.1.2 Péricarpe

Le péricarpe est composé de plusieurs types de cellules qui se situent entre les glumelles et la testa. Il est séparé des glumelles par une couche protectrice cuticularisée appelée épicarpe et il est soudé à la testa (aussi appelé tégument séminal) (Freeman et Palmer, 1984). Cette couche agit comme une membrane semi-perméable permettant les échanges gazeux. Sur sa face externe, le péricarpe est formé de l'hypoderme et sur sa face interne, de cellules croisées de forme rectangulaire et situées près de la testa.

La testa est entourée de deux zones cuticulaires, la plus interne issue du tissu nucellaire étant plus fine que la plus externe qui est issue des cellules de la testa (Briggs, 1998).

3.2.2.1.3 Embryon

L'embryon est situé dans la partie dorsale de la graine, les deux composants majeurs de l'embryon sont l'axe embryonnaire qui formera la plantule au cours de la germination et le scutellum qui aura un rôle dans la synthèse d'enzymes et le transfert des nutriments de l'albumen vers l'embryon lors du développement du grain.

A maturité l'embryon se divise en trois régions : la tige (coléoptile), le mésocotyle et les racines enveloppées dans le coléorhize. La mésocotyle et l'axe embryonnaire se trouvent entre le coléoptile et les racines (Briggs, 1998).

3.2.2.1.4 Albumen

L'albumen est le tissu de réserve de l'orge, il contient des grains d'amidon, des protéines de réserve, des lipides et des polysaccharides pariétaux. L'albumen est composé de la couche à aleurone et de l'albumen amylicé (Runavot, 2011).

4 Cycle de développement de l'orge

Selon coio (1957) les phases de développement de l'orge sont les suivantes :

4.1 De la levée au début du tallage

La levée a lieu 10 à 12 jours après le semis. Elle apparait en même temps que la 4^{ème} feuille, la première talle dite "de coléoptile". Pendant ce temps, les racines primaires, en nombre limite, croissent activement.

4.2 Du début du tallage au début de la montée

Les talles proprement dites, c'est à dire celles issues du plateau de tallage apparaissent d'autant plus vite que le semis a été plus superficiel. Les talles se multiplient et se développent pendant environ une quinzaine de jours. Après le commencement du tallage, les racines secondaires qui prennent naissance aux nœuds de la base se ramifient avec profusion.

4.3 Montaison (épiage)

L'ébauche des futurs épis se détache du plateau de tallage pour commencer à monter dans les différentes talles. Cette période de montée dure environ un mois pour aboutir vers le 10 Juin à l'épiage, arrivée de l'épillet du sommet de l'épi au niveau de l'oreillette de la dernière feuille. Le nombre de feuilles de la tige principale est pratiquement constant et égal à 9. La fécondation se situe entre l'apparition des barbes et l'épiage.

4.4 La période de croissance végétative et de maturité

Au cours des 10 à 12 jours suivant l'épiage les tiges s'allongent pour atteindre leur taille définitive. Cependant, les réserves commencent à s'accumuler autour de l'embryon, les épis s'alourdissement et c'est la période la plus dangereuse au point de vue verse.

5 Exigences de l'orge

Les exigences culturales de l'orge sont variables en fonction de la variété, pour cette raison certaines sont dites d'hiver (supportant le gel et plus exigeantes en eau) et d'autres de printemps (Hanchane, 2009).

Généralement, les besoins en eau de l'orge sont satisfaits par des précipitations entre 350 et 370 mm et les températures optimales pour sa croissance sont situées entre 15 et 20°C (Hanchane, 2009). Certaines variétés nécessitent peu d'eau et sont tolérante à la salinité et à d'autres conditions de stress. Par conséquent, cette espèce est d'une grande importance dans les zones où le blé ne peut pas être cultivé en raison d'un sol inadéquat et d'une irrigation insuffisante (Sriman et *al.*, 2018). Il prédomine dans les régions arides et semi-arides, caractérisées par des pluies rares et irrégulières et par des températures souvent élevées (Hanchan, 1998).

L'orge peut végéter dans des sols calcaires alluviaux, limoneux, ayant un pH de 8,1, une teneur de (0,38 g kg⁻¹) de carbone organique, et où N, P et K sont disponibles (185,0 kg ha⁻¹, 15,25 kg ha⁻¹ et 265,0 kg ha⁻¹ respectivement) (Sriman *et al.*, 2018).

5.1 Azote (N)

Il assure une croissance plus luxuriante de la plante, il offre une meilleure photosynthèse, un meilleur tallage, il augmente le rendement des grains et leur teneur en protéines qui améliorent la qualité des grains (MOSSAB, 2007).

Il est recommandé d'appliquer entre 0 et 30 unités de N/ha après une jachère ou une culture légumineuse, 50 à 90 unités de N/ha après une céréale. Les premiers symptômes de carence en azote correspondent à un jaunissement qui apparaît sur les feuilles plus âgées en premier (Alaoui, 2003). Si des signes de carence en azote apparaissent au niveau du champ, le rendement potentiel a été déjà réduit. Les cas de carence extrême en N entraînent une sénescence précoce et une réduction de la taille des épis (**Fig.6**) (Benider, 2018).

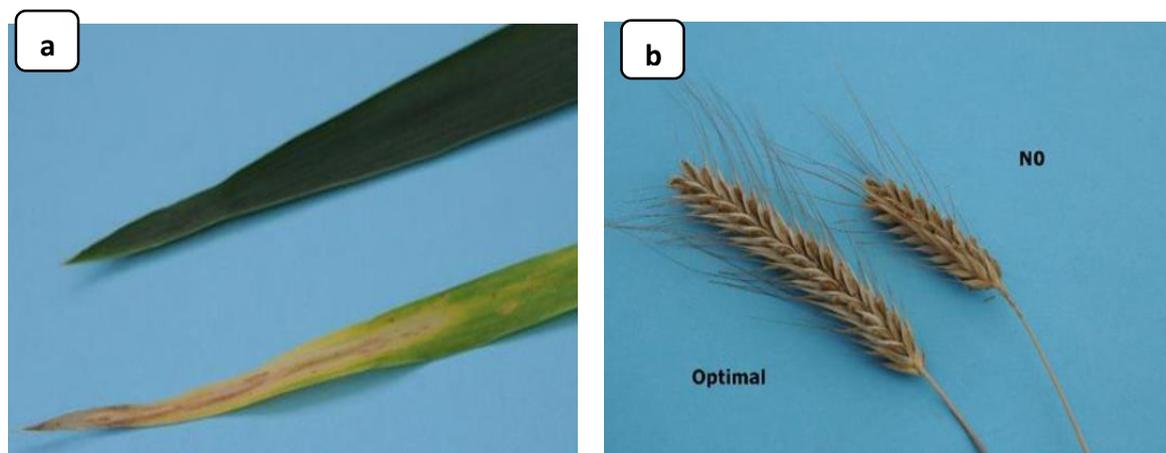


Figure 6 : des images qui montre le jaunissement de la feuille de l'orge (a) et la réduction de la taille des épis (b) (source 4). (b) NO : un épi carencé, Optimal : un épi non carencé.

5.2 Phosphore (P)

Le (P) est un élément essentiel qui assure une meilleure implantation de la culture, il favorise un développement racinaire plus précoce et une maturation plus homogène de la culture. (Madjida *et al.*, 2020).

Le phosphore doit être appliqué à des doses comprises entre 30 et 40 unités/ha (Alaoui, 2003).

Les plantes carencées en (P) sont plus petites que la normal (**Fig.7**), les feuilles montrent des colorations violacées, notamment sur le milieu des limbes et la croissance est fortement ralentie. (Martel *et al.*, 1977).

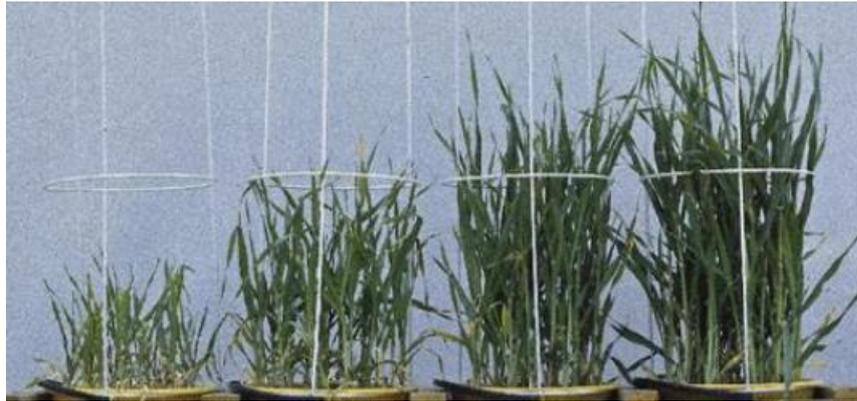


Figure 7 : les différents niveaux de carence en phosphore chez l'orge (source 4)

5.3 Potassium (K)

Le (K) est un élément essentiel qui assure une Croissance plus luxuriante de la plante, meilleur photosynthèse Développement de la plante amélioré Le rendement est augmenté et la qualité des grains améliorée (Madjida et *al.*, 2020).

Sur des sols de texture sablonneuse, ou sur des sols organiques, les quantités de potassium à appliquer doivent être comprises entre 15 et 30 unités de K/ha (Alaoui, 2003).

La carence en (K) provoque des nécroses ou un brunissement au niveau des pointes des feuilles les plus âgées (**Fig.8**) (Hamdane, 2010).



Figure 8 : Carence en potassium pour la plante de l'orge (source 4).

6 Importance de la biotechnologie sur l'orge

L'orge est une plante modèle bien connue est utilisée pour développer des méthodologies de sélection végétale, génétique et cytogénétique (Heneen, 2010). Le développement des nouvelles variétés tolérantes aux contraintes environnementales est essentiel aussi bien pour les pays développés qu'au pays en voie de développement.

D'après Muñoz-Amatriaín et *al.*, (2014), l'orge a un pool génétique qui a le potentiel de contenir suffisamment de diversité génétique, à exploiter pour l'adaptation à différentes conditions environnementales. En outre, les vastes ressources en matériel génétique d'orge, disponibles dans le monde, contiennent probablement une variation allélique bénéfique que les nouvelles technologies génomiques et de sélection peuvent exploiter.

L'amélioration variétale consiste à combiner, chez un ensemble d'individus appelé variété, les caractéristiques souhaitées. Elle n'est pas l'apanage de la recherche publique ou privée car de tous temps, les agriculteurs du monde ont fait évoluer leurs variétés ou en ont créé d'autres. Ceci continue dans les agrosystèmes, pour lesquels les systèmes semenciers sont essentiellement fondés sur l'utilisation de variétés locales. La sélection classique est la stratégie la plus utilisée pour la plupart des espèces végétales cultivées. (Laure et *al.*, 2010).

La création d'une variété tolérante à une contrainte de l'environnement particulière nécessite de croiser deux variétés judicieusement choisies. L'une fournit le fond génétique, c'est-à-dire l'ensemble des gènes favorables à une bonne productivité, et l'autre apporte des caractères de tolérance à la contrainte ciblée. Après un premier croisement, les descendants présentant tous les caractères recherchés sont sélectionnés grâce à l'évaluation de critères phénotypiques, dans des conditions de culture favorisant les plantes tolérantes au stress considéré. Ces descendants sont par la suite croisés, en moyenne de six à huit fois, avec la variété parentale à fort rendement. Cette sélection repose sur l'exploitation de la variabilité naturelle existant au sein d'une espèce, et requiert un accès à des ressources génétiques aussi vastes que possible, c'est-à-dire à la biodiversité. (Laure et *al.*, 2010).

Chapitre II
La production
de l'orge en
Agriculture de
Conservation
sous climat
semi-aride

1 Climat semi-aride

Les sols des hauts plateaux se trouvent sous climat semi-aride (**Fig.9**) (Medejerab, et Henia, 2011). Ce climat se spécifie par des épisodes de déficit hydrique et de hautes températures. Ces périodes de sécheresse sont parfois intenses, toujours imprévisibles et variables d'une année à l'autre. Cette irrégularité fait que ce climat soit très variable, par conséquent la production des cultures pluviales et particulièrement les céréales sera variable au cours des années.

L'insuffisance du nombre de stations météorologiques fait que le plus souvent, pour estimer ces précipitations au niveau sectoriel, nous sommes amenés à calculer des gradients pour les hauts plateaux. Gharzouli, (1977), propose comme gradients altitudinaux :

- 25 mm/100 m pour les steppes de l'Ouest.
- 20 mm/ 100 m pour les steppes du Centre.
- 37 mm/100 m pour les steppes de l'Est.

Pour les températures élevées, juillet reste le mois le plus chaud avec $33^{\circ} < M(\max) < 41,7^{\circ}\text{C}$. L'insolation est plus longue en juillet et le sirocco y atteint son maximum. C'est dire qu'écologiquement, ce mois est le plus dur pour la flore (Djellouli, 1984).

La période de sécheresse, toujours estivale, varie entre trois mois pour les stations de l'Atlas saharien et de onze à douze mois pour celles des piémonts Sud dans les Nementchas et les monts des Ksour. Pour les steppes du Sud oranais, elle est comprise entre cinq et six mois (Djellouli, 1984).

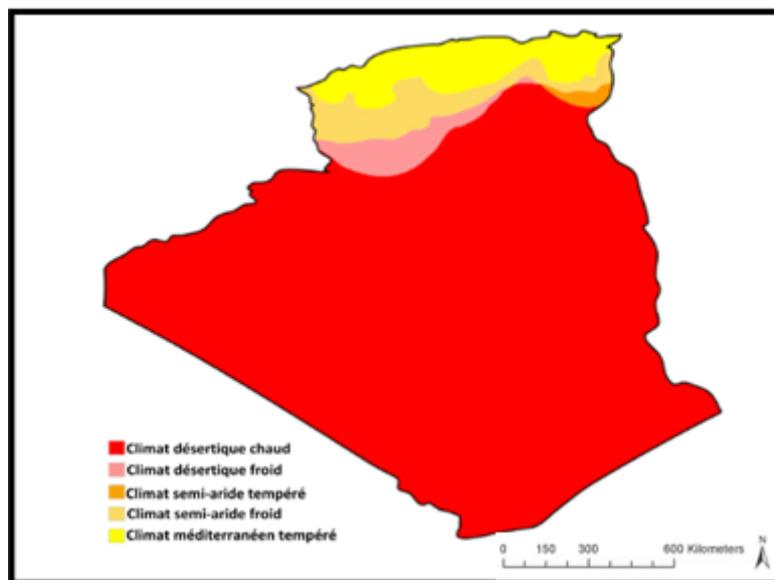


Figure 9 : Répartition des climats en Algérie selon la classification de Köppen. (source 5).

2 Adaptation des cultures au climat semi-aride

La notion de l'adaptation se confond parfois avec celle de résistance et de tolérance aux stress en fait l'adaptation n'est que la résultante de la tolérance aux contraintes. Une plante adaptée est donc celle qui tolère ou résiste à un stress donné et réussit à produire à un niveau satisfaisant par rapport à une autre plante qui sera dite non adaptée (Ceccarelli *et al.*, 1992 ; Fellah *et al.*, 2002).

Roseille et Hamblin (1981), définissent l'adaptation comme la capacité d'un génotype à donner des rendements en grains élevés aussi bien en présence qu'en absence du stress. L'adaptabilité au milieu est un phénomène essentiel chez les plantes qui ne possèdent pas la capacité de se déplacer vers un environnement plus favorable.

Selon Berthet (2006), il y a deux types d'adaptations, l'adaptation génotypique qui est due à des mutations aléatoires suivies de sélection dont le seul mécanisme connu ; c'est la modification du génome d'une population qui, dans un milieu donné, augmente sa probabilité d'être transmis à la descendance, et l'adaptation phénotypique s'exprime par la modification du phénotype d'un individu sous l'influence du milieu d'origine biotique ou abiotique augmentant sa probabilité de survie ou d'avoir des descendants. Elle se traduit par une modification des propriétés morphologiques, métaboliques ou physiologiques de certains organes.

3 Sélection des variétés d'orges résistantes au climat semi-aride

En Algérie, la plus grande partie des surfaces en céréales est située en zone semi-aride. La pluviométrie y est faible et irrégulière, fluctuant d'une année à une autre (70 % des superficies de céréales en Algérie sont situées dans des zones dont la pluviométrie annuelle est inférieure à 400 mm). A cela s'ajoute souvent des sols peu fertiles et à faible réserve hydrique (Dekkiche *et al.*, 2010 ; Belaid, 2015). Par conséquent, le développement et l'obtention de variétés résistantes à la sécheresse, donnant une bonne production sous une large gamme de conditions environnementales constituent un objectif majeur de sélection (Papathanasiou *et al.*, 2015 ; Hamli *et al.*, 2018).

La recherche vise à sélectionner des génotypes à haut potentiel de rendement et à production plus régulière, peu sensibles aux variations climatiques d'un lieu de production à l'autre et d'une année à une autre (Madic *et al.*, 2012). A ce titre, plusieurs indices de tolérance des stress, dont le calcul est basé sur le rendement obtenu en présence et en absence de stress, sont proposés pour sélectionner de tels génotypes (Boussen *et al.*, 2009 ; Papathanasiou *et al.*, 2015). Parmi les indices les plus utilisés, figurent l'indice de la sensibilité au stress (SSI) (Fischer *et al.*, 1978), l'indice de la tolérance (TOL) (Rosielle *et al.*, 1981), l'indice de la productivité moyenne (MP) (Hossain *et al.*, 1990), l'indice de la stabilité du rendement (YSI) (Bousslama *et al.*, 1984), l'indice de tolérance du stress (STI) (Fernandez *et al.*, 1992), l'indice de la moyenne géométrique de la productivité (GMP) (Fernandez *et al.*, 1992) et l'indice de rendement (YI) (Lin *et al.*, 1986 ; Gavuzzi *et al.*, 1997).

Cependant, des recherches sont indispensables pour l'analyse et la compréhension des différents modes de résistance développés par les plantes, afin d'identifier des critères de sélection qui peuvent être utilisés dans des programmes d'amélioration variétale. La résistance à la sécheresse a été associée à plusieurs caractéristiques d'ordre phénologique, physiologique, morphologique et biochimique reflétant différents types d'adaptation (esquive, évitement et tolérance) (Turner, 1979). Toutefois, la sélection pour un mécanisme donné, même bien corrélé avec le rendement, n'aboutit pas automatiquement à l'amélioration de ce dernier. Ceci a été démontré avec l'indice de récolte (Whan *et al.*, 1991). Certains auteurs ont conclu donc, que les variétés de céréales résistantes au déficit hydrique se caractérisent par une stratégie regroupant en même temps, un ensemble des mécanismes d'adaptation (Rejeb et Ben Salem, 1993).

4 Techniques d'agriculture de conservation appliquées en région semi-aride

L'agriculture de conservation repose sur le semis direct, le maintien d'une couverture végétale permanente et la diversification des rotations.

Elle 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 production agricole durable en maintenant une couverture organique, permanente ou semi-permanente, et la conservation de l'environnement (Zaghouane, 2009).

Les techniques de l'agriculture de conservation, répondant aux critères de l'agriculture durable, se sont graduellement imposées, car elles sont motivées par des considérations à la fois agronomiques et environnementales, mais aussi économiques. Ce sont d'ailleurs ces tendances qui ont encouragé beaucoup de pays à les adoptées (Kheyyar *et al.*, 2007). Aujourd'hui, les techniques de l'agriculture de conservation, notamment le semis direct, connaissent un formidable succès et continue à se dissiper pour atteindre, en 2008-2009, environ 117 millions d'hectares dans tous les continents, avec une prédominance dans les deux Amériques (Kassam *et al.*, 2010).

Cette nouvelle forme d'agriculture dont le paradigme est le maintien de la cohésion naturelle des agrégats du sol, repose sur trois axes, rassemblant un ensemble de pratiques, tous trois destinés à assurer de concert une protection et un renforcement tant physique que biologique de la santé des sols (Farooq et Siddique, 2015 a ; FAO, 2008) : la réduction maximale du travail du sol (jusqu'à son annulation), la diversification des espèces cultivées dans la rotation culturale et la couverture permanente du sol par des couverts ou débris végétaux (**Fig. 10**)

Le semis direct est un système de conservation, de gestion des sols et des cultures, dans lequel la semence est placée directement dans un sol non travaillé. Seul, un petit trou ou un sillon est ouvert, de profondeur et de largeurs suffisantes avec des outils spécialement conçus à cet effet pour garantir une bonne couverture et un bon contact de la semence avec le sol aucune autre préparation du sol n'est effectuée (Seguy *et al.*, 2001). L'objectif essentiel des techniques

du semis direct est de conserver, d'améliorer et d'utiliser les ressources naturelles d'une façon plus efficace par la gestion intégrée du sol, de l'eau, des agents biologiques et des apports de produits externes. L'objectif final est de mettre en place une agriculture durable qui ne dégrade pas les ressources naturelles, sans renoncer pour autant à maintenir les niveaux de production (Atare, 2006).

La rotation culturale est l'une des principes de l'agriculture de conservation, elle permet de maîtriser les adventices, les maladies, mais aussi pour assurer un entretien de la fertilité des sols avec une attention toute particulière portée à l'alimentation azotée (Stockdale et *al.*, 2001 cité par Watson et *al.*, 2002).

Diversifier les espèces dans les rotations en incluant des couverts entre les cultures de rentes, semble jouer un rôle décisif dans l'amélioration du potentiel mycorhizogène des sols (Mäder et *al.*, 2000). De plus, les rotations des cultures affectent à la fois la diversité et la composition des communautés de spores de CMA dans le sol, avec une plus grande diversité des CMA sous rotations des cultures par rapport à de la monoculture (Oehl et *al.*, 2003 ; Vestberg et *al.*, 1999 cité par Jansa et *al.*, 2006).

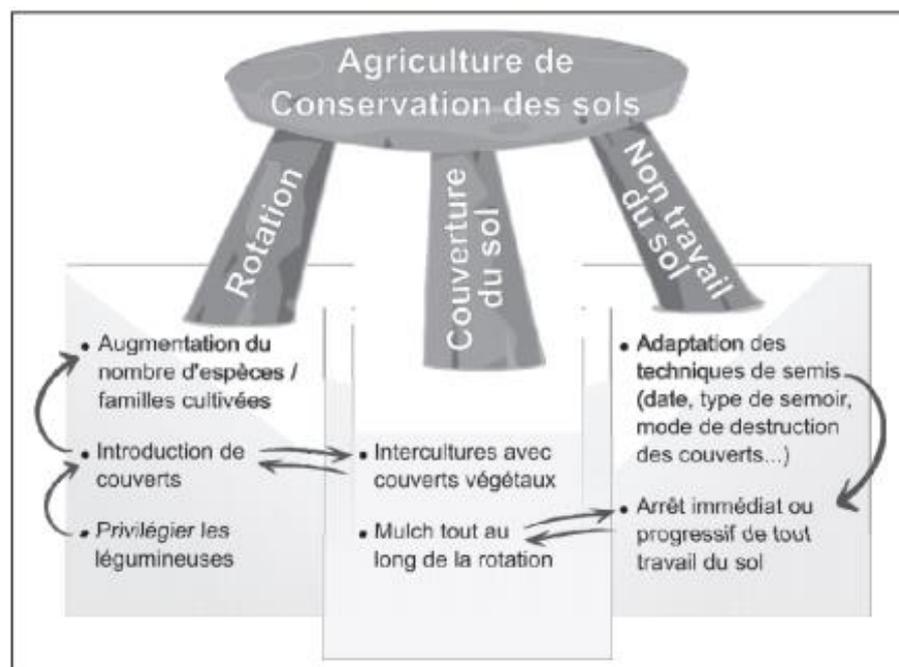


Figure 10 : Particularités des pratiques de l'agriculture de conservation (Chabert et Sarthou, 2017).

Chapitre III

Phosphore dans le sol

1 Sols sous climat semi-aride

Les sols des régions semi-aride se caractérisent par une faible fertilité, la faible couverture du sol en début de saison des pluies dans cette région favorise l'érosion en nappe avec appauvrissement en éléments fins sur la surface (Roose, 1977). Ces pertes sont irréversibles, et la durabilité de la productivité végétale est donc non assurée. Dans ces conditions, la lutte contre cette forme d'érosion est la première mesure à prendre (Feller, 1995). Ainsi l'application des techniques de conservation des sols telle que le semis direct s'impose.

2 Importance du phosphore en production végétale

Avec l'augmentation de la demande de production agricole et le pic de la production mondiale au cours des prochaines décennies, une attention importante est donnée au phosphore (P) en tant que ressource non renouvelable (Cordell et *al.*, 2009 ; Gilbert, 2009). Car le phosphore est considéré comme un élément nutritif indispensable aux végétaux et quasiment non substituable (Raghothama 1999). Il rentre dans la structure moléculaire du matériel génétique, métabolique, structural et de régulation, il entre dans la composition de nombreuses molécules comme les acides nucléiques (ADN, ARN), les enzymes, les phosphoprotéines et les phospholipides.

3 Cycle du phosphore dans le sol

Une caractéristique unique du Phosphore (P) est sa faible disponibilité en raison d'une diffusion lente et d'une forte fixation dans les sols. Cela peut le qualifier comme un facteur limitant majeur pour la croissance des plantes. Dans le sol, le P est présent au sein de différents pools ; on peut schématiquement en distinguer cinq (**Figure 11**)

- Le P présent dans la solution du sol.
- Le P adsorbé aux minéraux de la phase solide du sol.
- Le P précipité sous formes minérales.
- Le P présent dans la matière organique inerte.
- Le P présent dans les microorganismes.

Dans les sols, la quantité de P présent dans le pool de la solution est très faible comparée au P total (environ 0,02 mg/L, soit 0,1% du P total du sol). La répartition entre le phosphore inorganique (Pi) et le phosphore organique (Po) dans la solution du sol semble très variable selon le type de sol et son historique de fertilisation, la proportion de Pi allant de 20 à 99%. Cette répartition reste néanmoins rarement déterminée dans la solution du sol, alors que ce pool joue un rôle majeur dans le prélèvement de P par les racines (Kruse et *al.*, 2015).

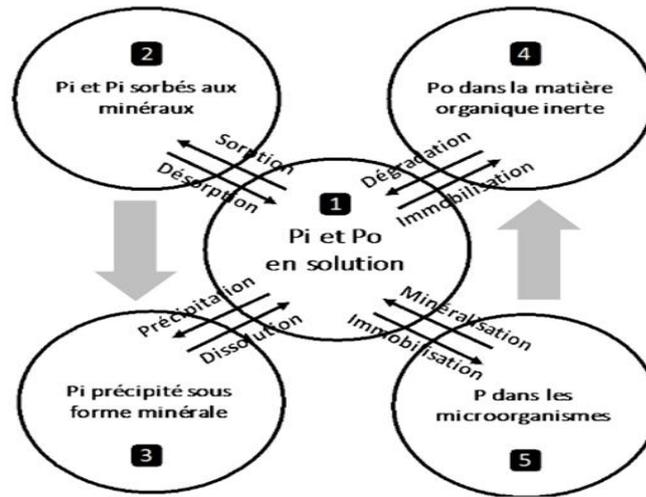


Figure 11. Cycle du phosphore dans le sol.

Le phosphore est schématiquement réparti entre cinq pools (Fig. 11). Les flèches indiquent les mécanismes permettant de passer d'un pool à l'autre ; Pi : phosphore inorganique ; Po : phosphore organique (Kruse et *al.*, 2015).

4 Les formes du phosphore dans le sol

Le P du sol existe sous diverses formes chimiques, y compris le Phosphore inorganique (Pi) et le Phosphore organique (Po). Ces formes du P diffèrent par leur comportement et leur devenir dans les sols (Hansen et *al.*, 2004 ; Turner et *al.*, 2007).

4.1 Phosphore organique (Po)

Le Po représente généralement 30% à 65% du P total des sols (Harrison, 1987), il existe principalement sous des formes stabilisées comme les phosphates (PO_4^{3-}) et Inositol trisphosphate ($\text{C}_6\text{H}_{15}\text{O}_{15}\text{P}_3$), et des formes actives comme diesters d'orthophosphates, monoesters d'orthophosphates labiles et polyphosphates organiques (Turner et *al.*, 2002 ; Condron et *al.*, 2005). Le Po peut être libéré par des processus de minéralisation, ce processus est favorisé par la présence des organismes du sol et les racines des plantes en association. Ces processus sont fortement influencés par l'humidité du sol, la température, les propriétés physico-chimiques de surface et le pH du sol (Jianbo Shen et *al.*, 2011).

4.2 Phosphore inorganique (Pi)

Le Pi représente généralement 35% à 70% du P total dans le sol (Harrison, 1987). Les minéraux phosphatés primaires, y compris les apatites ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3$), la strengite (FePO_4) et la variscite ($\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), sont très stables, la libération de P biodisponible à partir de ces minéraux par les intempéries est généralement trop lente pour répondre à la demande des cultures. En revanche, les minéraux P secondaires, y compris les phosphates de calcium (Ca), de fer (Fe) et d'aluminium (Al), varient dans leurs taux de dissolution, en fonction de la taille

des particules minérales et du pH du sol (Pierzynski et *al.*, 2005 ; Oelkers et Valsami- Jones, 2008).

5 Acquisition du phosphore par les racines

Le P disponible représente la quantité du P total du sol pouvant potentiellement être absorbé par les racines des plantes (Ziadi et *al.*, 2013). Les racines prélèvent uniquement les ions phosphates dissouts dans la solution, qui représentent une très faible part du P total du sol (environ 0,1%).

Les plantes sont capables de répondre à la carence en P en modifiant leur architecture racinaire, y compris la morphologie des racines, la topologie et les modèles de distribution.

Selon Lynch (1995) le terme «architecture racine» a été utilisé dans divers contextes pour se référer à des aspects distincts de la forme des systèmes racinaires, la morphologie des racines fait référence aux caractéristiques de la surface d'un seul axe radulaire en tant qu'organe, y compris les caractéristiques de l'épiderme comme les poils des racines, le diamètre des racines, la racine chapeau, le modèle d'apparition des racines filles, ondulations de l'axe de la racine et la sénescence corticale, la topologie des racines fait référence à la manière dont les axes racine individuels sont connectés les uns aux autres par branchement.

L'application localisée de phosphates et d'ammonium améliore considérablement l'absorption de P et la croissance des cultures en stimulant la prolifération des racines et l'acidification de la rhizosphère dans un sol calcaire (Jing et *al.*, 2010).

Un processus important pour répondre aux variations de la disponibilité en P est la plasticité de l'architecture racinaire, d'une part en réponse à un enrichissement local en P et d'autre part à des conditions de carence en P très fortes. Par exemple, Drew (1975) a montré qu'une céréale comme l'orge est capable de produire plus de racines, plus ramifiées, pour explorer des zones enrichies en P.

A côté de la croissance racinaire, on considère que les poils racinaires, qui sont des extensions des cellules épidermiques, présentent un potentiel très important pour augmenter l'efficacité d'acquisition du P du fait de leur faible coût en carbone (Brown et *al.*, 2013).

Les travaux de Brown et *al.* (2013) ont montré par modélisation que la meilleure stratégie pour augmenter l'efficacité d'acquisition du P via les poils racinaires serait d'augmenter leur longueur et leur durée de vie plutôt que leur densité.

Exemple : Des travaux pionniers utilisant des mutants d'orge sans poils racinaires ont montré que l'extension de la zone d'appauvrissement en P (environ 1 mm de la surface de la racine) était la moitié de celle mesurée sur un génotype normal produisant de longs poils racinaires (Gahoonia et *al.*, 1997).

6 Stratégie d'amélioration de la biodisponibilité du P dans le continuum sol-rhizosphère-plante

Les modifications chimiques et biologiques causées par les racines dans la rhizosphère jouent un rôle essentiel dans l'amélioration de la biodisponibilité du P du sol (Hinsinger, 2001).

Ces changements induits par les racines, impliquent principalement la libération de protons pour acidifier la rhizosphère, l'exsudation de carboxylates pour mobiliser le P peu disponible par chélation et échange de ligands et la sécrétion de phosphatases ou de phytases afin de mobiliser le Po par hydrolyse catalysée par des enzymes (Neumann et Römheld, 2002 ; Zhang *et al.*, 2010).

Une meilleure compréhension de la dynamique du P dans le continuum sol / rhizosphère-plante, fournit une base importante pour optimiser la gestion du P afin d'améliorer l'efficacité de l'utilisation du P dans la production végétale. L'apport de P dans les terres agricoles peut être optimisé en fonction de l'équilibre des entrées / sorties de P. Les stratégies efficaces de gestion du P peuvent impliquer une série d'approches à plusieurs niveaux en association avec les processus du sol, de la rhizosphère et des plantes. La gestion du P basée sur la rhizosphère offre une approche efficace pour améliorer l'efficacité de l'utilisation du P, grâce à l'exploitation du potentiel biologique pour une mobilisation et une acquisition efficaces du P par les cultures, réduisant ainsi les dépendances excessives qui résulte de l'application d'engrais chimique P.

L'application localisée de P a amélioré la croissance du maïs (*Zea mays*) en stimulant la prolifération des racines et l'acidification de la rhizosphère dans un sol calcaire, indiquant le potentiel de modification à l'échelle du champ des processus de la rhizosphère pour améliorer l'utilisation des nutriments et la croissance des cultures (Jing *et al.*, 2010).

6.1 Sélection des cultivars ou des génotypes plus efficaces pour l'acquisition du P

De grands progrès ont été accomplis dans les programmes de sélection végétale traditionnels en Chine en vue de sélectionner des variétés de cultures pour une utilisation efficace du P. Un exemple de génotype efficace est la variété de blé (*Triticum aestivum*). Certains traits génétiques racinaires importants ont été identifiés avec une utilité potentielle dans la sélection de cultures efficaces en P, y compris les exsudats racinaires, les traits des poils racinaires (Gahoonia et Nielsen, 2004 ; Lynch et Brown, 2008). De plus, la capacité d'utiliser des composés P insolubles dans les sols peut être améliorée par l'ingénierie des cultures pour exsuder plus de phytase, ce qui résulte de la surexpression d'un gène de phytase fongique (George *et al.*, 2005).

L'intégration de cultures génétiquement améliorées à efficacité pour l'acquisition du P avec une gestion avancée du P dans le système sol-plante est importante pour améliorer l'efficacité de l'utilisation des nutriments et la production agricole durable. Cette approche nécessite un travail de coopération entre des scientifiques de différentes disciplines des sciences des cultures, des plantes et du sol.

7 Rôle de la biotechnologie dans la biodisponibilité du P

Les travaux scientifiques récents permettent de mieux comprendre les processus limitant la disponibilité du P pour les cultures. Malgré la complexité des déterminants de la biodisponibilité du phosphore révélée par l'ensemble des travaux scientifiques, nous pouvons proposer des pistes pour transposer ces nouvelles connaissances en termes d'applications agronomiques.

Ces pistes incluent, l'amélioration végétale, la valorisation des différentes formes de phosphore du sol via la stimulation des activités biologiques du sol (Plassard et *al*,2015).

7.1 Amélioration végétale

L'amélioration végétale est un véritable enjeu à relever en proposant de nouveaux critères de sélection des variétés « efficaces pour le P » basés sur des caractères phénotypiques impliqués dans l'acquisition du P, comme l'exploration du sol (architecture du système racinaire, poils racinaires) ou l'association avec des microorganismes bénéfiques (capacité de mycorhization, production d'exsudats racinaires stimulant une population microbienne bénéfique ou favorisant la désorption du P) (Plassard et *al* ,2015).

7.2 Valorisation des différentes formes de phosphore du sol via la stimulation des activités biologiques du sol

A ce titre, la stimulation de l'activité des organismes du sol est souhaitable. La mobilisation de la composante biologique des sols est particulièrement prometteuse soit en favorisant l'inoculation microbienne (enrobage des semences, apport d'inoculum fongique d'espèces endomycorhiziennes) soit en favorisant l'activité biologique par des pratiques culturales adaptées. Par exemple, la symbiose endomycorhizienne est très sensible à un excès de P et les régimes de fertilisation excessive pratiqués dans l'agriculture conventionnelle des pays européens ont certainement un impact négatif qu'il est urgent de déterminer avec précision. On peut aussi tenter (ce qui a trop rarement été testé) d'apporter des organismes tels que les vers de terre (Stockdill, 1982).

En effet, la littérature scientifique décrit les mécanismes utilisés par les organismes du sol pour accéder aux formes de P organiques non directement accessibles aux plantes comme le phytate. Différentes stratégies basées sur la préservation des enzymes produites par ces organismes ou sur les interactions trophiques afin de stimuler la production d'enzymes sont actuellement à l'étude. De manière générale, les nombreuses recherches concernant l'écologie des sols ouvrent des perspectives intéressantes.

Ainsi, certains travaux pionniers mettent en évidence la modification de la biogéochimie du P en présence de vers de terre. Si ces travaux sont confirmés dans des contextes pédoclimatiques variés, les techniques de travail simplifié voire de non labour pourraient permettre une remobilisation du P.

Une meilleure coordination des nutriments azotés et phosphatés pourrait également permettre d'accéder à des formes de P jugées a priori non disponibles en influençant la biogéochimie du P à proximité des racines ou en favorisant l'activité de microorganismes bénéfiques. La conception d'engrais de synthèse par les industries des engrais en combinant

forme d'azote, vitesse de libération et placement pourrait également répondre en partie à la problématique de raréfaction de la ressource en P en favorisant la libération de P aux stades clés de développement de la plante et en coordonnant l'activité des microorganismes bénéfiques (Plassard *et al.*, 2015).

Chapitre IV

La mycorhization

1 Symbiose mycorhizienne

Les plantes vasculaires terrestres sont capables d'établir des symbioses avec de nombreux microorganismes. Ces symbioses sont très répandues dans les différents écosystèmes sur terre, aussi bien dans les zones arides que dans les zones tempérées (Pamiske, 2008). Les associations mycorhiziennes entre un champignon du sol et les racines des plantes sont très répandues puisqu'elles s'établissent avec environ 80 % des taxons végétaux (Brundrett, 2002). Les plantes d'intérêt agronomique forment exclusivement des symbioses avec les champignons endomycorhiziens à arbuscules appartenant à la division des *Glomeromycota* (Brundrett, 2002).

Les hyphes des champignons endomycorhiziens qui émanent de la racine contribuent fortement à augmenter le volume de la rhizosphère qui peut alors être désignée par le terme de « mycorhizosphère » (Jansa et al., 2005). Augmentant ainsi la capture des ressources inaccessibles aux racines non mycorhizées. Ceci est particulièrement important pour les nutriments peu mobiles comme le phosphore (Hinsinger et al., 2011). Alors que la longueur des poils racinaires est d'environ 1 mm, les hyphes des champignons endomycorhiziens peuvent s'étendre jusqu'à plusieurs cm de la surface de la racine (Jakobsen et al., 1992). On peut par ailleurs remarquer que la symbiose endomycorhizienne diminue généralement la croissance des poils racinaires des racines colonisées, bien que cet effet puisse dépendre de l'espèce fongique (Sun et Tang, 2013).

Cependant, cet effet dépressif sur les poils racinaires est largement compensé par la croissance des hyphes qui peut représenter jusqu'à 1 m de filament fongique par mm de longueur de racine (Allen, 2007). De plus, le diamètre très faible des hyphes leur permet de pénétrer dans la porosité fine du sol qui est inaccessible aux poils racinaires et aux racines.

L'association endomycorhizienne modifie fortement les voies d'absorption de P de la plante hôte par la mise en place d'une « voie mycorhizienne » qui peut assurer de 20 à 100% de l'entrée de Pi dans les plantes endomycorhizées (Facelli et al., 2010 ; Smith et al., 2004). L'efficacité de la symbiose endomycorhizienne dépendra de l'exploration du sol par les hyphes.

2 Différents types de mycorhizes

Selon Dexheimer (1997) quel que soit le type mycorhizien, le champignon reste confiné dans le cortex racinaire et ne franchit jamais la barrière endodermique, l'endoderme est l'assise de cellules la plus profonde du parenchyme cortical, il entoure le cylindre central ou stèle qui contient les faisceaux criblés et vasculaires.

2.1 Ectomycorhizes

Les champignons ectomycorhiziens représentent plus de 5000 espèces fongiques (Barker et al., 1998). Ce sont essentiellement des *Ascomycètes* ou des *Basidiomycètes*. Le réseau de Hartig, constitué d'un labyrinthe d'hyphes fongiques s'insinuant entre les cellules racinaires de la partie externe du parenchyme cortical ne pénètre pas dans les cellules de l'hôte, ce qui permet

d'identifier cette forme de symbiose entre le champignon et la racine d'association ectomycorhizienne (Franck, 1885 ; Harley et Smith, 1983 ; Brundrett, 2004).



Figure 12 : Photo d'ectomycorhize formée de l'association entre une racine et un champignon (Brundrett, 2008). Les petites racines latérales jaunes sont entourées de cellules fongiques qui forment un manchon autour de la racine et qui contrôlent sa morphologie et sa croissance. Les filaments sont le mycélium du champignon qui prospecte le sol.

2.2 Endomycorhizes

Ces champignons mycorhiziens (**Figure.13**) développent des hyphes qui pénètrent à l'intérieur des cellules du cortex racinaire, soit sous forme de pelotons d'hyphes intracellulaires, dont les endomycorhizes formées par les Ericaceae et par les Orchidaceae, soit sous forme d'arbuscules pour former les symbioses mycorhiziennes à arbuscules. **Fig.4** (Calonne, 2012).

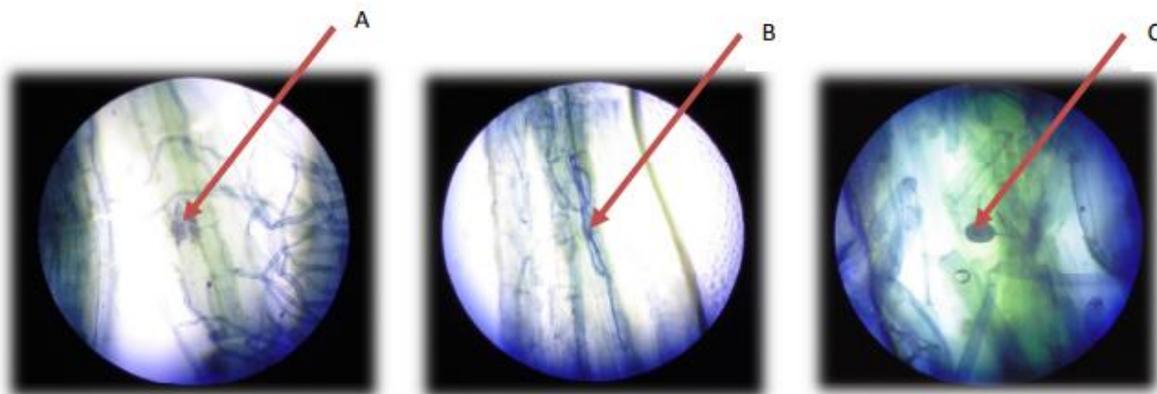


Figure 13 : Photos des lames observées au microscope (X400) (Camille, 2015) A : Arbuscule
B : Hyphes C : Vésicule.

2.2.1 Endomycorhizes a vésicules et arbuscules

Elles concernent environ 95% des taxons végétaux à mycorhizes et ce type est non visible à l'œil nu. Ils sont associés avec les plantes herbacées et ligneuses, tirent leur nom des structures formées à l'intérieur des cellules rappelant un petit arbre (**fig.14**) (Ndonga, 2018a).

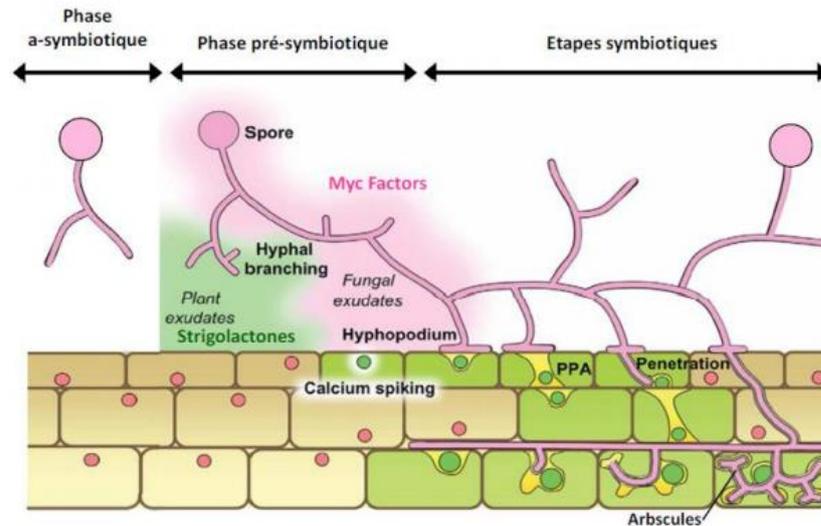


Figure 14 : Schéma des différentes étapes de colonisation des champignons AV (Bonfante et Genre 2010).

2.2.2 Endomycorhizes à pelotons d'hyphes cloisonnés

Chez ce type d'endomycorhizes, les hyphes forment des amas dans les cellules corticales et pénètrent à travers la paroi à l'intérieur des cellules du cortex racinaire (figure 4) en repoussant la membrane plasmique (Matumoto, 1996). Dans ce type de mycorhizes, le champignon pénètre dans les cellules de la racine mais forme très rarement un réseau intercellulaire. L'infection se propage directement d'une cellule à l'autre. Lorsqu'un hyphe pénètre dans une cellule du cortex racinaire, elle s'enroule sur elle-même pour former un peloton. Toutefois, contrairement au type mycorhizien précédent, c'est le seul type de formation intracellulaire et elles sont établies dans des cellules actives. (Ndonda, 2018a).

2.3 Ectendomycorhizes

Ce sont des mycorhizes présentant à la fois des structures d'ectomycorhizes et des structures d'endomycorhizes (**Figure 15**). C'est ainsi que chez l'Éricacée *Arbutus unedo*, le champignon forme un manteau, un réseau de Hartig et des pelotons intracellulaires (Münzenberger et *al.*, 1992 ; Ndonda, 2018b).

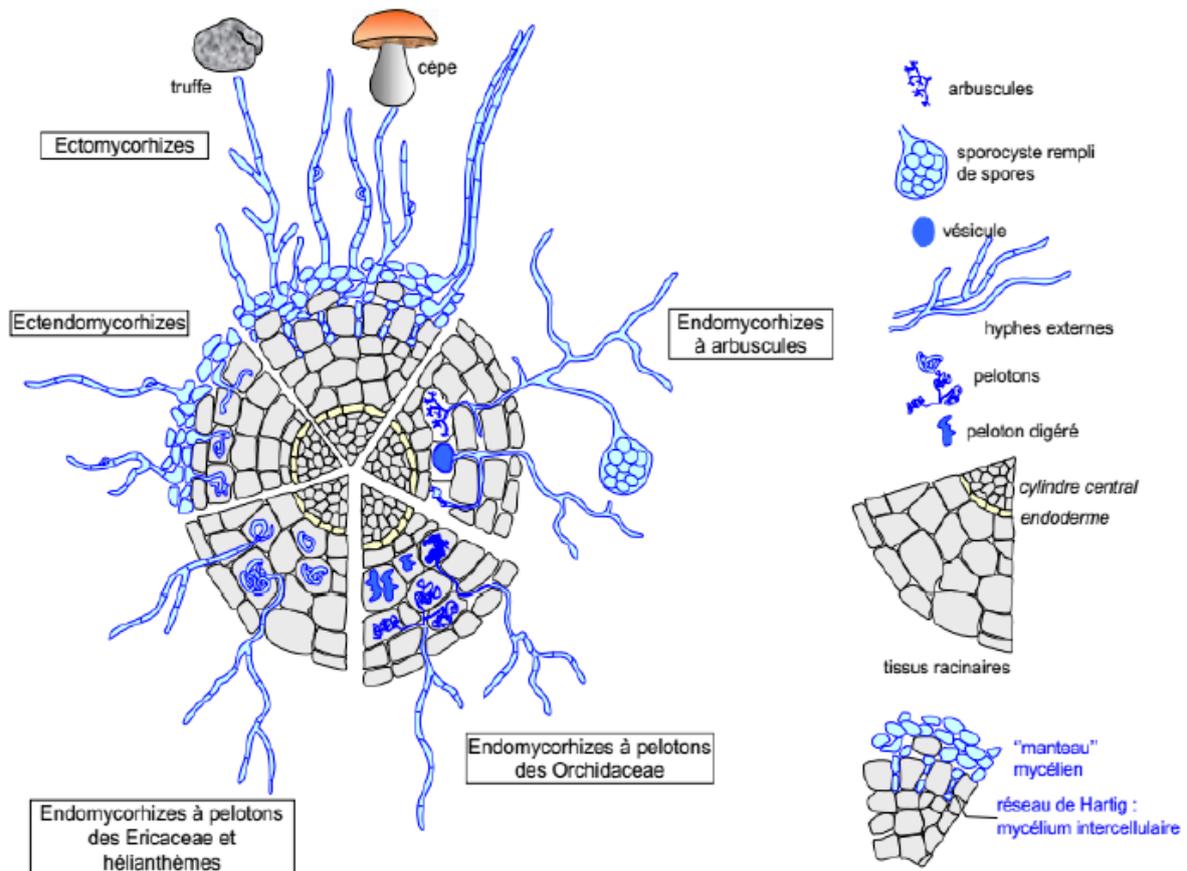


Figure 15 : les principaux types mycorhiziens actuels représentés sur une coupe transversale d'une racine modifiée (LeTacon, 1985 ; Bournine, 2017).

3 La mycorhizosphère

La rhizosphère est une zone de sol qui entoure vaguement les racines des plantes et se caractérise par une activité microbiologique et chimique complexe (Lynch, 1990). Les racines des plantes et les exsudats de racines servent de source constante de nutriments pour de grandes populations de différentes espèces microbiennes qui ont un impact sur le sol et la santé des plantes. Le terme « mycorhizosphère » fait référence aux changements dans la rhizosphère des plantes suite à la colonisation mycorhizienne des racines des plantes (Linderman, 1988).

L'effet mycorhizosphère est d'un intérêt particulier car il y a des changements qualitatifs et quantitatifs qui se produisent dans les populations microbiennes de la rhizosphère suite à la colonisation des racines mycorhiziennes (Meyer et Linderman, 1986). Ces changements dans la mycorhizosphère (**Fig.16**) comprennent la sélection d'un groupe de micro-organismes sur la communauté de rhizosphère restante qui peut être interprété comme un décalage transitoire ou permanent dans la communauté microbienne qui peut favoriser l'élimination ou la prolifération d'agents pathogènes.

Ces altérations sont généralement médiées par des changements dans la perméabilité de la membrane des racines de l'hôte entraînant des modifications de la composition de l'exsudat des racines (Ratnayake et *al.*, 1978). La recherche en cours se concentre sur la gestion de la

mycorhizosphère menant à l'élimination naturelle des agents pathogènes des plantes gagne progressivement en popularité.

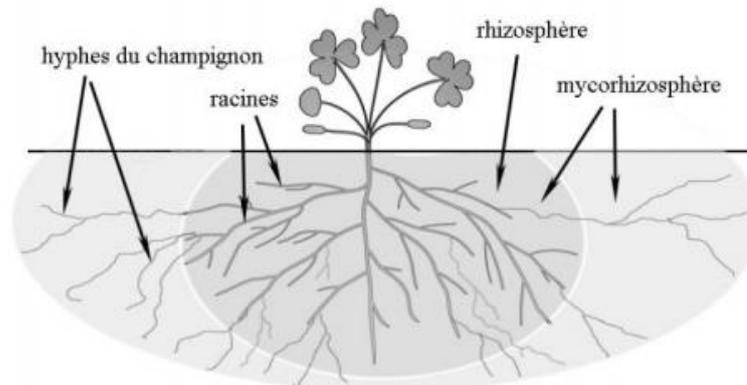


Figure 16 : Schéma représentant l'importance des hyphes des mycorhizes sur l'extension racinaire (source 6).

4 Importance de l'association mycorhizienne

L'interaction mycorhizienne se caractérise par un transfert bi-directionnel de nutriments. Les champignons mycorhiziens, en échange du carbone fourni par la plante, améliorent la nutrition hydrique et minérale de la plante, notamment en phosphore (P) et en azote (N). Ces échanges nutritionnels réciproques sont au centre de l'association mycorhizienne et agissent en tant que composants régulateurs assurant le bon fonctionnement de la symbiose (Jakobsen, 1995 ; Fitter, 2006 ; revue de Javot et *al.*, 2007).

4.1 Amélioration des rendements

Le système racinaire représente la principale zone d'échange de nutriments et d'eau entre le sol, les microorganismes et les plantes. Dans la zone de sol sous leur influence, appelée rhizosphère, les racines vont très fortement modifier les propriétés physico-chimiques du sol et les communautés d'organismes (Hinsinger et *al.*, 2006). De plus, des associations avec des organismes mutualistes, notamment les champignons mycorhiziens, et les bactéries fixatrices d'azote, influencent fortement les cycles biogéochimiques (Lambers et *al.*, 2009). Les différentes espèces de plantes se distinguent fortement par rapport à leurs associations avec des microorganismes mutualistes et de la rhizosphère, mais aussi par rapport aux traits fonctionnels et à l'architecture (profondeur et densité) de leur système racinaire avec des forts impacts sur le fonctionnement du sol et de l'écosystème dans sa globalité (Bardgett et *al.*, 2014 ; Derrien et *al.*, 2016 ; Mariotte et *al.*, 2018).

Les intérêts de la symbiose mycorhizienne pour les plantes sont nombreux. Le champignon se développe dans les racines mais aussi au niveau extra-racinaire dans le sol. Le nom de mycorhizosphère est attribué à la zone explorée par les deux partenaires (Linderman, 1988). Grâce à son réseau mycélien, 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. Le principal avantage pour la plante est donc une meilleure nutrition hydrique et minérale en particulier en phosphate. (Smith et Read, 2008). Les plantes mycorhizées reçoivent du phosphate de la part du champignon et cela se traduit le plus souvent par une augmentation de la biomasse par rapport à des plantes non colonisées.

4.2 Amélioration des propriétés hydriques du sol

Chez toutes les plantes vasculaires terrestres, l'eau nécessaire aux processus vitaux est puisée dans le sol par les racines et la plus grande partie est évaporée (transpirée) dans l'atmosphère à travers les stomates des feuilles après avoir transité par les vaisseaux ligneux des racines, du tronc et des branches sous forme de sève brute. Une très faible proportion seulement de cette eau est incorporée à la biomasse ou redistribuée dans les différents organes de l'arbre sous forme de sève élaborée (Plassard et *al.*, 2000 ; Mousain, 1989).

La disponibilité de l'eau est le premier facteur de l'environnement qui limite la production. Or, les associations mycorhiziennes, qui impliquent des modifications profondes des caractéristiques structurales et fonctionnelles des racines, sont à priori susceptibles de modifier l'efficacité d'acquisition et d'utilisation de l'eau par les plantes (Harley et Smith, 1983).

4.3 Absorption des éléments minéraux

L'eau et les minéraux sont essentiellement absorbés au niveau des « bouts blancs » et des racines courtes mycorhizées ou non. Comme les ectomycorhizes sont réparties tout le long des racines longues et sont beaucoup plus nombreuses que les Bouts Blancs, l'eau et les minéraux transitent par le champignon beaucoup mieux que par les Bouts Blancs. Ceci explique déjà en partie pourquoi la symbiose mycorhizienne joue un rôle clé dans l'alimentation des arbres (spécifiquement les ectomycorhizes) (Ndonga, 2018b). En effet, les ectomycorhizes jouent un rôle important dans l'absorption des macroéléments (ex : potassium, calcium magnésium, soufre) et des oligoéléments du sol (ex : cuivre, zinc, fer) (Blaudez et *al.*, 2000).

4.4 Production de substances de croissance

Les hormones végétales assurent la régulation du développement et de la croissance des différents organes de l'arbre comme : l'auxine, la cytokinine, l'acide B-indolacétique (IAA) ou encore les vitamines. Il a été montré que les hormones modifient la morphogenèse du réseau de Hartig (Gea et *al.*, 1994) et le taux de mycorhization (Gay et *al.*, 1994). Il s'agit plus particulièrement des cytokinines qui, en équilibre avec l'auxine, l'éthylène et les polyamines, contrôlent les corrélations entre organes ainsi que le développement de l'arbre.

La régénération, la ramification et la croissance des racines sont en grande partie régulées par l'auxine produite au niveau des bourgeons et descendant la sève élaborée (Davies, 1993 in Drénou et *al.* 2006).

4.5 Améliorations des propriétés physiques du sol

Les hyphes fongiques ont la propriété d'agir sur la macroagrégation des constituants du sol et donc sur la stabilité du sol (Tisdall *et al.*, 1991). La stabilité des sols est très importante dans la lutte contre l'érosion, la perte des nutriments et de la matière organique par lixiviation, qui entraînent une baisse de la productivité en agriculture (Schreiner et Bethlenfalvay, 1995).

L'enchevêtrement des racines fines et du mycélium fongique joue un rôle physique dans la liaison des microagrégats (diamètre < 250 µm) entre eux pour former des macroagrégats (> 250 µm) stables, la stabilité de ces macroagrégats étant corrélée à la longueur d'hyphes dans le sol (Miller et Jastrow, 1990 ; Tisdall, 1994).

La liaison des microagrégats est due à la production en grande quantité de polysaccharides par le mycélium extraradicaire ; les CMA produisent en effet une glycoprotéine : la glomaline (Wright et Upadhyaya, 1998) qui influence la stabilité du sol et dont la concentration dans les sols dépend de la plante hôte et du champignon associé (Rillig *et al.*, 2002). Cette protéine fongique a été identifiée comme étant un homologue d'une « heat shock protein » qui est une protéine de réponse au stress (Gadkar et Rillig, 2006).

Les conditions de stress seraient en effet un facteur influençant la production de glomaline car celle-ci est produite en plus grande quantité lorsque la croissance du mycélium est limitée (Rillig et Steinberg, 2002).

5 Impact de l'agriculture de conservation sur les champignons mycorhiziens

L'évolution physique et chimique du sol en AC, influe significativement sur la répartition des espèces et sur la balance entre bactéries et champignons par rapport aux systèmes de non labour (Doran, 1980 ; Kladvko, 2001). Ces organismes étant étroitement liés à la fertilité des sols, à la capacité des plantes à prélever les éléments nécessaires à leur développement et aux risques phytosanitaires, ces équilibres sont d'une importance primordiale à la stabilisation de la production (Ishaq, 2017). En semis direct, les champignons dominent de 0-5cm là où les bactéries dominent en labour (Frey *et al.*, 1999).

L'AC stimule également la présence de champignons ascomycètes qui dégradent la matière organique fraîche peu récalcitrante et les champignons mycorhiziens (Drijber *et al.*, 2000) en particulier dans les premiers centimètres du sol grâce à la plus forte humidité sous le mulch et à la non perturbation mécanique (Spedding *et al.*, 2004). La colonisation des racines des plantes par les mycorhizes est alors plus importante en semis direct (McGonigle *et al.*, 1999), favorisant la prospection racinaire et donc leur capacité à capter l'eau et les nutriments, tout en renforçant les défenses naturelles des plantes (Selosse *et al.*, 2004).

6 La colonisation des racines de l'orge par le champignon mycorhizien à arbuscule

L'établissement de la symbiose entre la plante et le CMA s'effectue via un échange de signaux moléculaires. La reconnaissance entre le champignon et la plante-hôte met en jeu les exsudats racinaires et fongiques (**Fig.17 A**) : les flavonoïdes et les strigolactones, substances chimiques émises par la plante-hôte, vont stimuler l'activité métabolique du champignon

Les hyphes adhèrent ensuite aux parois externes des cellules de la racine, formant un hyphopodium, avant de les perforer en sécrétant des enzymes qui vont détruire la cellulose, les hémicelluloses et les pectines constituant ces dernières. Une fois à l'intérieur de la cellule, les hyphes se ramifient par dichotomie en donnant des hyphes ayant un diamètre de plus en plus petit ; à partir d'un hyphe initial de 10 μm de diamètre, les dernières ramifications peuvent atteindre moins de 1 μm de diamètre. L'ensemble de ces ramifications prend une forme de petit arbre : les arbuscules, lieux des échanges symbiotiques, qui donnent le nom à ces champignons (Gavériaux, 2012 ; Garbaye, 2013).

Les arbuscules sont des structures spécialisées dans le transfert de l'eau et des éléments nutritifs entre le champignon et la plante, pour le phosphore le transfert s'effectue sous forme d'ions orthophosphates via des transporteurs spécialisés insérés dans les membranes cellulaires à l'interface entre la plante et le champignon. Les sucres provenant de la plante sont conduits en sens opposé par des transporteurs d'hexoses qui sont d'autres canaux spécialisés (Karandashov et Bucher, 2005 ; Garbaye, 2013). Après différenciation des structures intraracinaires, le champignon produit des spores à partir de son mycélium extra-racinaire (Akiyama et *al.*, 2007). Tous ces mécanismes de communication moléculaires sont encore peu connus mais la recherche progresse régulièrement grâce notamment aux progrès de la génomique (Garbaye, 2013).

7 Rôle des mycorhizes dans l'augmentation de la biodisponibilité du phosphore pour la plante

L'association endomycorhizienne modifie fortement les voies d'absorption de Pi de la plante hôte par la mise en place d'une « voie mycorhizienne » qui peut assurer de 20 à 100% de l'entrée de Pi dans les plantes endomycorhizées (Facelli et *al.*, 2010 ; Smith et *al.*, 2004).

L'expression des systèmes de transport de Pi de la plante localisés dans les cellules épidermiques est alors plus ou moins régulée négativement, ce qui diminue la capacité propre des racines endomycorhizées à absorber le Pi. Cette absence de transporteurs de Pi épidermiques est compensée par l'expression de nouveaux systèmes de transport de Pi spécifiquement induits par la mycorhization et localisés dans la membrane plasmique des cellules du cortex qui hébergent les arbuscules (Harrison et *al.*, 2002 ; Rausch et *al.*, 2001)

Ainsi, les ions Pi absorbés par les hyphes loin de la racine sont transportés dans les arbuscules où ils franchissent la membrane plasmique fongique par un mécanisme encore inconnu (Smith et Smith, 2011) pour rejoindre le compartiment pariétal commun champignon/racine. Ces ions orthophosphates peuvent alors être prélevés par les systèmes de transport de la plante induits par la mycorhization. L'efficacité de la symbiose endomycorhizienne dépendra donc, de l'exploration du sol par les hyphes, de leur capacité à prélever le Pi dans le sol et surtout de libérer du Pi au niveau des arbuscules.

Les plantes interagissent, positivement et négativement, avec les micro-organismes, la symbiose de la plupart des plantes avec les champignons AM est considérée comme étant d'une grande importance pour augmenter la capacité de la plante hôte à augmenter son acquisition de P (Clark et Zeto 2000 ; Smith et *al.*, 2003 ; Morgan et *al.*, 2005 ; Smith et Read 2008). Cette

relation prend la forme d'un transfert bidirectionnel de ressources qui dirige le carbone de l'hôte vers les champignons et les nutriments, en particulier le P, des champignons vers la plante hôte (Brown et *al.*, 2013)

Le principal avantage pour la plante réside dans une augmentation du volume de sol exploité par le mycélium fongique qui se projette sous forme d'hyphes au-delà de la zone d'appauvrissement en P de la racine (Smith et Read 2008).

Chapitre V.

Materiel et méthodes

1 Coloration des racines de l'orge

La coloration des racines de l'orge se fait après rinçage à l'eau distillée, en utilisant le bleu Trypan 0.05% (0,5 g de bleu Trypan/L dans un mélange eau, glycérol et acide lactique (1:1:1 v/v/v)) pendant 1 heure à 70°C et éclaircissement dans une solution de KOH 10% (v/v) pendant 1 heure à 70°C (Phillips et Hayman, 1970). Les fragments racinaires de l'orge seront placés entre lames et lamelles pour les observer au microscope optique (x100). Les structures fongiques qui seront observées à l'endroit de l'intersection de l'axe de l'objectif et le fragment racinaire seront quantifiées (McGonigle et *al.* 1990).

2 Méthodes utilisées pour l'identification des mycorhizes

Les techniques d'isolation des champignons dans le sol sont multiples. Mukerji et *al.*, (2002) résument les techniques suivantes :

2.1 Observation directe

Les lames de verre sont enterrées dans le sol pendant une durée connue et après cette période, ces lames sont observées au microscope optique avec ou sans coloration.

2.2 Technique d'immersion

Dans le sol les champignons présentent des hyphes en croissance active qui sont isolés par la technique d'immersion (Boyetchko, 1996). Le principe de base de cette méthode est que le milieu isolant est placé dans le sol de manière à être séparé du sol par un espace d'air. Le milieu est laissé dans le sol pendant 5 à 8 jours. Par la suite de petites portions sont collées sur un milieu sélectif au laboratoire. Les champignons apparaissant dans les plaques de l'inoculum sont isolés et purifiés dans des inclinaisons d'agar pour une identification plus poussée. Des trous sont percés à égale distance sur les parois de chaque tube de centrifugeuse. Ces trous sont enveloppés avec du ruban adhésif ou scotch afin de fermer temporairement les trous. Le milieu isolant est versé dans chaque tube en laissant suffisamment d'espace en haut. Les tubes sont bouchés avec du coton et mis dans l'autoclave.

2.3 Méthode de la plaque du sol de Warcup

De petits volumes de sol sont dispersés dans un volume connu d'agar nutritif, en utilisant des aiguilles stériles à bouts plats. 5-15 mg d'échantillon de sol sont aplatis dans une boîte de pétri stérile, une goutte d'eau stérile est ajoutée et un échantillon de sol est complètement brisé et dispersé sur la base du plat. La méthode idéale pour l'isolement de l'hyphes à croissance active dans le sol est de prendre 10 ml de ce milieu.

2.4 Méthode de la plaque de dilution

Les échantillons de sol sont mis en suspension dans une série de dilutions (**Fig. 18**) c'est-à-dire 1 : 100 ; 1 : 1 000 ; 1 : 10 000 (Brejda et *al.*, 1998). Les dilutions appropriées sont étalées

sur un milieu nutritif adéquat. Les suspensions de sol sont constituées d'une quantité connue (en poids et en volume) et d'un type d'échantillon de sol.

Cette méthode donne cependant un comptage presque total des spores dans un échantillon de sol particulier. Le nombre de gramme de poids sec du sol est calculé en multipliant le nombre avec la dilution. Pour obtenir une image complète de la méthode de la plaque de dilution de la mycoflore du sol et de la méthode de la plaque de sol de Warcup doivent être utilisées ensemble.

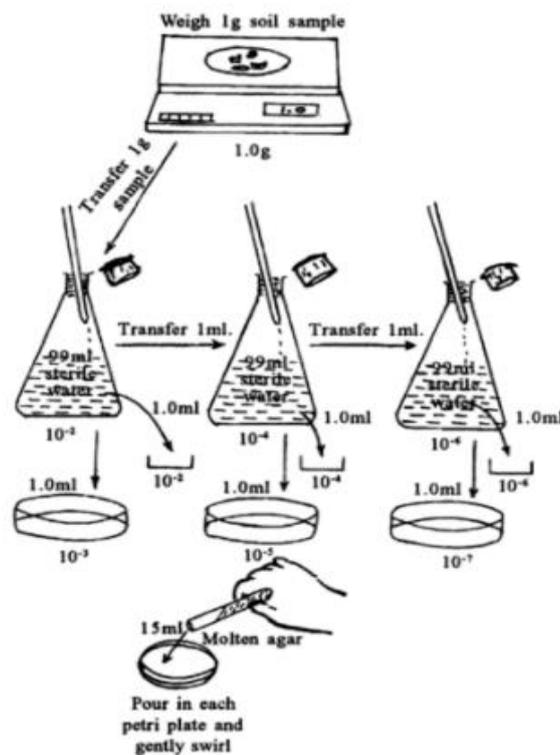


Figure 18 : Préparation de la dilution du sol (Brejda et *al.*, 1998).

3 Méthode de quantification de la colonisation mychorizienne

Dans cette technique, l'estimation de la colonisation mycorhizienne se résume selon Trouvelot et *al.*, (1986) comme suit :

- a. Monter 15 fragments de racines sur une dispositif qui consiste à préparer deux lames (30 fragments de racines au total).
- b. Observer ces fragments au microscope et évaluer selon la gamme de classes indiquée dans la figure (19, 20). Ces classes donneront une estimation rapide du niveau de colonisation mycorhizienne de chaque fragment racine fixé et de l'abondance des arbuscules.

c. calculer les paramètres : % F, % M, % m, % a et % A

Fréquence des mycorhizes dans le système racinaire

$$F\% = (\text{nb de fragments myco/nb total}) \times 100$$

Intensité de la colonisation mycorhizienne dans le système racinaire

$$M\% = (95n_5 + 70n_4 + 30n_3 + 5n_2 + n_1) / (\text{nombre total})$$

où n_5 = nombre de fragments notés 5; n_4 = nombre de fragments 4 etc...

Intensité de la colonisation mycorhizienne dans les fragments de racines

$$m\% = M \times (\text{nb total}) / (\text{nombre mycorhize})$$

Abondance des arbuscules dans les parties mycorhiziennes des fragments racinaires

$$a\% = (100m_{A3} + 50m_{A2} + 10m_{A1}) / 100$$

Où m_{A3} , m_{A2} , m_{A1} sont le% de m, notés A3, A2, A1, respectivement, avec :

$$m_{A3} = ((95n_5A_3 + 70n_4A_3 + 30n_3A_3 + 5n_2A_3 + n_1A_3) / \text{nombre de mycorhizes}) \times 100 / m$$

Et de même pour A2 et A1. Abondance des arbuscules dans le système racinaire

$$A\% = a * (M/100)$$

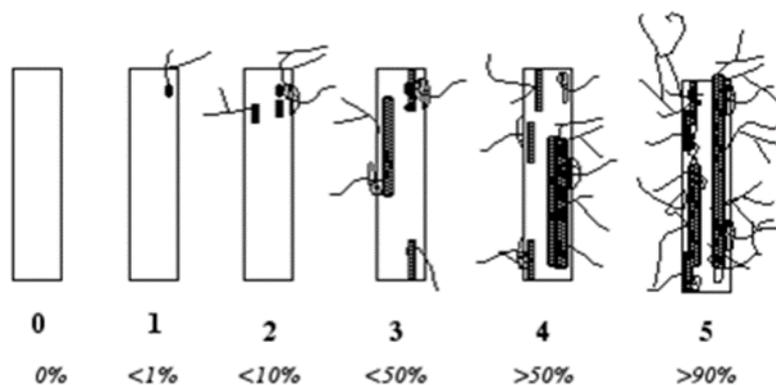


Figure 19 : notation de la colonisation mycorhizienne en classe de 0 à 5 (Trouvelot et al., 1986).

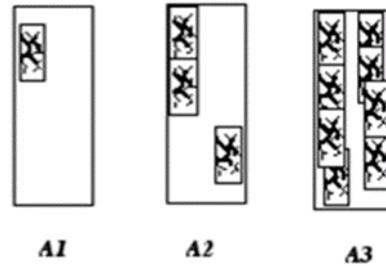


Figure 20 : notation d'abondance arbusculaire (A1: Quelques arbuscules, A2 : Arbuscules fréquents , A3 : Arbuscules très abondant) (Trouvelot et *al.*, 1986).

4 Détermination du phosphore biodisponibles dans les sols

Pour estimer le phosphore assimilable par les plantes plusieurs techniques sont utilisées, parmi ces techniques la méthode OLSEN est mieux calibrée afin de doser les pools assimilables dans les sols des milieux semi-arides (Olsen *et al.*, 1954).

Cette méthode permet d'extraire dans le sol les formes du phosphore dont orthophosphates qui peuvent être réellement interceptées par les racines. Cette méthode donne des informations qui sont les plus en accord avec les résultats donnés par les méthodes biologiques (Fardeau et al., 1988).

5 Dosage du phosphore assimilable

Le phosphore assimilable est déterminé avec la méthode Olsen, l'extraction de l'acide phosphorique dans cette méthode se fait avec une solution de NaHCO₃ à 0,5 M dont le pH est de 8,5. Le rapport sol/solution est de 1/20. La suspension est agitée pendant 30 mn en présence du charbon actif exempt de phosphore, afin d'enlever la coloration des extraits, ce dernier est utilisé dans toutes les méthodes chimiques. Après filtration les échantillons passent au colorimètre à 660 nm, après réduction du complexe phospho-molybdique au chlorure stanneux (SnCE). L'intensité de la couleur est proportionnelle à la concentration en orthophosphate, le phosphore soluble est dosé après une extraction simple à l'eau distillée dont le rapport sol/eau est de 1/10. Puis agiter pendant deux heures. Le dosage se fait aussi par colorimétrie à 660 nm (Boudiaf, 2014).

Conclusion et perspectives

Conclusion et perspectives

L'application de l'agriculture de conservation dans la région semi-aride, est une nouvelle approche qui vise à améliorer la production céréalière dans ces zones, qui rencontre de nombreuses contraintes agronomiques à savoir la fragilité des sols, leur érosion et le stress hydrique.

Selon cette approche l'augmentation des rendements de l'orge peut se faire grâce aux techniques du semis direct, avec une insertion des légumineuses dans les systèmes de cultures et la couverture permanente des sols. En effet, ces techniques d'agriculture de conservation améliorent les propriétés chimique et biologique du sol, qui résulte de la préservation de sa structure, de son enrichissement en matière organique et en éléments nutritifs, avec un équilibre du biofonctionnement du sol.

Le phosphore est l'un des nutriments les plus importants au développement des plantes et le plus complexe dans le sol. Sa biodisponibilité dans le sol, nécessite plusieurs mécanismes qui peuvent être compromis par plusieurs pratiques culturales. La stimulation et la préservation des CMA est l'une des résultantes les plus importantes du semis direct sur les propriétés biologiques des sols. L'importance de ces CMA réside dans leurs rôles à augmenter la capacité d'absorption de l'eau et du phosphore, en développant un réseau de filaments qui explorent de grands volume du sol.

Les plantes et les champignons s'associent, au travers des relations rhizosphériques, symbiotiques, modifient considérablement la quantité de P que la plante est capable d'acquérir tout au long de sa croissance (biodisponibilité).

Cependant, de nombreuses études sur la modification des racines, la stimulation des activités biologiques du sol et la gestion du phosphore dans le continuum sol-rhizosphère-plantes doivent être effectuées pour arriver à un résultat sur l'assimilation de ce dernier par l'orge sous climat semi arides.

Les travaux scientifiques récents décrits dans cette synthèse permettent de mieux comprendre les processus qui augmentent la biodisponibilité du P pour la culture de l'orge sous climat semi-aride. Malgré la complexité des déterminants de la disponibilité du phosphore révélée par l'ensemble des travaux scientifiques, nous pouvons proposer des pistes pour transposer ces nouvelles connaissances en termes d'applications agronomiques. Ces pistes incluent l'amélioration végétale, la valorisation des différentes formes de phosphore du sol via la stimulation des activités biologiques du sol et une meilleure prédiction de la biodisponibilité potentielle du P dans le sol.

Pour une meilleure acquisition du phosphore par l'orge, nous proposons les perspectives suivantes :

Il serait intéressant de sélectionner des génotypes avec une aptitude élevée pour le stockage du phosphore au niveau des cellules de la plante.

Faire des rotations avec des légumineuses dans le but d'enrichir le sol en phosphore et en azote.

Tenir compte de la réaction des espèces et de leurs génotypes aux mécanismes de facilitation entre les espèces et aux mécanismes intrinsèques de la rhizosphère.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

1. **Adjel, F. (2018).** Analyse de la tolérance de l'orge *Hordeum vulgare* L. au stress salin (Doctoral dissertation).
2. **Akiyama K., (2007).** Chemical identification and functional analysis of apocarotenoids involved in the development of arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Bioscience biotechnology and biochemistry*, 71(6) : pp 1405- 1414.
3. **Alaoui S.B. (2003).** Conduite technique de l'orge. Production de fourrage à partir de céréales cultivées seules ou mélangées avec les légumineuses. Techniques de production des principales cultures fourragères en Bour et en irrigué. Session de formation au profit des techniciens et ingénieurs de l'ORMVA des Doukkala. Décembre 2003.
4. **Allen M.F., (2007).** Mycorrhizal fungi: highways for water and nutrients in arid soils. *Vadose Zone Journal* 6, pp 291-297.
5. **Atarés, P. (2006).** Semis direct dans la vallée moyenne de l'Ebre : Résumé des résultats et analyse économique. Options Méditerranéennes. Série A : Séminaires Méditerranéens (CIHEAM).
6. **Bardgett R.D., Mommer L., De Vries F.T., (2014).** Going Underground: Root Traits as Drivers of Ecosystem Processes. *Trends in Ecology & Evolution* 29 (12) : pp 692–699.
7. **Bartehelemy P. et Boisgontier D., (1990).** “Peut – on supprimer le labour ? ” Ed. Ciheam, Options méditerranéennes, : pp 78-84.
8. **Barther M, (2006) ; in Souilah N, (2009) :** Diversité de 13 génotype d'orge (*Hordeum vulgare* L.) et 13 génotype de blé (*Triticum aestivum* L.) étude des caractères de production et d'adaptation, mémoire de magister en biologie végétale, université Mantouri de Constantine 2009. 165p.
9. **Belaid D. (1996).** Aspect de la céréaliculture algérienne. Office des Publications Universitaires, Alger pp 207-217.
10. **Belaid D. (2015).** Le semis-direct, une opportunité de développement. Communication au Séminaire International « Systèmes de Production en Zones Semi-arides. Diversité Agronomique et Systèmes de Cultures ». Université Mohamed Boudiaf, M'sila. 04 et 05 Novembre 2015. 6p.
11. **Benider, C. (2018).** Performances de l'association céréales-légumineuses en systèmes fourragers des régions semi-arides (Doctoral dissertation).
12. **Benlaribi M., (1990).** Adaptation au déficit hydrique chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.) : Etude des caractères morphologiques et physiologiques. Thèse de Doctorat d'état, I.S.N.- Université de Constantine, 164p.
13. **Bessaoud, O., Pellissier, J. P., Rolland, J. P., & Khechimi, W. (2019).** Rapport de synthèse sur l'agriculture en Algérie.

Références bibliographiques

14. **Blaudez D., Botton B., Chalot M., (2000).** Effects of heavy metals on nitrogen uptake by paxillus involutus and mycorrhizal birch seedlings. *FEMS Microbiology Ecology*, 33: pp 61-67.
15. **Bonfante P, Genre A. (2010).** Mechanisms underlying beneficial plant-fungus interactions in mycorrhizal symbiosis. *Nature communications*, 1(4), 48 p.
16. **Boudiaf-Nait Kaci M. (2014) :** Biodisponibilité du phosphore dans la rhizosphère de l'olivier (*Olea europaea L.*), Thèse de doctorat. Département des sciences agronomiques et des sciences Biologiques, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou. 265p.
17. **Boulal H., Zaghouane O., EL Mourid M. et Rezgui S., 2007.** Guide pratique de la conduite des céréales d'automne (blés et orge) dans le Maghreb (Algérie, Maroc, Tunisie). Ed. TIGC, INRA, ICARDA, Algérie, 176p.
18. **Bournine (2017).** La double symbiose mycorhizienne chez deux espèces forestières, *Taxus baccata L. et Populus nigra L.*, situées dans la région de Tizi-Ouzou (Tikjda, Akfadou et Ait zikki) 9p.
19. **Bouslama, M. and Schapaugh, W. T. (1984),** Stress tolerance in soybean. I: Evaluation of three screening techniques for heat and drought tolerance. *Crop Science*, 24: pp933-937.
20. **Boussen, H., Ben Salem, M., Slama, A. & Rezgui S. (2009).** Évaluation de la tolérance au stress hydrique de quelques lignées de blé dur (*Triticum durum desf.*). *Annales de l'INRAT*, 82: pp7-29.
21. **Bouzerzour, H. (1990).** The adaptation characteristics of barley for the high plains of Setif (No. 95-011641. CIMMYT.).
22. **Boyetchko, S. M. (1996).** Impact of soil microorganisms on weed biology and ecology. *Phytoprotection*, 77: pp 41-56.
23. **Brejda, J. J., Moser, L. E. and Vogel, K. P. (1998).** Evaluation of switchgrass rhizosphere microflora for enhancing seedling yield and nutrient uptake. *Agronomy Journal*, 90 : pp 753-758.
24. **Briggs, D. E. (1998).** Malts and malting. London, Springer.
25. **Brown, L. K., George, T. S., Barrett, G. E., Hubbard, S. F., & White, P. J. (2013).** Interactions between root hair length and arbuscular mycorrhizal colonisation in phosphorus deficient barley (*Hordeum vulgare*). *Plant and Soil*, 372(1-2), pp 195-205.
26. **Brundrett M.C., (2002).** Coevolution of roots and mycorrhizas of land plants. *New Phytologist* 154, pp 275- 304.
27. **Brundrett, M.C., (2008).** Mycorrhizal Associations: The Web Resource. <http://mycorrhizas.info/vam.htm>.

Références bibliographiques

28. **Calonne M., (2012).** Impact des hydrocarbures aromatiques polycycliques sur le métabolisme lipidique et le transport du phosphore chez le champignon mycorhizien à arbuscules *Rhizophagus irregularis* (Doctoral dissertation). p 9.
29. **Camille M., (1980) :** Céréales. Phytotechnie spéciale bases scientifiques et techniques de la production des principales espèces de grande culture en France. Maison rustique, Paris ,1980. 318p.
30. **Camille, D (2015).** Etude de la mycorhization du blé sur trois niveaux de diversité génétique : culture simple, mélange variétal et association blé/légumineuse.
31. **Ceccarelli S. etGrando S., (1992)-** Selection environment and environmental sensivity in barley. *Euphytica*; 57: pp 157-167.
32. **Ceccarelli, S., S. Grando, A. Impiglia. (1998).** Choice of selection strategy in breeding barley for stress environments. *Euphytica*, 103 : pp 307-318.
33. **Chabert, A., & Sarthou, J. P. (2017).** Agriculture de conservation des sols et services écosystémiques. *Droit et Ville*, (2), pp 135-169.
34. **Chadefaud et Emberger, (1960) :** Chadefaud M. et Emberger L., 1960- Traité de botanique. Systématique. Les végétaux vasculaires par L. Emberger. Fasciculé Masson et Cie. Tome II, 753p.
35. **Chevrier A. et Barbier S., (2001).** “Performances économiques et environnementales des techniques agricoles de conservation des sols création d’un référentiel et premier résultat”. <http://www.ec.europa.eu / environnement / pdf/ mbonnet-annex3>.
36. **Coio Y, (1957)** U.S. Department of Agriculture: Official Grain Standards of the United States, S.49. Washington: U.S. Government Printing Office pp 269-270.
37. **Condrón LM, Turner BL, Cade-Menun BJ (2005)** Chemistry and dynamics of soil organic phosphorus. In Sims JT, Sharpley AN, eds, *Phosphorus: Agriculture and the Environment*. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, Inc., Madison, WI, pp 87–121.
38. **Cordell D ,Drangert JO ,Blanc S (2009).** L’histoire du phosphore : sécurité alimentaire mondiale et matière à réflexion . *Glob Environ Change* 19 : pp 292 – 305.
39. **Davies F.T., J.R., R.G., Linderman (1993).** Drought resistance of mycorrhizal pepper plants independent of leaf P concentration-response in gas exchange and water relations *Physiologia Plantarum*,87: pp 45-53.
40. **Dekkiche, N., Ait abdellah-Djennadi, F., Ghalem-Djender, Z., Oumdjane, K. & Zaghouane-Boufenar, F. (2010).** Cultures et coûts de production des grandes cultures. ITGC, El-Harrach, Alger, 96p.

Références bibliographiques

41. **Derrien D., Dignac M.F., Basile-Doelsch I., Barot S., Cécillon L., Chenu C., Chevallier T., et al., (2016).** Stocker du C dans les sols: quels mécanismes, quelles pratiques agricoles, quels indicateurs? *Étude et Gestion des Sols*. *Etude et Gestion des Sols* 23: pp 193-223.
42. **Doran, J.W., (1980).** Soil Microbial and Biochemical Changes Associated with Reduced Tillage. *Soil Science Society of America Journal*, 44, 765–771 Kladivko, E.J., 2001. Tillage systems and soil ecology. *Soil Tillage Research*, 61, pp 61–76.
43. **Drénou C., Bonneau M., Charnet F., Cruiziat P., Frochot H., Garbaye J et al., (2006).** Les racines face cachée des arbres. Ed. Institut pour le développement Forestier, Service d'Utilité Forestière du centre National Professionnel de Propriété Forestière, Paris, 335 p.
44. **Drew M.C., (1975).** Comparion of effects of a localized supply of phosphate, nitrate, ammonium and potassium on growth of seminal root system, and shoot, in barley. *New Phytologist* 75, pp 479-490.
45. **Drijber, R.A., Doran, J.W., Parkhurst, A.M., Lyon, D.J., (2000).** Changes in soil microbial community structure with tillage under long-term wheat-fallow management. *Soil Biology & Biochemistry*, 32, pp 1419–1430.
46. **Facelli E., Smith S.E., Facelli J.M., Christophersen H.M., Smith F.A., (2010).** Underground friends or enemies: model plants help to unravel direct and indirect effects of arbuscular mycorrhizal fungi on plant competition. *New Phytologist* 185, pp 1050-1061.
47. **Facelli E., Smith S.E., Facelli J.M., Christophersen H.M., Smith F.A., (2010).** Underground friends or enemies: model plants help to unravel direct and indirect effects of arbuscular mycorrhizal fungi on plant competition. *New Phytologist* 185, pp 1050-1061.
48. **FAO. (2012) :** <http://www.fao.org/01/0/ah864f/ah864f00.htm>. 2013.
49. **FAO. (2016) :** <http://www.fao.org/01/0/ah864f/ah864f00.htm>. 2020.
50. **Fardeau, J. C., Morel, C., & Boniface, R. (1988).** Pourquoi choisir la methode Olsen pour estimer le phosphore" assimilable" des sols ?
51. **Farooq, M., Siddique, K.H.M., (2015a).** Conservation Agriculture : Concepts, Brief History, and Impacts on Agricultural Systems. In : *Conservation Agriculture* (M. Farooq, K.H.M. Siddique, eds.), Springer International Publishing, Switzerland, pp 3–17.
52. **Feillet P., (2000).** Le grain de blé. Composition et utilisation. Mieux comprendre. INRA. ISSN : 1144- 7605. ISBN : 2- 73806 0896- 8. 308p.
53. **Fellah A., Benmahammed A., Djekoun A.et Bouzerzour H., (2002) :** Sélection pour améliorer la tolérance au stress abiotique chez le blé dur (*Triticum drums Desf.*) . Actes de l'IAV Hassan II, (Maroc) 22, pp 161-170.

Références bibliographiques

54. **Fernandez, G.C.J. (1992).** Effective selection criteria for assessing plant stress tolerance. In: C.G. Kuo (Ed) Adaptation of food crops to temperature and water stress. Proceeding of the international Symposium on adaptation of vegetables and other food crops in temperature and water stress. Taiwan, 13-16 Aug. Chapter 25, pp 257-270.
55. **Fischer R. A. & Maurer R.C. (1978).** Drought resistance in spring wheat cultivars. Part 1: Grain yield response. Australian Journal of Agricultural Research, 29: pp 897-912.
56. **Freeman, P. L., & Palmer, G. H. (1984).** The structure of the pericarp and testa of barley. Journal of the Institute of Brewing, 90(2), pp 88-94.
57. **Frey, S.D., Elliott, E.T., Paustian, K., (1999).** Bacterial and fungal abundance and biomass in conventional and no-tillage agroecosystems along two climatic gradients. Soil Biology & Biochemistry, 31, pp 573–585.
58. **Gadkar V, Rillig MC, (2006).** The arbuscular mycorrhizal fungal protein glomalin is a putative homolog of heat shock protein 60. FEMS Microbiology Letters 263 : pp 93-101.
59. **Gahoonia T.S., Care D., Nielsen N.E., (1997).** Root hairs and phosphorus acquisition of wheat and barley cultivars. Plant and Soil 191, pp 181-188.
60. **Garbaye J., (2013).** La symbiose mycorhizienne, une association entre les plantes et les champignons. Ed. Quae, Versailles, 251 p.
61. **Gavériaux J.P., (2012).** Les *Glomeromycota* – Mycorhizes VAM et Geosiphon pyriformis (Kützing) Wettstein, Bull. Soc. Mycol. Nord Fr., n°92, pp 1-17.
62. **Gavuzzi, P., Rizza, F., Palumbo, M., Campaline, R. G., Ricciardi, G.L. and B. Borghi, B. (1997).** Evaluation of field and laboratory predictors of drought and heat tolerance in winter cereals Canadian Journal of Plant Science, 77: p 523-531.
63. **Gay G., Normand L., Marmeisse R., sotta B., Debaud J.C., (1994).** Auxin over producer mutants of *Hebeloma cylindrosporum* Romagnesi has increased mycorrhizal activity. New phytol.128: pp 659-670.
64. **Gea L., Normand L., Vian B., et al., (1994).** Structural aspects of ectomycorrhiza of *Pinus pinaster* formed by an IAA overproducer mutant of *Hebeloma cylindrosporum* Romagnési. New phytologist, 128 : pp 659-670.
65. **Gilbert N (2009).** Environnement ; élément nutritif en voie de disparition. Nature 461: 716 – 718. Raghothama KG (1999) Acquisition de phosphate. Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol 50: pp 665 – 693.
66. **Grando S., Macpherson H. G. (2006):** Food Barley: Importance, uses and local knowledge.
67. **Grillot., (1959).** La classification des orges cultivées. Au. Am. Plantes, 4 : pp446-486.

Références bibliographiques

68. **Hachi, I., Akrib, K., & Arslane, S. (2005).** Caractérisation de la proline, indicateur de stress hydrique chez le blé dur (*Triticum durum* Desf) en zone méditerranéenne (Doctoral dissertation, Université Mohamed BOUDIAF de M'Sila).
69. **Hakimi, M. (1989).** Les systèmes traditionnels basés sur la culture de l'orge. Proc. Symp. On the agrometeorology of rainfed barley based farming systems. Eds. WMO/ ICARDA : pp 179-183.
70. **Hamdan, L. (2010).** Caractérisation de la communauté fongique impliquée dans la minéralisation du soufre organique dans les rhizosphères de colza et d'orge (Doctoral dissertation).
71. **Hamli, S., Labhilili, M., Kadi, K., Addad, D. and Bouzerzour, H. (2018).** Heat Shock Effects on Physiological Parameters Durum Wheat Seedlings and Relationships with Stress Tolerance Indices. In : Kallel A., Ksibi M., Ben Dhia H., Khélifi N. (Ed) Recent Advances in Environmental Science from the Euro-Mediterranean and Surrounding Regions. EMCEI 2017. Advances in Science, Technology & Innovation (IEREK Interdisciplinary Series for Sustainable Development). Springer, Cham, pp 1333-1335.
72. **Hanchane M., (1998) :** Estimation des risques climatiques en fonction de la date de semis de l'orge au Maroc. Précipitations et cultures céréalières dans le Centre-ouest du Maroc. In : Méditerranée : 88 (1). pp 51-58.
73. **Hanchane, M. (2009).** Simulation de l'effet de la date de semis sur la satisfaction des besoins en eau de l'orge par le modèle CERES en climat semi-aride marocain. Science et changements planétaires/Sécheresse, 20(4), pp 354-359.
74. **Hansen JC, Cade-Menun BJ, Strawn DG (2004)** Phosphorus speciation in manure-amended alkaline soils. J Environ Qual 33 : pp 1521–1527.
75. **Harrison AF (1987)** Soil Organic Phosphorus—A Review of World Literature. CAB International, Wallingford, Oxon, UK, 257p.
76. **Harrison M.J., Dewbre G.R., Liu J.Y., (2002).** A phosphate transporter from *Medicago truncatula* involved in the acquisition of phosphate released by arbuscular mycorrhizal fungi. Plant Cell 14, pp 2413-2429.
77. **Hazmoune T., (2006) –** Le semis profond comme palliatif à la sécheresse. Rôle de la coléoptile dans la levée et conséquences sur les composantes du rendement. Thèse docteur d'état. Univ Constantine ; 168p.
78. **Heneen, W. K. (2010).** Cytogenetics and Molecular Cytogenetics of Barley: A Model Cereal Crop with a Large Genome. In Barley pp. 112–121.
79. **Hinsinger P., Brauman A., Devau N., Gerard F., Jourdan C., Laclau J.P., Le Cadre E., Jaillard B., Plassard C., (2011).** Acquisition of phosphorus and other poorly mobile nutrients by roots. Where do plant nutrition models fail? Plant and Soil 348, pp 29-61.

Références bibliographiques

80. **Hinsinger P., Plassard C., Jaillard B., (2006).** Rhizosphere: A New Frontier for Soil Biogeochemistry. *Journal of Geochemical Exploration* 88 (1–3) : pp 210–213.
81. **Höije, A., M. Gröndahl, K. Tømmeraas and P. Gatenholm (2005).** "Isolation and characterization of physicochemical and material properties of arabinoxylans from barley husks." *Carbohydrate Polymers* 61(3): pp 266-275.
82. **Hossain, A.B.S., Sears, A.G., Cox, T. S. and Paulsen, G.M. (1990).** Desiccation tolerance and its relationship to assimilate partitioning in winter wheat. *Crop Science*, 30 : pp 622-627.
83. **Ishaq, S.L., (2017).** Plant-microbial interactions in agriculture and the use of farming systems to improve diversity and productivity. *AIMS Microbiology*, 3, pp 335–353.
84. **Jakobsen I. (1995).** Transport of phosphorus and carbon in VA mycorrhizas. Dans: Varma A., Hock B. (eds) *Mycorrhiza Structure, Function, Molecular Biology and Biotechnology*. Springer-Verlag, Allemagne, pp 297-325.
85. **Jakobsen I., Abbott L.K., Robson A.D., (1992).** External hyphae of vesicular arbuscular mycorrhizal fungi associated with *Trifolium subterraneum* L. 1.2. Hyphal transport of P32 over defined distances. *New Phytologist* 120, pp 509-516.
86. **Jansa J, Wiemken A, Frossard E. (2006).** The effects of agricultural practices on arbuscular mycorrhizal fungi. *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.*, 266, pp. 89-105.
87. **Jansa J., Mozafar A., Frossard E., (2005).** Phosphorus acquisition strategies within arbuscular mycorrhizal fungal community of a single field site. *Plant and Soil* 276, pp 163-176.
88. **Javot H., Penmetza R.V., Terzagui N., Cook D.R., Harrison M.J. (2007).** A *Medicago truncatula* phosphate transporter indispensable for the arbuscular mycorrhizal symbiosis. *PNAS* 104 : pp 1720-1725.
89. **Jianbo Shen, Lixing Yuan, Junling Zhang, Haigang Li, Zhaohai Bai, Xinping Chen, Weifeng Zhang, Fusuo Zhang Published July (2011).** Phosphorus Dynamics: From Soil to Plant pp 111-1752.
90. **Jing J., Rui Y., Zhang F., Rengel Z., Shen J., (2010).** Localized application of phosphorus and ammonium improves growth of maize seedlings by stimulating root proliferation and rhizosphere acidification. *Field Crops Research* 119, pp 355-364.
91. **Karandashov V. et Bucher M., (2005).** Symbiotic phosphate transport in arbuscular mycorrhizas. *Trends in Plant Science*, 10, n°1 pp 22-29.
92. **Kassam A., Friedrich T. et Derpsch R., (2010).** Conservation agriculture in the 21st century: a paradigm of sustainable agriculture. *European Congress on Conservation Agriculture*, Madrid, Spain, 2010 : 1 – 46.

Références bibliographiques

93. **Kheyar M.O., Amara M. et Harrad F., (2007).** La mécanisation de la céréaliculture algérienne : constat et perspectives. *Annales de l'Institut National Agronomique- ElHarrach-*, Vol.28 Numéro 1 et 2, 2007 : pp 95 - 111.
94. **Kruse, J., Abraham, M., Amelung, W., Baum, C., Bol, R., Kühn, O., Lewandowski, H., Niederberger, J., Oelmann, Y., Rieger, C., Santner, J., Siebers, M., Siebers, N., Spohn, M., Vestergren, J., Vogts, A. & Leinweber, P. (2015).** Innovative methods in soil phosphorus research: A review. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 178, pp 43–88.
95. **Lambers H., Mougel C., Jaillard B., Hinsinger P., (2009).** Plant-Microbe-Soil Interactions in the Rhizosphere: An Evolutionary Perspective. *Plant and Soil* 321 (1–2) : pp 83–115.
96. **Laure Gaufichon, Jean-Louis Prioul, Bernard Bachelier, (2010).** Quelles sont les perspectives d'amélioration génétique de plantes cultivées tolérantes à la sécheresse ? 29p.
97. **Le Tacon F. (1985).** INRA Nancy- La Recherche n° 166 mai.
98. **Lin, C.S., Binns M.R. and Lefkovitch L.P. (1986).** Stability analysis: where do we stand? *Crop Science*, 26 : pp 894-900.
99. **Linderman RG. (1988).** Mycorrhizal interactions with the rhizosphere microflora: the mycorrhizosphere effect. *Phytopathology* 78: pp 366–371.
100. **Linderman, R. G. (1988).** Mycorrhizal interactions with the rhizosphere microflora. The mycorrhizosphere effect. *Phytopathology*, 78 : pp 366-371.
101. **Lynch, J. (1995).** Root architecture and plant productivity. *Plant physiology*, 109(1), 7p.
102. **Lynch, J. M. (1990).** Introduction : Some consequences of microbial rhizosphere competence for plant and soil. In : "The Rhizosphere" (ed. Lynch, J. M.), John.
103. **M.A.D.R.P. (2006).** Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural et de la Pêche, annuaires statistiques.
104. **Mäder P., Edenhofer S., Boller T., Wiemken A. and Niggli U., (2000).** Arbuscular mycorrhizae in a long-term field trial comparing low-input ('organic', 'biological') and high-input ('conventional') farming systems in a crop rotation. *Biology & Fertility of Soils*, 31, pp 150-156.
105. **Madic, M., Paunovic, A., Djurovic, D., Knezevic, D. and Tanaskovic, S. (2012).** Breeding barley (*Hordeum vulgare* L.) for abiotic and biotic limiting factors. Third International Scientific Symposium "Agrosym Jahorina 2012", 6p.
106. **Madjida, Chekhma, Zahra, H. F., & Yasmine, A. I. B. (2020).** Monoculture et culture en association (Céréales-légumineuses) : Fertilisation minérale et biologique (Doctoral dissertation, Université Mohamed Boudiaf-M'sila).

Références bibliographiques

107. **Mariotte P., Mehrabi Z., Bezemer T.M., De Deyn G.B., Kulmatiski A., Drigo B., Veen G.F.(Ciska), van der Heijden M.G.A., Kardol P., (2018).** Plant–Soil Feedback: Bridging Natural and Agricultural Sciences. *Trends in Ecology & Evolution* 33 (2) : pp 129–142.
108. **Martel, Y. A., & Zizka, J. (1977).** Effet de l'addition de soufre a une fertilisation de n, p et k sur les rendements et la qualite de l'orge cultivee en serre. *Canadian Journal of Plant Science*, 57(2), pp 597-606.
109. **Matumoto P., (1996).** Rôle des phosphatases dans l'utilisation du phosphore organique par les champignons ectomycorhiziens et leurs associations avec le Pin laricio de Corse. Influence des surfaces adsorbantes sur l'activité des phosphatases. Thèse doctorat, Montpellier : École Nationale Supérieure Agronomique. P 18.
110. **Mcgonigle TP, Miller MH, Evans DG, Fairchild GL, Swan JA. (1990).** A method which gives an objective measure of colonization of roots by vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. *New Phytologist* 115 : pp 495–501.
111. **McGonigle, T.P., Miller, M.H., Young, D., (1999).** Mycorrhizae, crop growth, and crop phosphorus nutrition in maize-soybean rotations given various tillage treatments. *Plant Soil*, 210, pp 33–42.
112. **Medejerab, A., & Henia, L. (2011).** Variations spatio-temporelles de la sécheresse climatique en Algérie nord-occidentale. *Courrier du savoir*, 11, pp 71-79.
113. **Menad, A., N. Meziani, H. Bouzerzour, A. Benmahammed. (2011).** Analyse de l'interaction génotype x milieu du rendement de l'orge (*Hordeum vulgare* L.) : application des modèles AMMI et la régression conjointe. *Nature & Technology (Université Chlef)* 5 : pp 99-106.
114. **Meyer, J. R and Linderman, R. G. (1986).** Response of subterranean clover to dual inoculation with vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi and a plant growth promoting bacterium *Pseudomonas putida*. *Soil Biology Biochemistry*, 18 : pp 185-190.
115. **Miller RM, Jastrow JD, (1990).** Hierarchy of root and mycorrhizal fungal interactions with soil aggregation. *Soil Biology and Biochemistry* 22 : pp 579-584.
116. **Mossab, M. (2007).** Contribution à l'étude de l'exploitation à double fin de l'orge *Hordeum vulgare* L. en zones semi-arides d'altitude (Doctoral dissertation, INA).
117. **Mousain M., (1989).** Étude de la nutrition phosphatée de symbiotes ectomycorhiziens. Thèse de Doctorat d'État en Sciences, Montpellier. Université des Sciences et Techniques du Languedoc.
118. **Mrabet, R. (2006).** Soil quality and carbon sequestration: Impacts of no-tillage systems. *Options Méditerranéennes*, 69, 43-55. Husson J., La suppression du labour: Conséquences sur les exploitations céréalières de l'Oise. Mémoire de fin d'étude, ISAB, 1997, 95 p + annexes.

Références bibliographiques

119. **Mukerji, K. G., Manoharachary, C., & Chamola, B. P. (Eds.). (2002).** Techniques in mycorrhizal studies. Springer Science & Business Media.
120. **Muñoz-Amatriain M., Cuesta-Marcos A., Endelman J.B., Comadran J., Bonman J.M., Bockelman H.E., Chao S., Russel J., Waugh R., Hayes P.M., Muehlbauer G.J., (2014).**- The USDA Barley Core Collection: Genetic Diversity, Population Structure, and Potential for Genome-Wide Association Studies. PLo S ONE 9(4): e94688.
121. **Münzenberber B., Kottke I., Oberwinkler F. (1992).** Ultrastructural investigations of *Arbutus unedo*-*Laccaria amethystea* mycorrhiza synthesized in vitro. — *Trees*, vol. 7, 1992, pp 40-47.
122. **Ndonga, A. (2018a).** Évaluations agronomiques des champignons mycorrhiziens locaux sur la productivité du manioc (*manihot esculenta crantz*) en sols dégradés des jachères herbeuses à kisangani/rd Congo (Doctoral dissertation). pp 25-30.
123. **Ndonga, A. (2018b).** Évaluations agronomiques des champignons mycorrhiziens locaux sur la productivité du manioc (*manihot esculenta crantz*) en sols dégradés des jachères herbeuses à kisangani/rd Congo (Doctoral dissertation).41p.
124. **Oehl F., Sieverding E., Ineichen K., Mäder P., Boller T., Wiemken A., (2003).** Impact of land use intensity on the species diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in agroecosystems of central Europe, *Applied and Environmental Microbiology*, 69 (5), pp 2816-2824.
125. **Oelkers EH ,Valsami-Jones E (2008).** Réactivité des minéraux phosphatés et durabilité mondiale éléments 4 :pp 83 – 87.
126. **Olsen S. R., Cote C. V., Watanabe F. S., Dean L. A., (1954).** Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. U.S.D.A. Circular 939, 8 p.
127. **ONFAA,(2015).** Observatoire National des filières Agricoles et Agroalimentaires, Le commerce international des céréales, Bilan de la campagne céréalière 2014/2015, pp3-5.
128. **Papathanasiou, F., Dordas, C., Gekas, F., Pankou, C., ElissavetNinou, E., Mylonas, L., Tsantarmas, K., Sistanis, L., Sinapidou, E., Lithourgidis, A., Petrevskaa, J. K., Papadopouloa, I., Zouliamisa, P., Kargiotidou, A. and Tokatlidis, I. (2015).** The use of stress tolerance indices for the selection of tolerant inbred lines and their correspondent hybrids under normal and water-stress conditions. *Procedia Environmental Sciences*, 29 : pp 274 – 275.
129. **Philips, J. M. & Hayman, D.S., (1970).** Improved procedure for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Trans. Br. Mycol. Soc*, 55 : pp 158-161.
130. **Pierzynski, G. M., McDowell, R. W., & Thomas Sims, J. (2005).** Chemistry, cycling, and potential movement of inorganic phosphorus in soils. *Phosphorus: Agriculture and the environment*, 46, pp 51-86.

Références bibliographiques

131. **Plassard C., Rigou L., Mignard E., Arvieu J.-C., Remy J.-C. (2000).** Influence of ectomycorrhizal infection on the rhizosphere pH around roots of maritime pine (*Pinus pinaster* Soland. in Ait.). — *New Phytol.*, vol. 130, pp 141-147.
132. **Prats H., (1960)** - Vers une classification des graminées. *Revue d'Agrostologie Bull. Soc Bot. France* : pp 32-79.
133. **Rasmusson D.C., (1987).** Barley crop. An SSA/ASA Monograph series number 56. Madison, Eds ASA. 250p.
134. **Ratnayake, M., Leonard, R. T., and Menge, J. A. (1978).** Root exudation in relation to supply of phosphorus and its possible relevance to mycorrhiza formation. *New Phytologist*, 81 : pp 543-552.
135. **Rausch C., Daram P., Brunner S., Jansa J., Laloi M., Leggewie G., Amrhein N., Bucher M., (2001).** A phosphate transporter expressed in arbuscule-containing cells in potato. *Nature* 414, pp 462-466.
136. **Rejeb, M.N. et Ben Salem, M. (1993).** Les divers mécanismes d'adaptation à la sécheresse chez les végétaux supérieurs, cas du blé et du caroubier. *Bull. Soc. Sci. Nat. Tunisie*, 22 : pp 49-52.
137. **Rillig MC, Steinberg PD, (2002).** Glomalin production by an arbuscular mycorrhizal fungus: a mechanism of habitat modification? *Soil Biology and Biochemistry* 34 : pp 1371-1374.
138. **Rillig MC, Wright SF, Eviner VT, (2002).** The role of arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin in soil aggregation: comparing effect of five plant species. *Plant and Soil* 238 : pp 325-333.
139. **Rivaton, D. (2016).** Étude des champignons mycorhiziens arbusculaires des sols en systèmes de grandes cultures biologiques sans élevage : application à la nutrition phosphatée. *Sciences du Vivant*. 3p.
140. **Rosielle, A.A. and Hamblin, J. (1981).** Theoretical aspects of selection for yield in stress and non-stress environment. *Crop Science*, 21: pp 943-946.
141. **Runavot, J. L. (2011).** Maltage à faible hydratation: dégradation des structures pariétales, diffusion et modification des protéines aleuroniques et caractérisation des barrières hydrophobes cuticulaires (Doctoral dissertation, Université de Nantes).
142. **Schreiner RP, Bethlenfalvay GJ, (1995).** Mycorrhizal interactions in sustainable agriculture. *Critical Reviews in Biotechnology* 15 : pp 271-285.
143. **Seguy L., Bouzinac S. et Maronzzi C., (2001).** "Système de culture et dynamique de la matière Organique". <http://agroecologie.cirad.fr/postlsfr.pdf>.

Références bibliographiques

144. **Selosse, M.A., Baudoin, E., Vandenkoornhuyse, P., (2004).** Symbiotic microorganisms, a key for ecological success and protection of plants. *Comptes Rendus Biologies*, 327, pp 639–648.
145. **Smith S.E., Smith F.A., (2011).** Roles of Arbuscular Mycorrhizas in Plant Nutrition and Growth: New Paradigms from Cellular to Ecosystem Scales. *Annual Review of Plant Biology* 62, pp 227-250.
146. **Smith S.E., Smith F.A., Jakobsen I., (2004).** Functional diversity in arbuscular mycorrhizal (AM) symbioses : the contribution of the mycorrhizal P uptake pathway is not correlated with mycorrhizal responses in growth or total P uptake. *New Phytologist* 162, pp 511-524.
147. **Smith SE, Read DJ. (2008).** *Mycorrhizal Symbiosis* (AP London, Ed.). New York.
148. **Soltner D., (2005).** Les grandes productions végétales. Céréales. Collection sciences et techniques agricoles. 20è édition. Paris. France, pp 21-55.
149. **Spedding, T.A., Hamel, C., Mehuys, G.R., Madramootoo, C.A., (2004).** Soil microbial dynamics in maize-growing soil under different tillage and residue management systems. *Soil Biology & Biochemistry*, 36,pp 499–512.
150. **Sriman N D., Ankit T., Vinay K P., Ghanshyam V S., (2018):** Effect of nitrogen levels and its time of application on growth parameters of barley (*Hordeum vulgare L.*). *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*: 7(1).pp 333-338.
151. **Sun X.G., Tang M., (2013).** Effect of arbuscular mycorrhizal fungi inoculation on root traits and root volatile organic compound emissions of Sorghum bicolor. *South African Journal of Botany* 88,pp 373- 379.
152. **Tellah S (2005).** Etude du comportement de 19 génotypes d'orges (*Hordeum vulgare L*) dans les conditions de la Mitidja. *Rev. Céréaliculture* 45, 12p.
153. **Tisdall JM, (1991).** Fungal hyphae and structural stability of soil. *Australian Journal of Soil Research* 29 : pp 729-743.
154. **Tisdall JM, (1994).** Possible role of soil microorganisms in aggregation in soils. *Plant and Soil* 159 : pp 115-121.
155. **Trouvelot, A., Kough, J.L. & Gianinazzi-Pearson, V. (1986).** Mesure du taux de mycorrhization VA d'un système racinaire. Recherche des méthodes d'estimation ayant une signification fonctionnelle. Pp 217-221 In : V. Gianinazzi-Pearson & S. Gianinazzi (eds). *The Mycorrhizae. Physiology and Genetics*. INRA Presse, Paris.
156. **Turner BL, Papházy MJ, Haygarth PM, McKelvie ID (2002)** Inositol phosphates in the environment. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* 357:pp 449–469.

Références bibliographiques

157. **Turner BL, Richardson AE, Mullaney EJ (2007)** Inositol Phosphates: Linking Agriculture and the Environment. CAB International, Wallingford, UK, 304p.
158. **Turner, N.C. (1979)**. Drought resistance and adaptation to water deficits in crops plants. Dans : Stress Physiology in Crop Plants, Mussell, H. et Staples, R.C. (éds). Wiley Intersciences, New York, pp 303- 372.
159. **Watson C.A., Atkinson D., Gosling P., Jackson L. Rayns F.W., (2002)**. Managing soil fertility in organic farming systems. *Soil Use & Management*, 18, pp 239–247.
160. **Whan, B.R., Anderson, W.K., Gilmour, R.F., Regan, K.L. et Turner, N.C. (1991)**. A role for physiology in breeding for improved wheat yield under drought stress. Dans : Physiology Breeding of Winter Cereals for Stressed Mediterranean Environments. Les Colloques de l'INRA, 55 :p 179-194.
161. **Wright SF, Upadhyaya A, (1998)**. A survey of soils for aggregates stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant and Soil* 198:pp 97-107.
162. **Zaghouane O., (2009)**. Agriculture de conservation : concepts et principes. Fichier Power Point. Atelier d'étude sur l'agriculture de conservation, ITMAS Sétif, 2009.
163. **Ziadi, N., Whalen, J.K., Messiga, A.J. & Morel, C. (2013)**. Assessment and modeling of soil available phosphorus in sustainable cropping systems. *Advances in Agronomy*, 122,pp 85-126.

Références bibliographiques

RECOURCES WEB :

Source 1 : <https://www.semencemag.fr/orge-domestication-selection.html>

Source 2 : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Orge>

Source 3 : <http://www.fermentation.free.fr/origine.htm>

Source 4 : <https://www.yara.fr/fertilisation/solutions-pour-cultures/orge/carences-orge>.

Source 5 : <https://fr.maps-algeria.com/>

Source 6 : www.smnf.fr