

لجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université des Frères Mentouri Constantine
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie



جامعة الاخوة منتوري قسنطينة
كلية ع الطبيعة و الحياة

Département : Biologie et Ecologie Végétale

Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Sciences Biologiques

Spécialité : « Biotechnologie et Génomique Végétales »

Intitulé :

Effet de l'inoculation des blés dur et tendre (*Triticum durum*. Desf et *T. aestivum*. L) par les champignons mycorhizogènes arbusculaires sous stress hydrique.

Présenté et soutenu par : M^{elle} BELABED Sihem

Le : 16/06/2015

Jury d'évaluation :

Président du jury : Pr. KHALFALLAH Nadra Professeur - UFM Constantine.

Encadrante : Dr. BENABDOUN Faiza Meriem Maitre-assistante « A » - UFM Constantine.

Examinatrice : Dr. HAMMOUDA Dounia Maitre de conférence « B » - UFM Constantine.

Année universitaire

2014 – 2015

Dédicace

Je dédie ce mémoire à :

*La merveilleuse personne que ALLAH m'apporté, à « Papa »,
à qui je dois toute ma réussite,*

*À ma sœur qui a été toujours près de moi, qui s'inquiète et qui
a été à mes cotés depuis mon enfance,*

*Au contentement et à l'espérance de Ma mère, que Allah la
protège,*

À mes frères et à toute ma famille,

À mes proches et amis

À toute ma promotion.

À Wassila Nadji,

&

À mes enseignants...

Remerciements

Avant toute chose, je remercie « ALLAH » qui m'a donné du courage et m'a fortement aidé à achever ce mémoire.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance et remerciements à mon encadrante Dr. BENABDOUN Faïza Meriem, pour ses orientations professionnelles et qui m'a soutenu durant toute cette période.

Je tiens à remercier également Madame la présidente KHALFALLAH Nadra, Professeur à l'université Frères Mentouri de Constantine, qui m'a fait l'honneur et le plaisir de régenter ce jury ainsi que Dr. HAMMOUDA Dounia de collaborer à l'appréciation de mon travail.

Je remercie en toute évidence Mlle. NADJI Wassila pour son aide, ses conseils, ses orientations. Je lui assure le témoignage de ma gratitude et reconnaissance.

Je n'oublie pas de remercier Mr. HAMIDECHI Abdelhafid, Professeur à l'Université Frères Mentouri de Constantine, pour son aide à la réalisation de la partie « Analyse statistiques », sa disponibilité, ses orientations et ses précieux conseils. Qu'il trouve en ces lignes le témoignage de mon grand respect et mes sincères remerciements.

&

Je tiens à porter délicatement et surtout sincèrement un immense remerciement à Mlle. MOUALLEF Adra, Mme. BOULDJADJ Ryma, Mlle Radya, et à toute l'équipe du laboratoire « Génétique, Biochimie et Biotechnologies Végétales » (GBBV) de l'université des Frères Mentouri de Constantine.

Liste des abréviations

AA : Ain-Abid.

B : Boussellem.

CMA : Champignon Mycorhizogène Arbusculaire.

CNUCED : Conférence des Nations Unies sur le Commerce Et le Développement.

H : Hidhab.

IST : Inoculé sous Stress Hydrique.

ITGC : Institut Technique des Grandes Cultures.

MA : Mycorhizes Arbusculaires.

LF : Longueur des feuilles.

LR : Longueur des racines.

PS : Poids Sec.

SPAD: Developments for the Analysis of Soil and Plants.

TCT : Taux de Chlorophylle Totale.

V : Variété.

W : Waha.

Liste des illustrations

Figure 01 :	Evolution du blé.....	04
Figure 02 :	Coupe d'un grain de blé.....	06
Figure 03 :	Stades de développement de blé.....	08
Figure 04 :	Topologie d'une aquaporine dans une membrane.....	14
Figure 05 :	Influence du stress hydrique sur les variables d'état de la plante	18
Figure 06 :	Différentes formes des ectomycorhizes	20
Figure 07 :	Différentes formes des ectendomycorhizes	21
Figure 08 :	Morphologie des mycorhizes arbusculaires.....	22
Figure 09 :	Phylogénie des Gloméromycètes	24
Figure 10 :	Cycle de développement des champignons mycorhiziens à arbuscules ...	25
Figure 11 :	Variation de la longueur des feuilles des blés en différentes conditions	32
Figure 12 :	Mesure de la longueur des racines des blés en différentes conditions	37
Figure 13 :	Variations du poids sec des racines chez les variétés de blé dans différentes conditions.....	38
Figure 14 :	Variation de la teneur en chlorophylle totale chez les variétés de blé en différentes conditions.....	40
Figure 15 :	Variation de la teneur en proline chez les variétés des blés soumises en différentes conditions.....	42
Figure 16 :	Variation de la teneur en sucres solubles chez les variétés des blés en différentes conditions.....	40
Figure 17 :	Observation microscopique des champignons mycorhizogènes à arbuscules chez le blé.....	44
Figure 18 :	Hyphe mycélien intercellulaire dont le tronc se ramifie (tête de flèche) pour former deux arbuscules dans deux cellules adjacentes.....	46
Tableau 01 :	Classification botanique des blés dur et tendre.....	05
Tableau 02 :	Composition chimique du grain de blé.....	07
Tableau 03 :	Les génotypes des blés étudiés et leurs origines	29

Liste des annexes

Annexes 01 :	Courbe étalon du dosage de la proline	54
Annexes 02 :	Courbe étalon du dosage des sucres solubles	54
Annexes 03 :	Longueur des feuilles au 4 ^{ème} stade.....	55
Annexes 04 :	Longueur des racines.....	55
Annexes 05 :	Poids sec des racines.....	55
Annexes 06 :	Taux en chlorophylle (SPAD).....	56
Annexes 07 :	Dosage de la proline.....	56
Annexes 08 :	Dosage des sucres solubles	57
Annexes 09 :	Analyse en Composantes Principales des paramètres mesurés.....	57
Annexes 10 :	Analyse en Composantes Principales (ACP), en déterminant le paramètre le plus discriminant « Sucres solubles ».....	58
Annexes 11 :	Classement des variétés et des traitements en ACP par rapport à l'axe des sucres solubles.....	59
Annexes 12 :	Analyse de la variance pour le paramètre (Sucres solubles)	60
Annexes 13 :	Classement des groupes entre les 4 variétés selon le test Newman-Keuls (SNK) avec un intervalle de confiance à (95%).....	60
Annexes 14 :	Analyse des différences entre les traitements, selon Newman -Keuls (SNK) avec un intervalle de confiance à (95%).....	60

Effet de l'inoculation des blés dur et tendre (*Triticum durum* Desf et *T. aestivum* L) par les champignons mycorhizogènes arbusculaires sous stress hydrique.

Résumé :

La filière céréale en particulier les blés dur et tendre, est plus en plus soumise à des conditions climatiques défavorables, provoquant un stress hydrique important qui est souvent un frein à toute action d'amélioration.

L'objectif de ce travail est de tester l'effet de la mycorhization par les champignons mycorhiziens arbusculaires chez quatre variétés des blés dur et tendre en conditions de stress hydrique. A travers cette étude, une analyse des processus morphologiques, physiologiques, et biochimiques dont la longueur des feuilles et des racines, poids sec des racines, le taux en chlorophylle, les teneurs en proline et en sucres solubles des plantes ont été effectuées.

Les résultats obtenus montrent que l'inoculation augmente considérablement la croissance des feuilles et des racines, leurs poids sec et leurs teneur en chlorophylle, par contre elle réduit les teneurs en proline et en sucre soluble en régime de stress hydrique.

L'effet de l'interaction triple (4 variétés des blés x mycorhization x stress hydrique) a été hautement significatif surtout pour les deux paramètres teneurs en sucres solubles et en proline. En effet l'inoculation des plantes présente une alternative pour tenter de solutionner les problèmes de sécheresse pour les blés dur et tendre sont confrontés.

Mots clés : Champignons mycorhizogènes à arbuscules, stress hydrique, blé dur, blé tendre, paramètres morphologiques, physiologiques, biochimiques

Effect of inoculation of hard wheat and soft wheat (*Triticum aestivum* L and *T. durum* Desf) by mycorrhizal fungi arbusculaires under water stress.

Abstract:

The cereal sector particularly hard and soft wheat, is becoming increasingly subject to adverse weather conditions, causing water stress is of ten an obstacle to any improvement action.

The objective of this work is to test the effect of mycorrhization by mycorrhizal fungi in four varieties of hard wheat and soft under water stress conditions. Through this study, an analysis of morphological processes, physiological, and biochemical such as the length of the leaves and roots, root dry weight, the rate of chlorophyll, the contents of proline and soluble sugars of plants were performed.

The results show that inoculation significantly increases the growth of leaves and roots, their dry weight and chlorophyll, content; by against it reduces levels of proline and soluble sugar in a water stress regime.

The effect of the triple interaction (4 varieties of wheat x mycorrhization x water stress) was highly significant especially for parameters two levels of soluble sugars and proline. Indeed inoculation plants presents an alternative to try to solve drought problems for which the hard wheat and soft face.

Keywords: mycorrhizal fungi Arbuscular, water stress, durum wheat, soft wheat, morphological parameters, physiological, biochemical

تأثير تلقیح كل من القمح الصلب واللين (*Triticum durum. Desf*)
عن طريق الفطريات الميكوريزية (*T.aestivum*
mycorrhizogènes à arbuscules)

في ظروف الإجهاد المائي.

:

قد شهد قطاع الحبوب تدهورا كبيرا بسبب العوامل المناخية السيئة والتي نذكر منها الإجهاد المائي، الذي أصبح عائقا أمام أي إجراء لتحسين الغذاء.

في ظل هذه الظروف، فإن تأثير الفطريات الميكوريزية على نمو القمح في ظل الإجهاد المائي

بالفطريات الميكوريزية تحت ظل ظروف الإجهاد المائي. من خلال هذه الدراسة، تم إجراء تحاليل لهذه العينة من النباتات وبالتحديد المعمق شمل التحليل الطواهر المورفولوجية والفيزيولوجية والبيوكيماوية من حيث طول الأوراق والجذور والوزن الجاف ونسبة الكلوروفيل، كذلك قياس نسبة البرولين والسكريات الذائبة.

أثناء عمليات التجربة أظهرت النتائج المتحصل عليها أن التلقيح بالفطريات الميكوريزية (*Mycorhizes Arbusculaires*) يؤدي إلى زيادة كبيرة في نمو الأوراق والجذور، نسبة الكلوروفيل، وفي نفس الوقت وفي ظروف الإجهاد المائي فإنه يقلل من نسبة البرولين والسكريات الذائبة .

ومنه نستنتج أهمية التفاعل (*x* التلقيح بالميكوريزا *x* الإجهاد) خاصة فيما يتعلق بالعوامل البيوكيميائية، أي نسبة السكريات والبرولين، ما يوضح أن عملية التلقيح بالميكوريزا يعتبر الحل العلمي الأنسب أو البديل الأمثل لمحاولة حل مشاكل الجفاف التي تعيق زراعة نبات القمح.

الكلمات المفتاحية: الميكوريزا، *Champignon mycorrhizogène à arbuscule*، الإجهاد المائي، التحليل المورفولوجي والبيوكيميائي.

SOMMAIRE

Sommaire

	Pag
Introduction générale	01
Chapitre I : Synthèse bibliographique	
I. Blé dur et blé tendre	03
1. Généralités.....	03
2. Origine géographique et génétique.....	03
3. Classification botanique et description morphologique.....	05
4. Stades de développement.....	07
5. Exigences climatiques.....	09
6. Importance économique.....	09
II. Stress hydrique	10
1. Généralités.....	10
2. Mécanismes d'adaptation des plantes à la sécheresse.....	11
3. Les déterminants moléculaires de la tolérance des plantes à la déshydratation.....	12
3.1 Les molécules d'ajustement osmotique.....	13
3.2 Les déhydrines.....	15
3.3 Les aquaporines.....	16
4. Conséquences du stress hydrique sur les végétaux.....	17
III. Symbiose mycorhizienne	19
1. Généralités.....	19
2. Principaux types de mycorhizes.....	19
2.1 Les ectomycorhizes.....	19
2.2 Les ectendomycorhizes.....	21
2.3 Les mycorhizes à arbuscules.....	21
3. Symbiose mycorhizienne à arbuscules.....	22
3.1 Le partenaire végétal.....	22
3.2 Le partenaire champignon.....	23
4. Structure des mycorhizes arbusculaires.....	24
5. Cycle de développement du champignon et formation des mycorhizes.....	25
6. Rôle et importance des mycorhizes.....	27
Chapitre II : Matériels et Méthodes	
I. Matériels	28
1. Matériel végétal.....	28
2. Matériel bactérien.....	28
II. Méthodes	28
1. Isolement des spores du genre <i>Glomus</i>	28
2. Germination des graines de blé.....	28
3. Application du stress hydrique et inoculation des graines de blé par les spores.....	29
4. Paramètres mesurés.....	29
4.1 Paramètre morphologique.....	29
4.2 Paramètres physiologiques.....	29

4.3 Paramètres biochimiques	30
5. Coloration des racines	31
6. Analyses statistiques	31

Chapitre III : Résultats et Discussion

I. Paramètres morphologiques et physiologiques.....	32
1. Mesure de la longueur des feuilles.....	32
2. Mesure de la longueur des racines.....	34
3. Mesure du poids sec des racines.....	36
4. Mesure de la teneur en chlorophylle (SPAD)	38

II. Paramètres biochimiques	39
1. Dosage de la proline.....	39
2. Dosage des sucres solubles.....	41

III. Coloration des racines	43
------------------------------------------	-----------

<i>Conclusion et perspectives</i>	45
------------------------------------------------	-----------

<i>Références bibliographiques</i>	47
-------------------------------------------------	-----------

<i>Annexes.....</i>	54
----------------------------	-----------

INTRODUCTION

GENERALE

Les céréales possèdent un rôle vivrier extrêmement important, elles constituent de loin une ressource alimentaire majeure à la fois pour la consommation humaine et pour l'alimentation du bétail. Le secteur céréalier est d'une importance cruciale pour les disponibilités alimentaires mondiales (Choueiri, 2003). Cependant la production assurée par ce dernier est confrontée à plusieurs contraintes biotiques et abiotiques dont la sécheresse.

Chez les grandes plantes cultivées, en particulier les céréales majeures qui sont le blé, le riz et le maïs, la comparaison des rendements en conditions optimales avec ceux observés en moyenne au champ fait apparaître des écarts considérables. L'explication de ces écarts est principalement d'ordres : climatiques, agronomiques et aussi génétiques (Ricroch *et al.*, 2011).

En Algérie, le climat est caractérisé par l'irrégularité de la pluviosité dans le temps et dans l'espace ainsi que par une tendance vers plus d'aridité et donc un impact accru des sécheresses. Ces dernières sont considérées comme les facteurs d'une perte partielle ou totale de production, en particulier dans le cas des céréales (Hassani *et al.*, 2008). Ces variations annuelles des conditions climatiques sont souvent un frein à toute action d'amélioration.

Une plante utilise la majeure partie de l'eau qu'elle absorbe pour dissiper l'énergie solaire qu'elle n'utilise pas pour la photosynthèse. Ainsi les besoins en eau d'une culture sont directement liés au climat. Si, par manque d'eau, la température de la plante s'élève et devient supérieure à celle de l'air, l'énergie est alors dissipée par convection à la manière d'une plaque chauffante. La réponse de la plante au stress hydrique est complexe car elle dépend à la fois de la sévérité du stress, de la durée du stress, de la phase de développement et de l'état dans lequel se trouvait la plante quand le stress a eu lieu (Aidaoui, 1994). En effet, les effets du stress hydrique touchent toutes les fonctions de la plante ; une réduction de la quantité d'eau disponible influe sur le métabolisme et les processus physiologiques qui contrôlent la croissance et le développement de la plante. Les difficultés rencontrées incluent les caractères extrêmement dynamiques de l'état hydrique de la plante et les interactions complexes qui existent entre le stress hydrique et d'autres variables du milieu (Passioura, 1997).

Introduction générale

Quant à la rhizosphère, elle comprend une grande diversité de microorganismes. En effet, la rhizosphère est une zone fortement active où ont lieu de nombreux dialogues entre la plante et les bactéries. La plante peut tirer profit de ces interactions, en termes de croissance et/ou de santé (Richardson *et al.*, 2009), et en parallèle les microorganismes vont bénéficier des substrats présents dans les exsudats .

Parmi les relations bénéfiques existant entre les plantes et les microorganismes, de type d'interactions symbiotiques est la « symbiose mutualiste ». Elle est considérée comme une interaction forte entre les deux partenaires, et dans le cas des champignons mycorhiziens (voir chapitre I) associés aux plantes elle implique souvent une différenciation morphologique chez l'un ou les deux partenaires (Bouffaud, 2014). La technologie de l'inoculation des plantes par les champignons est parmi les applications qui aident à la production des champignons comestibles bénéfiques pour la plante même en conditions de stress hydrique.

L'objectif de ce présent travail, est de tester l'effet de l'inoculation des différentes variétés des blés dur et tendre par les champignons mycorhiziens arbusculaires sous stress hydrique. Les échantillons seront ainsi analysés au niveau physiologique, morphologique et biochimique.

Le présent mémoire est structuré en trois grandes parties :

- Une première partie représente une synthèse bibliographique sur les blés, le stress hydrique et ses conséquences, et sur la symbiose mycorhizienne à arbuscules.
- La deuxième partie est consacrée successivement à la description du matériel végétal, des conditions de culture, d'isolement, et des méthodes d'analyse utilisées.
- La troisième partie traite les différents résultats obtenus lors de cette expérimentation et leur discussion.

Chapitre I

Synthèse

bibliographique

I. Blé dur et blé tendre

1. Généralités

Les céréales constituent 45 % des apports énergétiques dans l'alimentation humaine et leur utilisation organisée est à l'origine des civilisations. Il existe trois groupes de céréales majeures qui correspondent à 75 % de la consommation céréalière mondiale. Un premier grand groupe de céréales est formé par le blé, l'orge, le seigle et l'avoine. Il émerge dans le triangle fertile, berceau des civilisations occidentales qui ont donc leur point de départ au moyen Orient et au Proche Orient. Un deuxième grand groupe est formé par le maïs et un troisième grand groupe est ordonné autour du riz (Clerget, 2011).

Avec une production annuelle mondiale d'environ 600 millions de tonnes, le blé est la céréale la plus cultivée dans le monde et la plus consommée par l'homme (Ricroch *et al.*, 2011). Une des particularités du blé réside dans la forte teneur en amidon (70%) et en gluten (15%) de ses grains.

De tous les types de blés, deux ont une importance économique majeure :

- Le blé dur (*Triticum durum*) est surtout cultivé dans les régions sèches et chaudes au sud de l'Europe et en Afrique du Nord. Riche en gluten, il est employé pour les semoules et pâtes alimentaires (Clerget, 2011).
- Le blé tendre ou froment (*T. aestivum*), le plus cultivé, est produit dans les zones plus tempérées comme le nord de l'Europe et du continent américain pour la confection de la farine panifiable (Sabbagh, 2006).

2. Origine géographique et génétique

Le Croissant fertile d'où sont originaires les céréales du premier groupe forme une zone à cheval sur l'Afrique et l'Asie. Il est centré sur les plaines alluviales du Nil à l'ouest, du Jourdain au centre, de l'Euphrate et du Tigre à l'est. Il est limité à l'ouest par le désert de Libye et la Méditerranée, au nord par les monts Taurus en Turquie, à l'est par les monts Zagros en Iran, au sud par la mer Rouge et le désert d'Arabie (Gaufichon, 2010).

En ce qui concerne l'origine génétique des blés, aujourd'hui les blés que nous connaissons sont issus d'un long et complexe processus de sélection par l'homme ayant pour point de départ l'*Aegilops* et des blés diploïdes (**Figure 1**), céréales

rustiques mais peu productives encore cultivées au Moyen-Orient. Si l'Aegilops est diploïde ($n=7$), les blés durs actuels sont tétraploïdes ($n=14$) (Ricroch *et al.*, 2011).

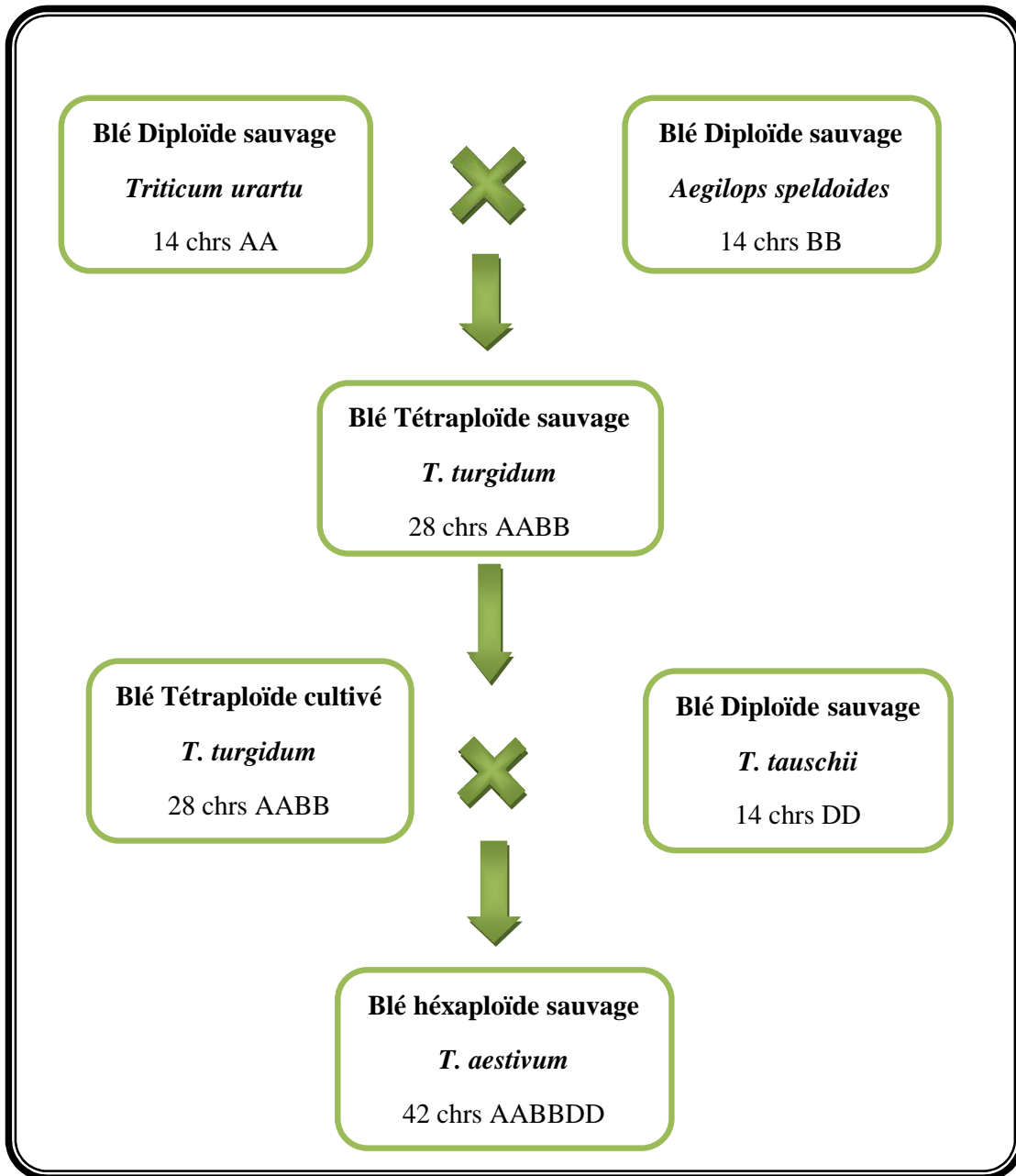


Figure 1 : Evolution du blé (Auriau *et al.*, 1992).

Le genre *Triticum* est divisé par Mackey (1966) en cinq espèces:

- *T. monococcum* (L.) MK $2n = 14$, génomes AA
- *T. turgidum* (L.) Thell $2n = 28$, génomes AABB

- *T. timopheevi* (Zuhk) MK $2n = 28$, génomes AAGG
- *T. aestivum* (L.) Thell $2n = 42$, génomes AABBDD
- *T. zhukovski* (Men et Er.) $2n = 42$, génomes AAAAGG

Le blé tendre, *T. aestivum*, est un allohexaploïde ($2n = 42$) avec trois génomes A, B et D provenant d'espèces diploïdes différentes. L'identification de ces espèces a été rendue possible par l'étude d'hybrides entre les différents blés puis entre ces blés et des espèces voisines appartenant au genre *Aegilops* (Mackey, 1966).

Kerby et Kuspira (1987) ont fait la synthèse des travaux réalisés :

- Le donneur du génome A est le blé diploïde *T. monococcum* ou *T. urartu* ;
- le génome B aurait été apporté par un *Aegilops* de la section Sitopsis ;
- le génome D a pour origine *A. squarrosa*.

3. Classification botanique et description morphologique

Le blé est une plante herbacée, monocotylédone appartenant au groupe des céréales à paille. Il est une monocotylédone classée de la manière suivante (voir **Tableau 1**).

Tableau 1 : Classification botanique des blés dur et tendre (Anonyme, 2011).

Règne	Taxonomie
Embranchement	Spermaphytes
S/Embranchement	Angiospermes
Classe	Monocotylédones
Ordre	Poales
Famille	Poaceae
Genre	Triticum
Espèce	<i>Triticum durum</i> Desf (blé dur) <i>T. aestivum</i> Desf (blé tendre)

Il s'agit d'une graminée de hauteur moyenne dont la structure morphologique générale est la suivante :

- **La tige** est généralement cylindrique, dressée creuse est cloisonnée par des nœuds pleins et renflés : ce genre de tige a reçu le nom de chaume (Auriau *et al.*, 1992). Vers la base, chaque nœud au contact du sol porte un faisceau de racines adventives

et souvent une tige verticale non ramifiée. C'est ainsi qu'un seul grain peut donner naissance à plusieurs tiges. Le phénomène favorisé par les roulages de printemps a reçu le nom de tallage. Les feuilles qui prennent naissance au niveau des noeuds sont disposées en deux rangées opposées autour de la tige. C'est une plante annuelle, semée à l'automne (blé d'hiver) ou au printemps (blé de printemps) (Clerget, 2011).

- **L'épi** est composé de petits épis ou épillets. Chaque épillet est enveloppé de deux bractées protectrices appelées glumes. Il est composé de trois, quatre, cinq fleurs avec une fleur terminale stérile (Bozzini, 1988). Chaque fleur est elle-même entourée de deux petites bractées protectrices ou glumelles.

- **La fleur** est verdâtre et dépourvue de corolle : il n'y a pas de pétales colorés. Le calice est formé de deux minuscules écailles ou glumellules jouant le rôle de sépales (Bozzini, 1988).

- **Le grain** de blé est un fruit sec et indéhiscent, appelé caryopse, constitué d'une graine et de téguments et formé principalement de trois régions (**Figure 2**) (Feillet, 2000 ; Clerget, 2011) :

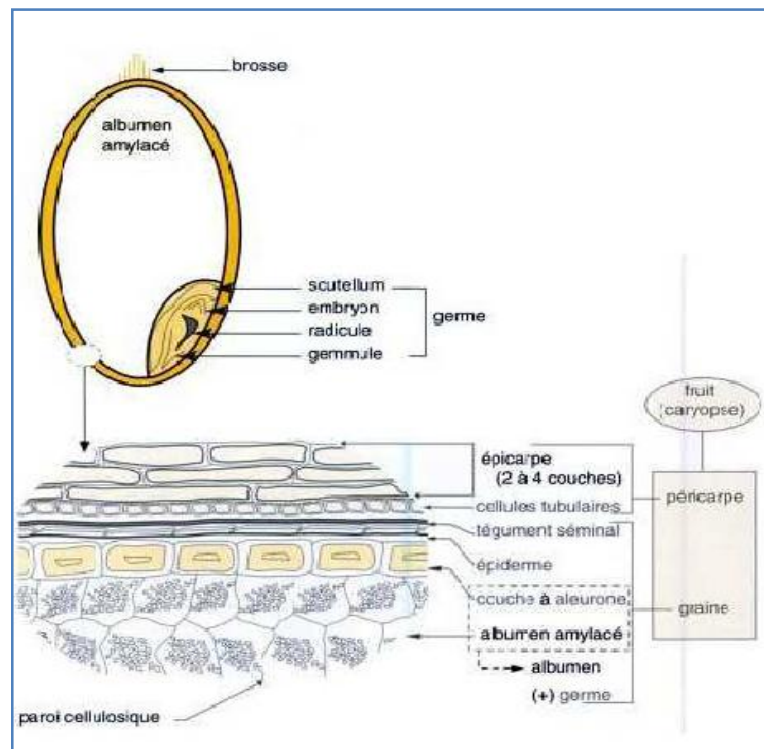


Figure 2 : Coupe d'un grain de blé (Feillet, 2000).

- L'albumen qui représente 80-85 % du grain, constitué de l'albumen amylicé (au sein duquel subsistent des cellules remplis de granules d'amidon dispersés au milieu d'une matrice protéique et dont les parois cellulodiques sont peu visibles) et de la couche à aleurone.
- Les enveloppes de la graine et du fruit sont formées principalement de six tissus différents épiderme du nucelle, tégument séminal ou testa (enveloppe de la graine), cellules tubulaires, cellules croisées, mésocarpe et épicarpe.
- Le germe représente 3% du grain, composé d'un embryon, qui est formé d'un coléoptile, de la gemmule, de la radicule, du coléorhize et de la coiffe.

Le grain est principalement constitué d'amidon (70%), de protéines (10-15%) selon les variétés et les conditions de culture, et de pentosanes (8 à 10 %). Les autres constituants, pondéralement mineurs (quelques % seulement) sont les lipides, la cellulose, les sucres libres, les minéraux et les vitamines (**Tableau 2**). Ces constituants se répartissent de manière inégale au sein des différentes fractions histologiques du grain.

Tableau 2: Composition chimique de grain de blé (Felliet, 2000).

Nature de composants	Teneur (% ms)
Protéines	10-15
Amidon	67-71
Pentosanes	8-10
Cellulose	2-4
Sucres libres	2-3
Lipides	2-3
Matières minérales	1.5-2.5

4. Stades de développement

Le cycle évolutif du blé (voir **Figure 3**) s'élabore en trois phases : végétative, reproductrice et maturation. Ces phases sont marquées par des stades repères dont l'identification se fait essentiellement par repérage sur le maître brin (Labreche, 2011).

a. Stade germination : la germination du blé a lieu à des températures de 4-37°C. Le coléoptile qui a pour rôle de protéger la première feuille apparaît 4-6 jours après la germination (Rorat, 2006).

b. Stade levé : la levée se fait réellement dès la sortie des feuilles à la surface du sol. Elle est atteinte lorsque la majorité des lignes de semis sont visibles (Gate, 1995).

c. Stade tallage : la production des tallages commence à l'issue du développement de la troisième feuille. L'apparition de ces tallages se fait à un rythme régulier égal à celui de l'émission des feuilles. Cette étape marque la fin de la période végétative et le début de la phase reproductive (Gate, 1995).

d. Stade épiaison et floraison : durant l'épiaison, les épis apparaissent à l'extérieur des tiges. Ce stade est terminé lorsque l'épi du maître brin est complètement sorti hors de la gaine, suivie d'une floraison qui peut durer de trois à six jours, selon les conditions météorologiques. Elle débute habituellement juste au-dessus du centre de l'épi, puis se poursuit en s'étendant vers l'apex et la base de l'épi (Rorat, 2006).

e. Stade de développement et maturité des grains : au bout de 16 à 17 jours, le grain a acquis sa forme et sa taille définitive, puis leur croissance évolue, ils passent du stade laiteux au stade pâteux puis au stade grain dur (Felliet, 2000).

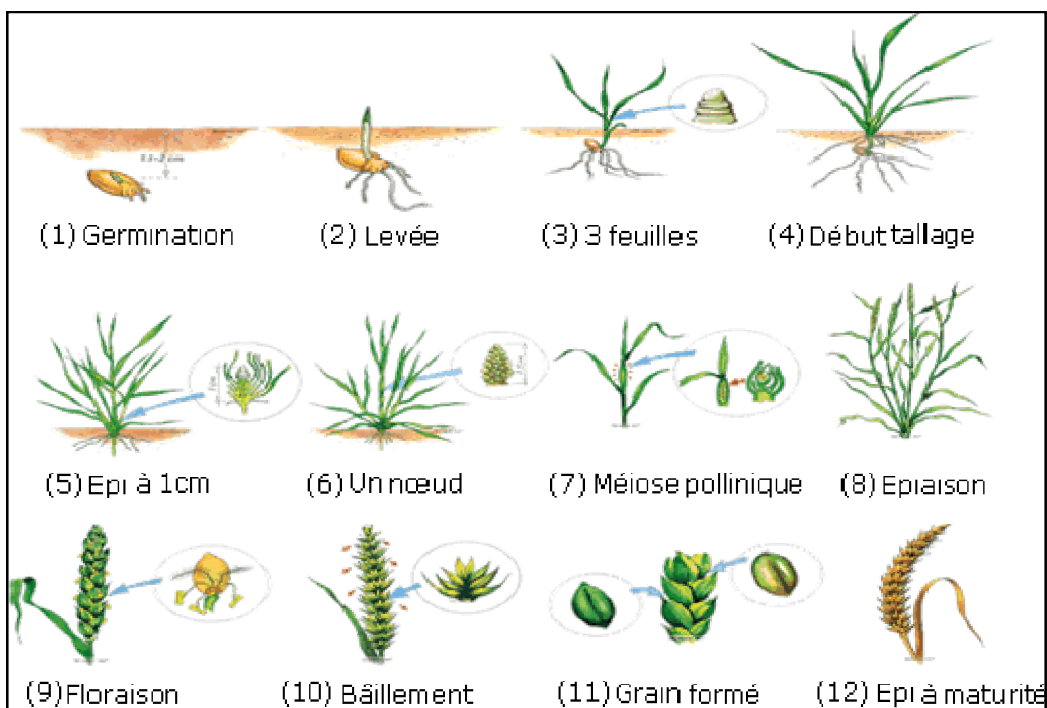


Figure 3 : Stades de développement de blé (CNUCED *et al.*, 2011).

5. Exigences climatiques

Pour être rentable, la production des céréales nécessite une connaissance accrue du développement de la culture. Selon Djermoun, (2009) les facteurs climatiques ont une action prépondérante sur les différentes périodes de la vie du blé. Parmi ces facteurs on citera principalement :

a. La température : la fourchette optimale de la température de la germination du blé se situant entre 12-25°C (PROTA, 2006). Il est généralement admis que la température agit de manière positive sur la croissance optimale.

b. L'eau : l'eau est un facteur limitant de la croissance du blé. Ce dernier exige l'humidité permanente durant tout le cycle de développement. Pendant les différentes phases de son cycle, le blé a besoin de 600 à 1.500 mm d'eau par an et surtout bien répartie. Les besoins sont plus élevés au vu des conditions climatiques défavorables (Bennai et Benabbas, 2007).

c. La lumière : la lumière est le facteur qui agit directement sur le bon fonctionnement de la photosynthèse et le comportement du blé. Un bon tallage est garanti si le blé est placé dans les conditions optimales d'éclairement (Felliet, 2000).

6. Importance économique

Historiquement, le blé est l'une des premières céréales cultivées et consommées dans le monde avec une production annuelle d'environ 600 millions de tonnes (Ricroch *et al.*, 2011). Les échanges qui se multiplient entre les régions du monde font de cette céréale l'un des principaux acteurs de l'économie mondiale (Laberche, 2004).

La production du blé est surtout localisée dans le bassin méditerranéen d'une part (Europe du Sud, Moyen orient, Afrique du Nord), et en Amérique du Nord d'autre part (Canada central et Nord des USA), où est produit le quart du blé dur mondial (Clerget, 2011).

En Algérie, les produits céréaliers occupent une place stratégique dans le système alimentaire et dans l'économie nationale du fait qu'elle occupe plus de 90% des terres cultivées. La consommation des produits céréaliers se situe à un niveau d'environ 205 kg/ hab/an (Chehat, 2007). Les céréales et leurs dérivés constituent l'épine dorsale du système alimentaire algérien, et elles fournissent plus de 60% de l'apport calorique et 75 à 80% de l'apport protéique de la ration alimentaire (Djermoun, 2009).

La production céréalière en Algérie est fortement dépendante des conditions climatiques. Cela se traduit d'une année à l'autre par des variations importantes de la superficie agricole utile, de la production et du rendement. Ainsi, le manque de précipitations, mais aussi la mauvaise répartition des pluies pendant l'année expliquent en grande partie la forte variation de la production céréalière (Djermoun, 2009).

II. Stress hydrique

1. Généralités

Les stress abiotiques (températures extrêmes, salinité, sécheresse) ont un impact négatif sur la croissance et le développement végétal et constituent un défi agronomique majeur.

Parmi les facteurs climatiques, l'eau est celui qui conditionne le plus la croissance des plantes. La cause en est une propriété physiologique fondamentale commune à toutes les plantes : la fixation photosynthétique de dioxyde de carbone atmosphérique ne peut se faire sans une perte d'eau considérable (au minimum 300 -500g d'eau par gramme de carbone fixé) (Ricroch *et al.*, 2011). La disponibilité en eau pendant la culture impose donc une limite supérieure à la quantité de matière sèche produite grâce à la photosynthèse. De ce fait, les végétaux doivent constamment faire face aux contraintes imposées par l'environnement en développant des stratégies aboutissant à l'acquisition des mécanismes adaptatifs qui conditionnent leur survie et le succès reproducteur (Reece *et al.*, 2012).

Le présent chapitre se concentre sur l'adaptation à la sécheresse des principales plantes d'intérêt agronomique dont le blé, en essayant de mettre en relief les stratégies adoptées par ces plantes pour assurer leur bon fonctionnement lorsque la disponibilité en eau devient limitée.

La demande hydrique d'une plante peut se définir comme la quantité d'eau optimale nécessaire pour sa croissance. La réserve utile pour la plante est la quantité d'eau présente dans le sol accessible via son système racinaire (Hamon, 2007). Sa demande en eau est déterminée par le niveau de transpiration ou d'évapotranspiration qui inclut les pertes en eau au niveau des feuilles mais aussi au niveau de la racine (Hamidou *et al.*, 2005). La plupart des plantes peuvent extraire de 50 à 80% de la réserve utile du sol avant que la transpiration de la plante ne soit affectée (Ricroch *et*

al, 2011). D'autre part, Le stress hydrique a été défini comme une baisse de la disponibilité de l'eau, traduisant par une réduction de la croissance de la plante et/ou de sa reproduction par rapport au potentiel du génotype (Hamon, 2007).

Le manque d'eau ou déficit hydrique représente le stress abiotique le plus sévère auquel la culture du blé dur fait face dans les conditions de productions des zones arides et semi- arides (Chennafi *et al*, 2006).

Les effets physiques, chimiques et physiologiques du stress hydrique dépendent du degré et du temps des conditions de sécheresse en relation avec le stade de développement de la plante (Hamon, 2007). D'autre par La réponse de la plante à la sécheresse dépend de l'espèce, le génotype, la durée et la sévérité de la perte d'eau (Yokota *et al.*, 2006).

2. Mécanismes d'adaptation des plantes à la sécheresse

Le végétal perçoit constamment son environnement physico-chimique. Ne pouvant se déplacer comme un animal à la recherche des conditions les plus favorables, il rythme et ajuste son développement en fonction de ce qu'il perçoit (Meyer *et al.*, 2008).

Les espèces qui doivent régulièrement affronter des épisodes de sécheresse pendant les phases actives de leur cycle de végétation mettent en œuvre divers mécanismes qui varient en fonction de l'espèce et des conditions du milieu (Lepoivre, 2003). Une plante est considérée bien adaptée à la sécheresse si elle maintient un rendement profitable malgré la sévérité du déficit hydrique (Gausson et rignon, 1995).

Les adaptations des plantes au manque d'eau peuvent être classées principalement en trois grands types de stratégies. L'esquive, l'évitement et la tolérance (Jean-pierre *et al.*, 2006).

2.1 La stratégie d'esquive

Cette stratégie consiste à éviter de subir le déficit hydrique en effectuant le cycle de développement pendant des périodes pluvieuses et/ou à demande climatique faible. On réduit alors le risque de perte de rendement, en échange d'une réduction du rendement maximum atteignable (Jean-pierre *et al.*, 2006).

Le décalage du cycle cultural depuis des périodes à forte demande climatique vers des périodes à plus faible risque est la stratégie des cultures d'hiver, qui réalisent leur cycle sur une période à faible risque de déficit hydrique et compensent une croissance

à une saison où le rayonnement incident est réduit par une durée plus longue du cycle (Folkert *et al.*, 2001).

Le raccourcissement du cycle cultural réduit la consommation totale d'eau et permet que les derniers stades du cycle végétatif se produisent avec une humidité du sol encore élevée. Son inconvénient est de réduire aussi le rayonnement intercepté et donc le rendement maximum atteignable (Anonyme, 2000).

2.2 La stratégie d'évitement

Cette stratégie consiste à empêcher que la plante soumise à des conditions hydriques défavorables ne subisse un stress hydrique trop important. Ces adaptations réduisent le risque de perte de rendement, mais ont le plus souvent un coût en terme de rendement maximum (Jean-pierre *et al.*, 2006).

2.3 La stratégie de tolérance

Cette stratégie consiste à maintenir les fonctions de la plante, croissance, transpiration et la photosynthèse, malgré le déficit hydrique. La tolérance à la déshydratation implique des mécanismes intracellulaires qui visent à préserver l'intégrité structurale et fonctionnelle des tissus lorsque le potentiel hydrique diminue (Laurent et Sané, 2007). L'ajustement osmotique est un exemple d'une telle adaptation, il permet le maintien d'une turgescence positive pour des teneurs en eau relativement faible (Hopkinsw, 2003).

3. Les déterminants moléculaires de la tolérance des plantes à la déshydratation

Dans cette partie, on s'intéresse à mettre en évidence comment on peut distinguer des plantes tolérantes à la déshydratation aux plantes non tolérantes et ceci sur le plan moléculaire.

Un grand nombre de gènes qui répondent à la sécheresse au niveau transcriptionnel ont été décrits dans la littérature (Seki *et al.*, 2001), en plus des preuves qui indiquent que les gènes répondant à la déshydratation peuvent être classés en deux catégories, en fonction de leur réponse en termes d'échelle de temps, certains répondent immédiatement en quelques secondes ou minutes, tandis que d'autres réagissent plus tard, en heures, jours, voir plusieurs semaines (Ramanjulu & Bartels, 2002).

Les réponses moléculaires des plantes à la déshydratation se traduisent par la traduction de protéines ainsi que par l'induction de gènes, dont les produits vont

permettre à la plante de faire face à la carence en eau, donc tout le métabolisme de la plante va être modifié.

3.1 Les molécules d'ajustement osmotique

Les molécules d'ajustement osmotique consistent en la synthèse des molécules solubles, ce qui se traduit par une plus grande capacité d'attraction et de rétention des molécules d'eau. Ces molécules, appelées « *osmoticum* », s'accumulent le plus souvent dans le cytoplasme (Nabors, 2008). Cette forte accumulation de solutés ioniques ou organiques dans les cellules provoque une diminution du potentiel osmotique. Les principales substances accumulées en réponse aux stress osmotiques peuvent être des acides aminés (proline, alanine), des sucres (saccharose, tréhalose, fructanes), des ions quaternaires (bétaines, proline- bétaine), des ions inorganiques (K⁺) ou encore des acides organiques (malate, glutamate, citrate) (Hopkinsw, 2003).

La nature des osmolytes impliqués dans l'ajustement osmotique est généralement spécifique de l'espèce étudiée. Les solutés organiques ne perturbent généralement pas ou peu le métabolisme des cellules et sont qualifiés à ce titre d'*osmoticum* compatibles (Radhouane, 2011).

Ces trois stratégies diffèrent quant à leurs conceptions, mais elles ont toutes un coût en terme de rendement final pour la plante (Tardieu *et al.*, 2006). Par conséquent, l'adaptation des plantes à la sécheresse doit refléter un équilibre entre l'échappement, l'évitement et la tolérance afin de maintenir une productivité adéquate (Jean -pierre *et al.*, 2006).

La sécheresse induit une synthèse de molécules protectrices et osmotiquement actives (Radhouane, 2011). Ces petites molécules sont, notamment, des composés ammonium quaternaire, comme la glycine bétaine, la proline- bétaine et la -alanine bétaine, des polyoles, comme le sorbitol, le mannitol et le pinnitol, et un acide aminé : la proline. Tous ces composés sont dits compatibles, c'est-à-dire que leur accumulation n'inhibe pas l'activité des enzymes présentes dans la cellule (Hopkinsw, 2003).

a. La proline

En plus des sucres, certaines plantes accumulent aussi d'autres molécules à faible poids moléculaire tel que la proline (Cechin *et al.*, 2006). La proline est un acide aminé souvent cité comme l'*osmoticum* le plus largement distribué et accumulé sous des conditions environnementales variées, dont la sécheresse.

Cet acide aminé est synthétisé à partir de l'acide glutamique. Sa nature amphiphile lui permettrait des interactions particulières entre les structures hydrophobes des protéines et le milieu aqueux du cytoplasme. Une forte concentration cytoplasmique de proline reste compatible avec les activités métaboliques de la cellule du fait de sa solubilité et son absence de toxicité. Le métabolisme de la proline dépend des fluctuations du contenu relatif en eau des parties aériennes (Hayashi *et al.*, 2000).

Le rôle joué par la proline a été montré lors des expériences menées sur des cultures de cellules de tomate. Ces cellules soumises à un stress hydrique (osmotique) par une exposition à des concentrations hypertoniques de polyéthylène glycol (PEG) répondent d'abord par une perte de turgescence puis par une rapide accumulation de proline. Cependant au fur et à mesure de l'accumulation de proline, la turgescence réapparaissait (Cechin *et al.*, 2006).

Outre son rôle osmotique, la proline semble aussi avoir un rôle dans l'enroulement foliaire, constituant un mécanisme de limitation de la transpiration chez les céréales, qui serait lié à l'accumulation d'acide abscissique (ABA) au niveau des feuilles. Elle pourrait en outre jouer plusieurs rôles dans le métabolisme intracellulaire, dans la protection des membranes et des systèmes enzymatiques, et favoriserait la reprise après réhydratation (Lepoivre, 2003).

b. Les sucres solubles

Les sucres accumulés en réponse aux stress hydriques concernent de nombreuses molécules et leur implication dans la tolérance des plantes n'est plus à démontrer (Yancey *et al.*, 1982).

D'après Munns (1981), les sucres solubles participent à l'ajustement osmotique pour plus de 60 à 70% chez le blé soumis à un stress hydrique. Différents sucres solubles peuvent être présents dans des tissus bien hydratés, mais le saccharose est préférentiellement accumulé dans les tissus en déshydratation (Crowe *et al.*, 1992). Généralement on pense que l'accumulation des sucres solubles peut avoir comme origine l'hydrolyse des réserves en particulier l'amidon mais aussi une modification du métabolisme carboné (Lepoivre, 2003). Beaucoup d'auteurs ont mis en évidence le rôle protecteur des sucres sur les membranes, en particulier mitochondriales. Leur présence permettrait le maintien des réactions de phosphorylation et de production d'énergie. Outre ce rôle protecteur des membranes, les hydrates de carbone protègent les processus par lesquels les enzymes sont synthétisés ce qui impliquerait une meilleure tolérance de la plante à la dessiccation et une meilleure résistance à la

sécheresse. Concernant les sucres solubles, Folkert *et al.*, (2001) remarquent que les variations de teneur chez le blé dur sont beaucoup plus faibles que dans le cas de la proline. D'autres études ont montré *in vitro*, le rôle des sucres dans la protection des membranes (Crowe *et al.*, 1992), ce qui suggère que les sucres miment l'action de l'eau en période de déshydratation pour conserver les propriétés physico-chimiques des membranes. Enfin, les sucres peuvent avoir un impact sur la régulation de l'expression des gènes. En effet, certains gènes sont directement régulés par le taux de glucose dans la cellule (Barral *et al.*, 1995).

c. La chlorophylle

Sous un stress hydrique, une diminution de la teneur en chlorophylle est remarquée chez le blé dur (Bousba *et al.*, 2009). Pour limiter les pertes en eau par évaporation et aussi l'augmentation de la résistance à l'entrée du CO₂ atmosphérique nécessaire à la photosynthèse, l'économie de l'eau se traduit par une turgescence relative moins affectée par le stress conduisant à une dilution de la chlorophylle (Slayter, 1974). Le rapport chlorophylle (a/b) est un bon indicateur du seuil de tolérance au stress hydrique (Guettouche, 1990). Tahri *et al.*, (1997) montrent que l'augmentation de la teneur en proline foliaire sous l'effet du stress suivie par un abaissement dans les teneurs en pigments chlorophylliens totaux (Chlorophylles a et b). Les résultats de Tahri *et al.*, (1997) révèlent une certaine proportionnalité, mais inverse, entre les teneurs en proline accumulées et les teneurs en pigments chlorophylliens perdus. Ainsi la variété qui accumule plus de proline est aussi celle qui connaît la plus forte diminution de ses teneurs en pigments chlorophylliens et vice versa (Mouellef, 2010).

3.2 Les déhydrines

Sont des protéines LEA D11 du groupe II qui sont les plus étudiées au cours d'un déficit hydrique. Ces protéines sont qualifiées de LEA (Late Embryogenesis Abundant) en raison de leurs découvertes dans les graines des plantes matures (Rurek, 2010) mais aussi elles sont fortement exprimées dans les tissus des plantes en réponse à des facteurs de stress environnemental : stress hydrique (déshydratation), thermique et salin (Wong, 2009). Ces protéines sont découvertes initialement dans les graines de Cotton et du blé à la fin de l'embryogénèse et elles sont produites en abondance au cours du développement des graines, comprenant jusqu'à 4% des protéines cellulaires (Bhardwai, 2013).

Les LEA sont des protéines en majorité très hydrophiles qui semblent impliquées dans la protection des structures cellulaires (Rurek, 2010), ce qui les rendent des protéines potentiellement très importantes dans la vie des cellules. Ces protéines constituent une famille multigénique dont la majeure partie des protéines sont cytosoliques et hydrophiles (Garay-Arroyo *et al.*, 2000).

3.3 Les aquaporines

Les aquaporines sont des protéines qui sont incluses dans les membranes dont elles accroissent la perméabilité à l'eau. Elles font partie d'une famille appelée « major intrinsic proteins » (MIPs) que l'on trouve bien répartie dans tout le règne vivant (Kruse *et al.*, 2006). Ces MIPs sont aussi impliquées dans le passage d'autres composés à travers les membranes, comme le glycérol, le CO₂, l'urée, etc.

Smart *et al.*, (2001) ont montré que la répression de gènes d'aquaporines diminue la perméabilité de l'eau des membranes et peut conduire à la conservation cellulaire de l'eau pendant des périodes de contrainte hydrique.

Chez les végétaux, les aquaporines (**Figure 4**) ont pour rôle principal le maintien de la teneur des cellules en humidité. Cette fonction s'effectue par ouverture et fermeture des pores associés à ces protéines. Ainsi, elles contrôlent les débits d'eau à l'échelle cellulaire.

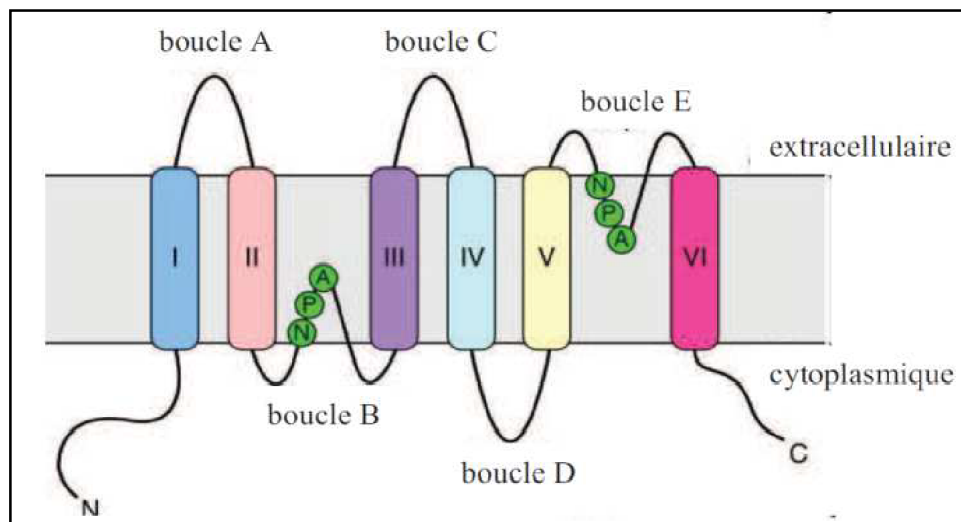


Figure 4 : Topologie d'une aquaporine dans une membrane (Kruse *et al.*, 2006).

La protéine est composée de six hélices transmembranaires (I-VI) reliées par cinq boucles (A-E) et inclut deux motifs de type hélice-hélice- NPA-hélice, en tandem (respectivement I-III et IV-VI). Les boucles B et E contiennent les motifs conservés NPA. Les extrémités N- et C-terminales (respectivement N et C sur le schéma) baignent dans le cytoplasme (Kruse *et al.*, 2006) .

4. Conséquences du stress hydrique sur les végétaux

Le déficit hydrique peut engendrer des pertes de rendement à n'importe quel stade de développement des végétaux (Maury *et al.*, 2011). Ces derniers seront affectés par une diminution de la vitesse de croissance, baisse de la teneur en eau des tissus, perturbation de la balance hormonale, modification du métabolisme glucidique, protéique et lipidique (Hamidou *et al.*, 2005). En situation de déficit hydrique, la plante ferme ses stomates pour réduire ses pertes en eau (Tardieu et Dreyer, 1997). Cette fermeture va entraîner des modifications physiologiques, morphologiques et phénologiques (**Figure 5**). L'entrée du CO₂ est également verrouillée lors de cette fermeture, entraînant une perturbation de l'activité photosynthétique (INRA, 2002) . Etant donné que la turgescence est nécessaire à l'allongement cellulaire, la croissance cesse dans toute la plante. Cela explique la baisse de rendement des cultures en période de sécheresse (Reece *et al.*, 2012).

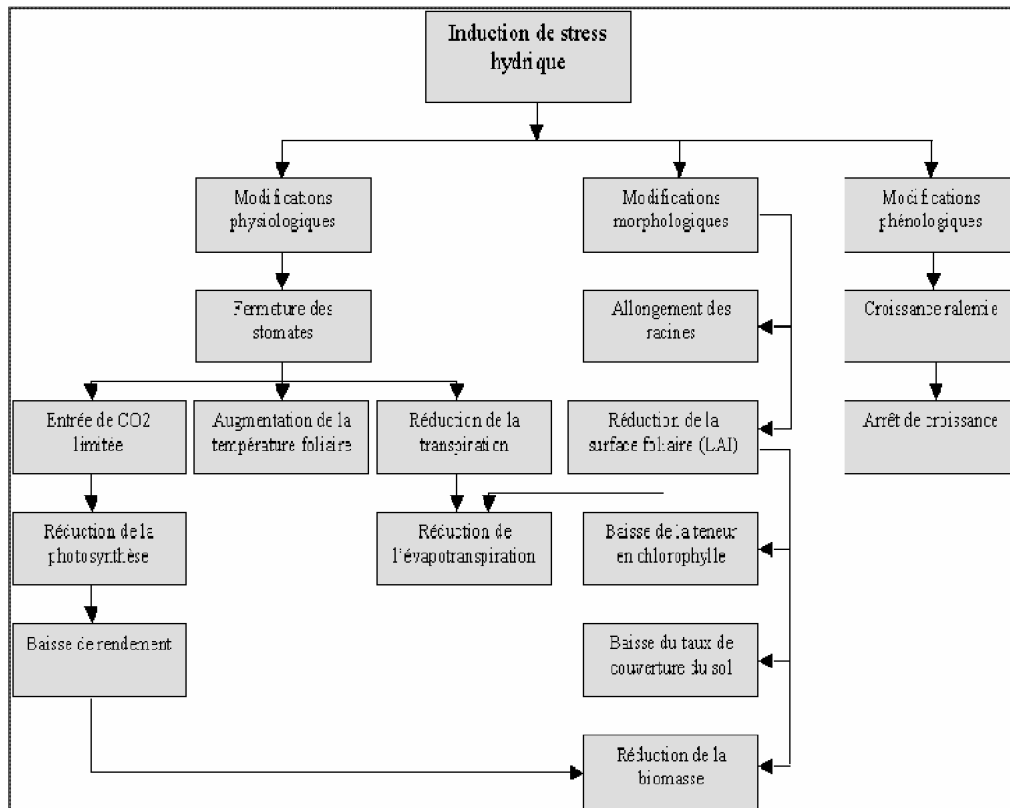


Figure 5 : Influence du stress hydrique sur les variables d'état de la plante (Kotchi, 2004).

Chez le blé dur, le déficit hydrique frein sérieusement sa croissance qui est en relation directe avec sa production. Surtout que son rendement en grains dépend fortement du nombre de grains par épi, du poids de grains par épi et du nombre d'épis par m². (Assem & *al.*, 2006). Le tallage est l'un des principaux facteurs déterminant le rendement en grains chez les céréales (Hucl et Baker, 1989) et une carence hydrique précoce durant la phase végétative réduit le nombre et la taille des talles chez le blé (Triboi, 1990). Au cours du remplissage des grains, le manque d'eau a pour conséquence une réduction de la taille des grains, réduisant par conséquent le rendement (Debaeke *et al.*, 1996).

III. La symbiose mycorhizienne

1. Généralités

Les microorganismes du sol sont extrêmement diversifiés et comprennent des groupes très différents dont les plus importants sont les bactéries, les champignons et les protozoaires. Parmi les microorganismes telluriques figurent certains champignons qui induisent, au niveau des racines de plantes, des organes nouveaux appelés « mycorhizes », résultat des associations symbiotiques plante-champignon étant les plus répandues dans les écosystèmes terrestres (Smith et Read, 2008).

Cette association mutualiste est caractérisée par un échange bidirectionnel généralement bénéfique tant pour la plante photosynthétique que pour le champignon (Jakobsen, 1995). D'une part, la mycorhize satisfait les besoins du partenaire fongique en composés carbonés synthétisés par la plante hôte photosynthétique et d'autre part, elle permet à la plante hôte de bénéficier d'une meilleure nutrition minérale grâce au réseau d'hyphes extra-radiculaires constituant la phase extramatrix qui s'étend bien au-delà de la zone du sol explorée par les racines, (Smith et Read, 1997).

2. Principaux types de mycorhizes

Il existe plusieurs formes d'association mycorhiziennes distinctes selon les structures formées par les espèces fongiques impliquées. On distingue sur cette base : les ectomycorhizes, les mycorhizes arbusculaires ou endomycorhizes, les mycorhizes orchidoides, les mycorhizes éricoides, les mycorhizes monotropoïdes, les ectendomycorhizes et les mycorhizes arbutoides.

2.1 Les ectomycorhizes

Ce type de mycorhizes concerne 13 à 15% des plantes vasculaires et se rencontre chez une grande majorité des Gymnospermes, et un grand nombre d'Angiospermes, Dicotylédones principalement chez les espèces ligneuses forestières. Les partenaires fongiques sont des champignons supérieurs généralement macroscopiques, *Ascomycètes* et surtout *Basidiomycètes* (Benmazari, 2011).

D'après Mosse, 1973 et Smith and Read, 2008 ; les ectomycorhizes sont formées par trois composants essentiels:

a. La graine ou manteau fongique qui entoure les racelles en modifiant leur morphologie, ainsi les poils absorbants sont inexistantes (**Figure 6 : A, B**).

b. Les hyphes entre les espaces des cellules subéreuses et des cellules périphériques du parenchyme cortical, constituant le réseau de Hartig (**Figure 6 : A**).

c. Un réseau d'hyphes extraradiculaires se développe à partir du manteau fongique dans la rhizosphère de façon très importante appelé réseau extramatriciel (**Figure 6 : C, D**).

Dans le réseau mycélien l'espèce fongique impliquée forme parfois des cordons mycéliens constitués d'hyphes accolés les uns aux autres constituant des rhizomorphes associés ou non à des sclérotés, structure résultant de l'organisation d'hyphes mycéliens en pseudotissu (**Figure 6 : E**) (Peterson et *al.*, 2004). Ce réseau extramatriciel constitue une partie importante du système mycorhizien car il permet une exploration très étendue du sol et par la même occasion augmente la surface d'échange du système racinaire (Benmazari, 2011).

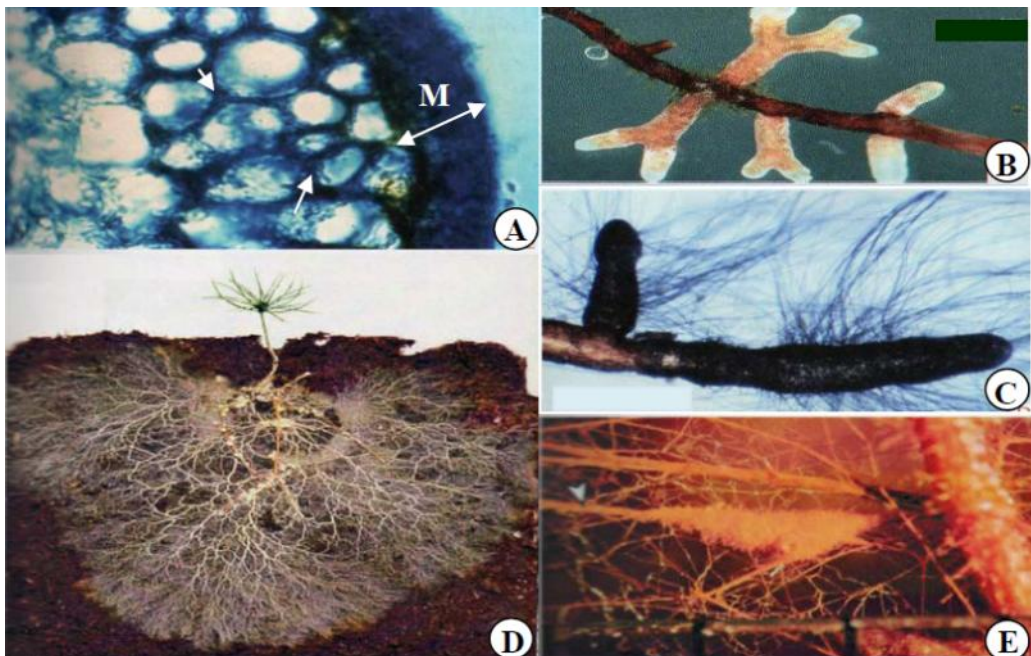


Figure 6 : Différentes formes des ectomycorhizes (Benmazari, 2011).

A. Coupe transversale d'une ectomycorhize du sapin baumier coloré au bleu de trypan : le manteau à l'extérieur (**M**) et le réseau de Hartig (Flèches) ;

B. Ectomycorhize dichotomique du pin ; **C.** Ectomycorhize simple noire formée par le *Cenococcum geophilum* ; **D.** Réseau extramatricielle (Read, 1984) ; **E.** Formation d'un sclérote (tête de flèche) dans le rhizomorphe.

2.2 Les ectendomycorhizes

Une ectendomycorhize présente à la fois les caractères structurales des ectomycorhizes et des endomycorhizes. Cependant elles présentent une morphologie semblable à une ectomycorhize simple (**Figure 7 : A**) ou dichotomique. En effet, il y a présence du manteau fongique relativement mince, du réseau de Hartig, et une formation de pelotons d'hyphes intracellulaires (**Figure 7 : B**). Ce type de mycorhize a été principalement observé dans deux genres de la famille des Pinacées *Pinus* et *Larix*. Cependant Founoune (2001) les a également observés chez d'autres genres tel que *Casuarina*, *Eucaliptus*, *Populus*, *Quercus*, et *Acacia* (principalement d'origine Australienne). Les champignons qui forment ce type de mycorhizes sont pour certains classés dans les ordres des *Pezizales* (*Wilcoxina*, *Sphaerospora*) et des *Leotiales* (*phialophora*, *Chloredium*) de la classe des *Ascomycètes*. La phase extramatricielle est moins développée que celle des ectomycorhizes dans la mycorrhizosphère (Peterson *et al.*, 2004).

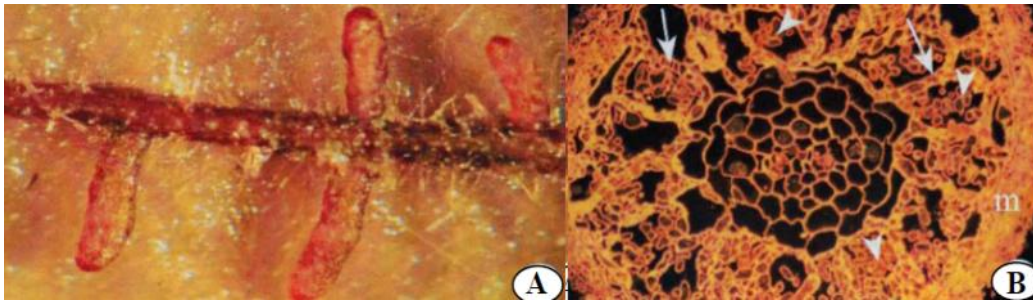


Figure 7 : Différentes formes des ectendomycorhizes (Benmazari, 2011).

- A.** Une ectendomycorhize formée par racine de *Larix sp* et le champignon *E-strain* ; **B.** Coupe transversale dans une ectendomycorhize de *Pinus sp*, observée au microscope fluorescent : le manteau (**m**), réseau de Hartig, pelotons d'hyphes intramatricielle (tête de flèches) .

2.3 Les mycorhizes arbusculaires

Les MA, sont appelées anciennement « endomycorhizes à vésicules et arbuscules ». C'est une association symbiotique très répandue dans le règne végétale. Elles sont présentes aussi bien dans le milieu naturel que chez les plantes cultivées, agricoles, horticoles ou forestières. On les rencontre même chez les plantes Cryptogames : *Bryophytes* et *Ptéridophytes* (Fortin *et al.*, 2008). Contrairement aux ectomycorhizes et ectendomycorhizes, les champignons impliqués ne provoquent pas

de changement morphologique évident au niveau du mycorhize. Cependant cette symbiose provoque un changement global sur tout le système racinaire (Benmazari, 2011).

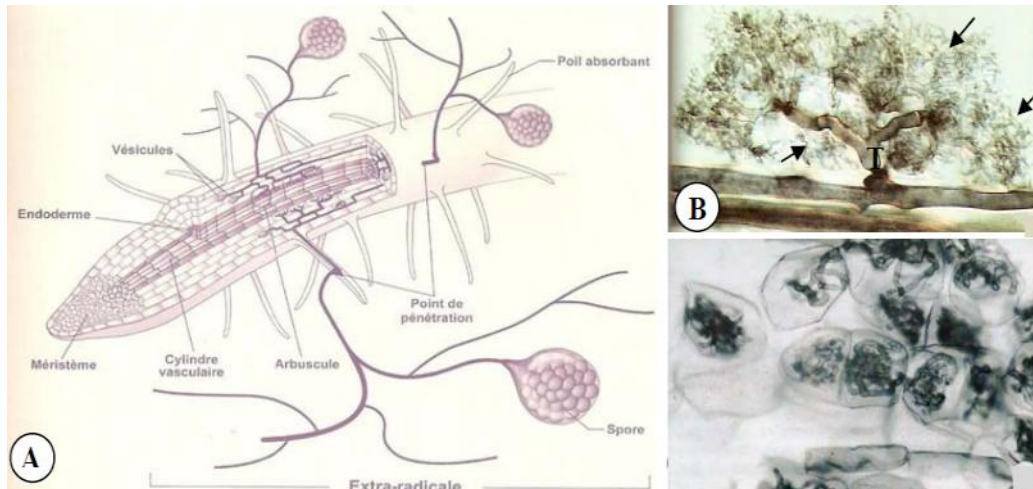


Figure 8 : Morphologie mycorhizes arbusculaires (Benmazari, 2011).

A. Représentation schématique d'une MA ; **B.** Structure détaillée d'un arbuscule formée dans une racine de poireau *Allium porum* ; **C.** Formation d'enroulement d'hyphes dans les cellules corticales de la racine de *Panax quiquefolius*.

3. Symbiose mycorhizienne à arbuscule

Pour de nombreux auteurs la capacité des premières plantes terrestre à entrer en symbiose avec certains microorganismes de la rhizosphère, et notamment avec les MA, a été prépondérante pour leur adaptation au monde terrestre. Toutefois, l'extraordinaire distribution de la symbiose (MA) observée aujourd'hui dans tous les écosystèmes terrestres et l'accumulation de données fossiles, plaident en faveur d'un rôle prépondérant joué par cette symbiose durant les premiers balbutiements de la colonisation du milieu terrestre par les plantes (Delaux, 2011). La symbiose MA nécessite l'association des deux partenaires végétal et fongique.

3.1 Le partenaire végétal

Un très grand nombre d'espèces (80 %) de plantes terrestres sont capables d'interagir avec les champignons MA, aussi bien chez les Bryophytes que chez les Lycopodes, les Monilophytes, les Gymnospermes et les Angiospermes. L'absence de capacité mycorhizienne se retrouve chez certaines espèces de plantes et semble liée à une perte de fonction et à l'apparition d'un nouveau caractère. Par exemple, chez les

Gymnospermes, sauf chez de rares exceptions, les *Pinaceae* ne sont pas endomycorhizables mais interagissent avec d'autres champignons symbiotiques, les champignons ectomycorhiziens (Wang et Qiu, 2006). Il existe également quelques exceptions parmi des familles par ailleurs mycotrophes, comme les légumineuses du genre *Lupinus* ou l'Hépatique *Marchantia polymorpha*. Mises à part ces exceptions, la symbiose MA reste un trait extrêmement répandue dans la lignée verte. Elle a très certainement joué un rôle crucial dans l'adaptation et l'évolution des plantes terrestres (Delaux, 2011).

3.2 Le partenaire champignon

Les champignons mycorhiziens à arbuscules (CMA) sont des organismes entièrement dépendants de leur plante hôte, qui leur fournit les éléments carbonés indispensables à leur développement (Smith et Read, 2008). On appelle donc ces organismes des biotrophes obligatoires. Les champignons MA appartiennent au phylum des *Glomeromycota*. Cette classification a été basée principalement sur l'analyse de la comparaison des séquences de la petite sous-unité d'ARN ribosomique. Plus de 200 espèces sont réparties en 4 ordres différents (*Archaeosporales*, *Paraglomerales*, *Diversisporales* et *Glomerales*) mais il est possible que d'autres espèces restent encore à découvrir (Schüßler *et al.*, 2001). Une classification simplifiée est présentée dans la **Figure 9**. Les MA rassemblés dans le phylum *Glomeromycota* forment un groupe monophylétique. Les 200 espèces décrites sont classées dans 4 ordres. D'après Schüßler *et al.*, 2001.

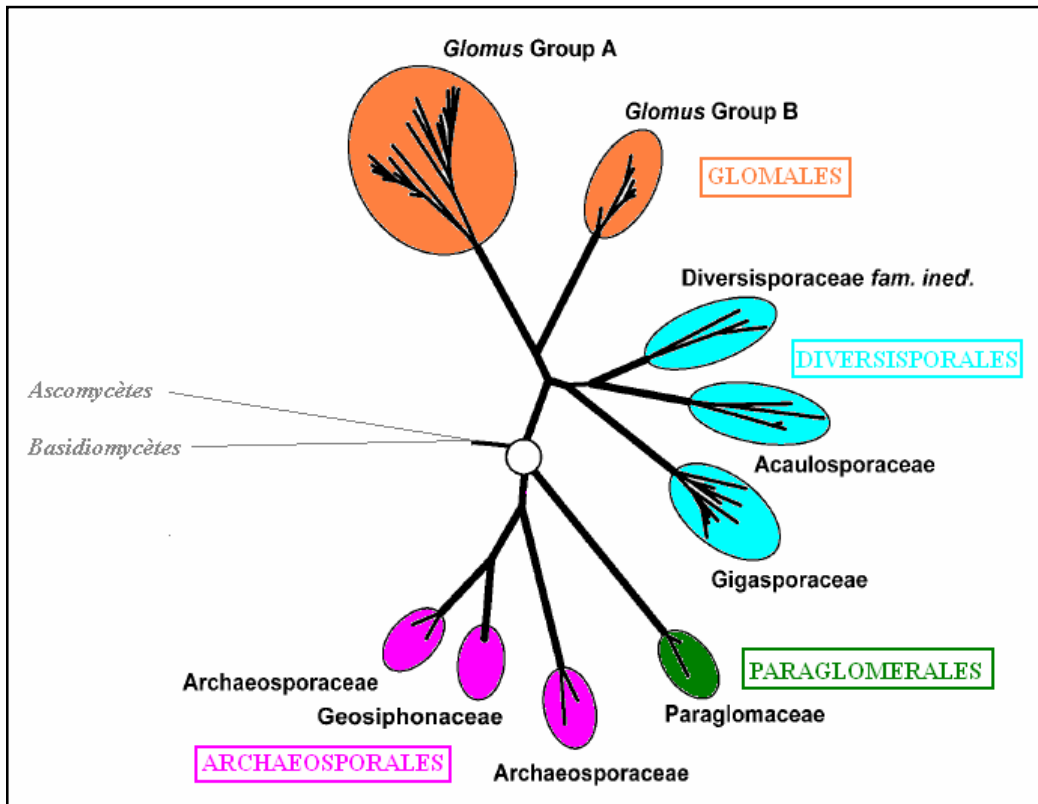


Figure 9 : Phylogénie des Gloméromycètes (Schüßler *et al.*, 2001).

4. Structure des mycorhizes arbusculaires

Une MA est formée par trois composants essentiels : des structures fongiques inter et intra cellulaires dont le cortex racinaire et le mycélium extra racinaire constituent la phase extramatricielle, qui se développe de façon très importante dans le sol (Smith et Read, 1997). Le terme « arbusculaire » reflète d'une structure microscopique formée d'un tronc et de nombreuses branches ramifiées dichotomiquement caractéristiques de ce type de mycorhize nommé « arbuscule ». Dans les premières assises cellulaires du cortex racinaire des espèces de CMA forment des enroulements d'hyphes qui occupent tout le volume cellulaire. D'autres CMA forment en plus des vésicules inter et intracellulaires. Ces dernières sont formées à l'extérieur des racines dans la mycorhizosphère par quelques autres espèces (comme les espèces de *Gigaspora*) et sont alors appelées vésicules auxiliaires. Toutes les structures intracellulaires formées par les CMA sont entourées par la membrane plasmique de la cellule hôte qui augmente de façon très importante sa surface en s'invaginant, constituant un la membrane périarbusculaire (Benmazari, 2011).

A partir de la mycorhize la phase extra matricielle s'étend en un important réseau mycélien, envahissant le sol, dans toutes les directions pouvant atteindre, des kilomètres de longueurs (Fortin *et al.*, 2008). C'est à ce niveau que se forme pour beaucoup d'espèces des spores.

5. Cycle de développement du champignon et formation des mycorhizes

On peut retrouver des champignons MA dans la plupart des écosystèmes terrestres. Les différentes étapes de la colonisation des racines par les champignons MA sont illustrées dans la **Figure 10**.

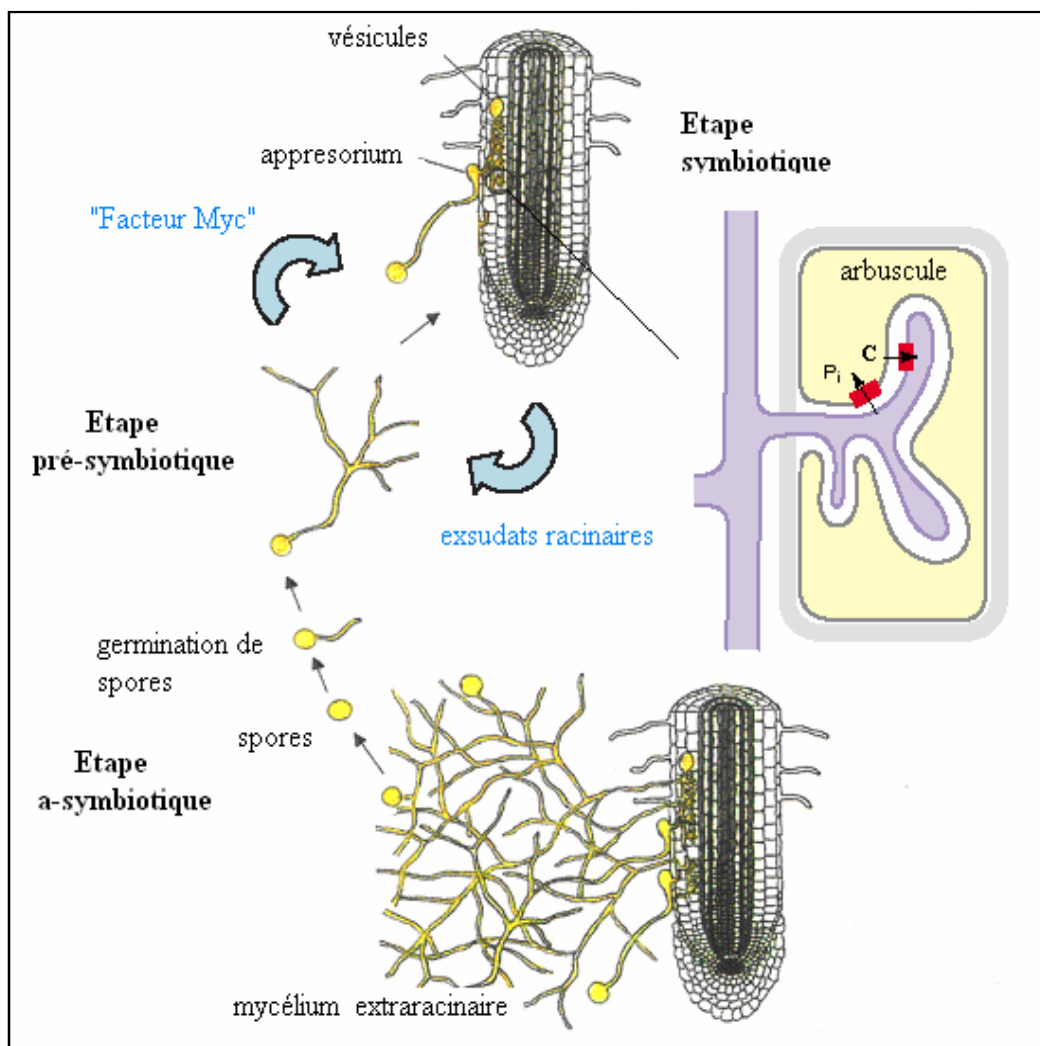


Figure 10 : Cycle de développement des champignons MA (Gomez-Roldan, 2008).

a. Germination de la spore

Dans la nature des interactions complexes entre plusieurs facteurs tels que le pH du sol, la température, l'humidité, les éléments nutritifs organiques et minéraux des racines, leurs exsudats et leur composition microbienne peuvent déclencher la germination de la spore. Les exsudats racinaires et les composés volatiles, tel que le CO₂ provenant de la respiration racinaire peuvent déclencher la germination des spores et le début de croissance du tube germinatif. Dans certains cas les exsudats racinaires déclenchent également une croissance et un développement rapide des hyphes mycélien qui ne peuvent se réaliser que lorsque la plante hôte n'est pas loin (Zeram dini, 2009). Si après sa croissance le tube germinatif ne rencontre pas une racine compatible, sa croissance s'arrête et le filament dégénère (Duhoux et Nicole, 2004).

b. Formation de l'appressorium

Le développement de la symbiose commence au moment où l'hyphe contacte la racine de la plante hôte. Le contact est suivie d'une adhésion puis de la formation d'un appressorium à partir duquel se développera la phase intra racinaire du champignon. Entre le premier rattachement de l'hyphe sur la racine et la pénétration intercellulaire, il s'écoule généralement trois jours (Bécard et Fortin, 1988).

c. Développement intraracinaire

Une fois que le champignon pénètre dans la racine, soit par les cellules rhizodermiques directement ou par les poils absorbants ou les cellules subèrifiées, l'hyphe colonise immédiatement les espaces intra et inter cellulaire du cortex externe. Le développement intracellulaire du champignon est caractérisé par une production d'arbuscules (Benmazari, 2011).

d. Développement de la phase extra matricielle

A partir de mycorhize les hyphes se développent très rapidement et intensivement dans le sol constituant la phase extra matricielle. Cette phase permet aussi une colonisation de nouvelles racines de la même plante hôte ou d'autres plantes voisines. La phase extramatricielle contribue aussi à la stabilité du sol en agglomérant les particules, probablement par l'intermédiaire de glycoprotéines telle que la glomaline sécrétée par les hyphes fongiques. Cette protéine contribue directement au pool de la matière organique du sol (Purin et Rillig, 2007).

6. Rôle et importance des mycorhizes

En outre, les plantes mycorhizées bénéficient d'une protection accrue contre plusieurs stress abiotiques et biotiques, incluant le stress hydrique et celui occasionné par les agents pathogènes qui s'attaquent aux systèmes racinaires. Chez certaines espèces végétales, on a même observé que l'endomycorhization exerce une influence sur le développement et la morphologie des tiges souterraines ou du système racinaire (Deziel, 2000).

L'association symbiotique, en induisant des changements dans la nutrition minérale et la physiologie de la plante, va affecter le patron d'exsudation racinaire des plantes. Ces modifications, associées au développement du réseau mycélien autour des racines, vont occasionner d'importants changements physico-chimiques du milieu environnant et vont donc contribuer à modifier quantitativement et qualitativement les populations microbiennes du sol (Azcon-Aguilar *et al.*, 1992). Cette zone d'influence des mycorhizes s'est vu attribuer le nom de « mycorhizosphère ».

Incontestablement, la symbiose mycorhizienne est un élément important pour la santé et la pérennité des écosystèmes, incluant les agroécosystèmes. Malheureusement, c'est un élément biologique bien souvent négligé comme indicateur de qualité des sols et rarement pris en considération dans l'élaboration des stratégies agricoles (Deziel, 2000).

Chapitre II

Matériels et

Méthodes

I. Matériel

1. Matériel végétal

Le matériel végétal utilisé est constitué de quatre variétés de blé dont deux variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf), et deux variétés du blé tendre (*Triticum aestivum* L) d'origine Algérienne et introduite. Les génotypes utilisés sont répertoriés selon le catalogue officiel de l'ITGC et de l'ICARDA et fournies par la station expérimentale de l'ITGC d'El-Khroub (**Tableau 03**).

Tableau 03 : Les génotypes étudiés des blés et leurs origines.

Génotype	Code	Origine
Waha	W	Syrie (ICARDA)
Bousselem	B	Algérie
Hidhab	H	Algérie (ITGC)
Ain-Abid	AA	Algérie (ITGC)

2. Spores utilisées

Dans ces expérimentations, nous avons utilisé des spores de champignons arbusculaires mycorhiziens appartenant à l'ordre des *Glomales*, et au genre *Glomus* isolés de la rhizosphère du blé des champs céréaliers. Ces spores ont été utilisées pour l'inoculation des jeunes plantules des blés durs et tendres. La souche de champignon a été fournie gracieusement par Wassila NADJI du laboratoire GBBV-Constantine.

II. Méthodes

1. Isolement des spores du genre *Glomus*

Les spores ont été isolées au préalable par Wassila Nadji (laboratoire de Génétique, biochimie et biotechnologie végétale) par la méthode de « tamisage humide » d'après le protocole de Gerdmann (1963), et de Daniels et Skipper (1982). Dans un litre d'eau environ, 100 g de sol ont été suspendu. Après agitation, le surnageant a été homogénéisé, puis il a été laissé brièvement décanté. Le tamisage a été réalisé sur trois tamis de 250, 150, et 50 μm , puis chaque fraction a été recueillie à l'aide d'un peu d'eau dans une boîte de Pétri. Le contenu a été observé au binoculaire sans coloration.

2. Germination des graines de blé

Les graines des variétés des blés dur et tendre ont été mises à germer dans des boîtes de Pétri puis transférés dans un sol stérilisé à raison de deux graines par pots, et placer sous serre.

3. Application du stress hydrique et inoculation des graines de blé par les spores

A fin de tester l'effet des mycorhizes arbusculaires sur les blés, ces derniers ont été soumis à un stress hydrique (stade six feuille). L'application du stress hydrique a été réalisée par un arrêt d'arrosage de 10 jours. Chacune des variétés a été inoculée par les spores *Glomus*, et pour chaque variété, nous avons réalisé trois répétitions pour chaque variété. Des plantes témoins ont également été utilisées lors de ces expériences.

Nous avons utilisé un dispositif expérimental de type factoriel à trois facteurs : 4 variétés des blés (2 variétés blé dur et 2 variétés blé tendre) x 2 traitements mycorhiziens (Inoculées et non inoculées) x 2 régimes d'arrosage (normal et stress hydrique). chacun des 16 traitements a été répété trois fois en randomisation totale. L'expérience a été arrêtée 10 jours après l'application du régime de stress.

4. Paramètres mesurés

Afin de déterminer l'effet de l'inoculation des blés (*T. durum* Desf) et (*T. aestivum* L) par les mycorhizes arbusculaires sous stress hydrique, des paramètres morphologiques, physiologiques et biochimiques ont été mesurés.

4.1 Paramètres morphologiques

a. Mesure de la longueur des feuilles

A partir du stade quatrième feuille, la longueur des feuilles a été mesurée.

b. Mesure de longueur des racines

Après un moi de culture des mesure de racines ont été prises à fin de voir l'effet de la mycorhization sur les racines.

c. Mesure du poids sec des racines

Le poids sec des racines a été mesuré. Les feuilles coupées ont été passées à l'étuve (48 h à 60° C), pour obtenir le poids de matière végétale sèche de ces échantillons (PS), dans le but de voir la quantité de stockage de la matière sèche.

4.2 Paramètres physiologiques**a. Mesure du taux de chlorophylle totale (TCT « unité de SPAD »)**

Le taux de chlorophylle au niveau des feuilles a été mesuré à l'aide d'une chlorophylle mètre (SPAD). Le chlorophylle mètre est utilisé pour évaluer la teneur en azote des feuilles puisque la majeure partie de l'azote est contenue dans la chlorophylle. Il suffit de fermer la pince vide sur elle-même pour étalonner l'instrument. Par la suite, trois prises de mesure sont effectuées au niveau de la feuille sur trois différents (sommet, milieu, et base). La moyenne des trois valeurs s'affiche sur l'écran à la fin (unité SPAD). Sachant que le temps de chaque mesure est de l'ordre de deux secondes.

4.3 Paramètres biochimiques**a. Dosage de la proline (Prol « µg/100mg MF »)**

La proline a été dosée selon la technique utilisée par Troll et Lindesly (1955), simplifiée et mise au point par Dreier et Goring (1974) et modifiée par Monneveux et Nemmar (1986). Le principe est la quantification de la réaction proline-ninhydrine par mesure spectrophotométrique.

La proline se couple avec la ninhydrine en formant un complexe coloré, et l'intensité de la coloration est proportionnelle à la quantité de la proline dans l'échantillon. Cette approche consiste à mettre 100 mg de MF (feuilles de *T. durum* et *T. aestivum* coupées en petits morceaux) dans des tubes à essai et y ajouter 2 ml de méthanol à 40%. Les tubes fermés et recouvert de papiers aluminium ont été mis au bain-mari pendant 1h à 85°C.

Après refroidissement, 1 ml de la solution a été prélevé de chaque tube et mis dans de nouveaux tubes auquel il faut ajouter 1 ml d'acide acétique, 25 mg de ninhydrine et 1 ml de mélange contenant : 120 ml d'eau distillée, 300 ml d'acide acétique et 80 ml d'acide orthophosphorique. On a porté à nouveau la solution à ébullition pendant 30 mn à 100°C, on remarque ainsi que la solution vire vers le rouge. Cinq ml de toluène ont été rajoutés à la solution refroidie.

Suite à l'agitation au vortex, deux phases se séparent : une phase supérieure à la couleur rouge et une phase inférieure transparente. Après avoir éliminé la phase inférieure on ajoute, à l'aide d'une spatule, du Sulfate de Sodium.

On a déterminé la densité optique (DO) à l'aide d'un spectrophotomètre sur une longueur d'onde de 528 nm. Les valeurs obtenues sont converties en taux de proline

par le biais d'une courbe étalon, préalablement établie à partir d'une série de solution de concentration en proline connue.

b. Dosage des sucres solubles

Le dosage des sucres solubles totaux (saccharose, glucose, fructose, leurs dérivés méthyles et les polysaccharides), dans les feuilles de *T. durum* et *T. aestivum* ont été effectués selon la méthode de Dubois *et al.* (1956). Ça consiste à prendre 100 mg de MF (feuilles), les couper en petits morceaux, les mettre dans des tubes à essais et y ajouter 3 ml d'éthanol à 80%. Après les 48 h passées à l'obscurité et à température ambiante, les tubes sont ensuite placés dans l'étuve à 80°C jusqu'à ce que l'alcool s'évapore.

Après l'évaporation de l'éthanol, on a ajouté 20 ml d'eau distillée dans chaque tube à essai. Deux ml de la solution à analyser sont ensuite additionnés à 1 ml de phénol à 5% et à 5 ml d'acide sulfurique concentré à 96%. Les tubes sont passés au vortex pour homogénéiser la solution puis laissés 10 mn à température ambiante et placés au bain marie pour 10 à 20 mn à une température de 30°C.

Les mesures d'absorbances ont été effectuées au spectrophotomètre à une longueur d'ondes de 485 nm. Enfin des résultats de la DO sont rapportés sur une courbe étalon des sucres solubles (exprimés en glucose).

5. Coloration des racines

La coloration a été réalisée dans le but de voir la structure des mycorhizes à arbuscules, et de marquer le champignon MA dans les racines des blés dur et tendre. Après lavage, les racines les plus jeunes ont été coupées à une longueur de 1-2 cm, et ont été mises avec la potasse (10%) au bain-marie environ 15 min à 30°C, puis dans un tamis la potasse a été jetée et filtrée, les racines ont été rincées et neutralisée avec de l'eau acidifiée et ont été remises dans le bleu de coton au bain-marie. En suite filtrage et rinçage à nouveau dans un tamis à l'eau distillée. Et observées sous microscope.

6. Analyses statistique

Toutes les expériences ont été répétées trois fois et cela pour chaque paramètre mesuré. Les données obtenues ont été analysées à l'aide du logiciel XLSTAT (2015).

Chapitre III
Résultats et
Discussion

I. Paramètres morphologiques

1. Mesure de la longueur des feuilles

En régime normale, les variétés témoins (plantes non-inoculées, non-stressées) de *Triticum durum* et *T.aestivum* présentent des variations de longueur des feuilles au 4^{ème} stade (voir **Figure 11**). Ainsi, les variétés suivantes : Boussellem (blé dur), Hidhab (blé tendre), Waha (blé dur), Ain-Abid (blé tendre), présentent respectivement les valeurs suivantes : $21 \pm 4,35$ cm, $20,3 \pm 2,56$ cm, $17,8 \pm 3,83$ et 17 ± 2 cm.

Chez les variétés des blés inoculées par les CMA en absence de stress, il a été noté, une augmentation remarquable de la croissance de longueur des feuilles comparativement aux plantes témoins, surtout chez la variété Ain-Abid ($30 \pm 2,64$ cm) ainsi que les variétés Boussellem, Hidhab et Waha avec respectivement les valeurs : $27 \pm 4,25$ cm ; $26 \pm 3,60$ cm et $24 \pm 9,64$ cm.

On peut déduire que les mycorhizes arbusculaires ont un effet positif sur la croissance des feuilles chez le blé. Les études de Simard (2014) démontrent qu'un bon nombre de plantes mycorhizées présentent une stimulation de la croissance des feuilles dont il a confirmé ça chez la carotte (*Daucus carotta*). En effet, la symbiose mycorhizienne permet une assimilation plus efficace de l'eau et des éléments nutritifs, particulièrement le phosphore en augmentant la croissance foliaire. Elle favorise ainsi une meilleure absorption de l'eau pour une meilleure hydratation.

En cas de régime de stress hydrique, on a remarqué que les variétés des blés présentent les plus faibles valeurs de longueur des feuilles. En effet, la variété Hidhab présente la plus grande longueur de la surface foliaire ($19 \pm 4,58$ cm), tandis que la plus faible valeur a été enregistrée chez la variété Ain-Abid ($14 \pm 3,60$ cm).

Sh et son équipe (1990) ont travaillé sur *Prunus persica*, et ont montré que la croissance des feuilles est sensible à la sécheresse puisque l'effet limitant du stress hydrique apparait précocement et avec intensité. Beeddiar et ces collaborateurs (2013) confirment aussi nos résultats et montrent que la réduction de la croissance aérienne observée au niveau des plantules peut aussi s'expliquer par des augmentations des taux certains régulateurs de croissance, notamment l'acide abscissique et les cytokinines induites par le stress.

En 2002, un groupe de chercheurs de l'université Mentouri Constantine (Amokrane et Bouzerzour) ont montrés que chez certaines variétés de blé, l'enroulement des feuilles, peut être considéré comme un indicateur de perte de

turgescence en même temps qu'un caractère d'évitement de la déshydratation, il entraîne une diminution de 40 à 60 % de la transpiration.

Par rapport aux plantes stressées non inoculées, les variétés des blés inoculées par les CMA sous stress hydrique présentent des valeurs plus élevées en longueur des feuilles spécialement chez les variétés Boussellem et Waha ($20,6 \pm 1,5$ cm et $18,4 \pm 3,27$ cm). Quant aux variétés Hidhab et Ain-Abid, elles présentent respectivement les valeurs suivantes : $15,5 \pm 1,80$ cm et $16,3 \pm 1,47$ cm.

Il est bien clair que l'inoculation par les CMA a pu améliorer la croissance des feuilles en cas de présence de stress hydrique. Ceci est en corrélation avec les résultats de Munro et son équipe (1999) qui montrent que l'inoculation mycorhizienne améliore la croissance des plants dans un sol de pépinière non stérilisé en manque d'hydratation.

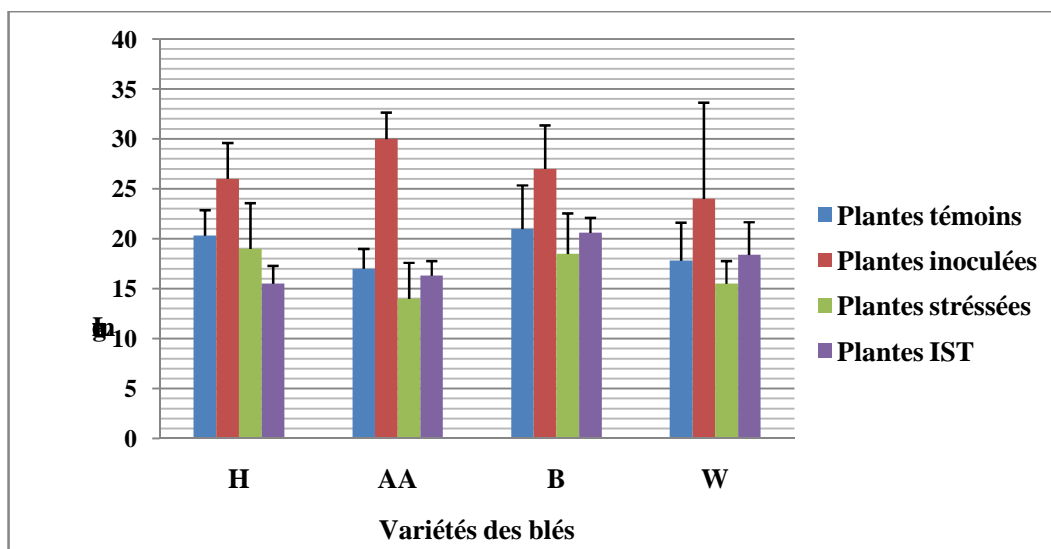


Figure 11 : Variation de la longueur des feuilles des blés sous différentes conditions. H : variété de blé tendre (Hidhab) ; AA : variété de blé tendre (Ain-Abid) ; B : variété de blé dur (Boussellem) ; W : variété de blé dur (Waha) ; IST : plante inoculée sous stress hydrique.

2. Mesure de la longueur des racines

Afin de voir la réaction des plantes inoculées par *Glomus* sous stress hydrique, la longueur des racines des différentes variétés de blé a été mesurée. Les résultats ont été illustrés dans la **Figure 12**.

Chez les plantes témoins, la longueur des racines varie entre les variétés de blé, ainsi, la plus grande valeur a été enregistrée chez Boussellem et Waha avec respectivement les valeurs suivantes : $37 \pm 6,55$ cm et $38,1 \pm 4,46$ cm. Les variétés Hidhab et Ain-Abid présentent les valeurs suivantes : $27 \pm 5,56$ cm et $26 \pm 4,58$ cm.

Les variétés inoculées par CMA en absence de stress hydrique, présentent des variations de longueur des racines plus élevées par rapport aux plantes témoins. La plus grande valeur a été enregistrée chez Waha ($41,3 \pm 1,92$ cm) et Boussellem ($39 \pm 6,08$ cm). On a aussi noté chez Hidhab et Ain abid les valeurs suivantes : $30 \pm 2,24$ cm et 28 ± 2 cm.

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

En outre Olivier avec son équipe (1983) ont montré que la liaison entre la stimulation de la croissance et le niveau d'infection par les CMA a été observée dans le cas de la Vigne (*Vigna unguiculata*). Quant à Oihabi (1991), il relève une différence dans la production de biomasse infectée par trois espèces de champignons MA *Gigaspora margarita*, *Glomus mosseae*, et *G. intraradices*. Ce dernier ayant le taux d'infection de système racinaire le plus élevé en stimulant ainsi la croissance des racines.

Par rapport aux témoins et aux plantes inoculées non-stressées, les plantes soumises à un stress hydrique, présentent les plus grandes valeurs de longueur de racine surtout chez les variétés de blé dur Waha et Boussellem dont on a noté les valeurs de $43 \pm 3,60$ cm et $42 \pm 3,60$ cm. Les variétés de blé tendre Ain-Abid et Hidhab présentent respectivement ces valeurs : $34 \pm 6,44$ cm et $33 \pm 4,35$ cm. La forte valeur en longueur des racines en cas de stress s'explique par le fait que ses racines ont subi des modifications morphologiques en longueur pour s'alimenter en eau.

En 2014, Triboulot et Hummel ont montré qu'une racine est capable de pousser dans un sol plus ou moins contraint grâce au support physique fournit par le sol. L'efficacité de l'extraction de l'eau du sol par les racines figure parmi les types d'adaptation permettant à la plante d'éviter ou, plus exactement, de retarder la

déshydratation de ses tissus d'après les études de Turner et ces collaborateurs en 2001. De plus, Laurent et Sané (2007) montrent que l'augmentation de l'absorption peut être due à l'extension de l'absorption en profondeur et en surface, à la vitesse de croissance et de ramification des racines.

Chez les variétés inoculées par les CMA du genre *Glomus* en régime de stress hydrique, on remarque que la longueur des racines varie entre les variétés de blé : faible par rapport aux plantes stressées et forte par rapport aux plantes témoins. Les plus grandes valeurs ont été enregistrées chez les variétés Boussellem et Waha avec respectivement les valeurs : $41,5 \pm 5,40$ cm et $40 \pm 3,60$ cm. On a aussi noté les valeurs de $33,5 \pm 5,40$ cm et $30 \pm 2,64$ cm respectivement chez Ain-Abid et Hidhab.

Simard (2014) montre que la diminution de la résistance au transport de l'eau au niveau des racines est perdue lorsqu'il y a ajout de nutriments au sol, démontrant ainsi un effet indirect de la mycorhization sur le bilan hydrique de la plante. Ce fait amènerait à la conclusion que dans les sols pauvres en nutriments, l'eau serait mieux absorbée par la plante, car le champignon permet à celle-ci de puiser une plus grande quantité de minéraux (en particulier le phosphore) engendrant ainsi un appel d'eau du sol plus important au niveau des racines en assurant leurs croissances.

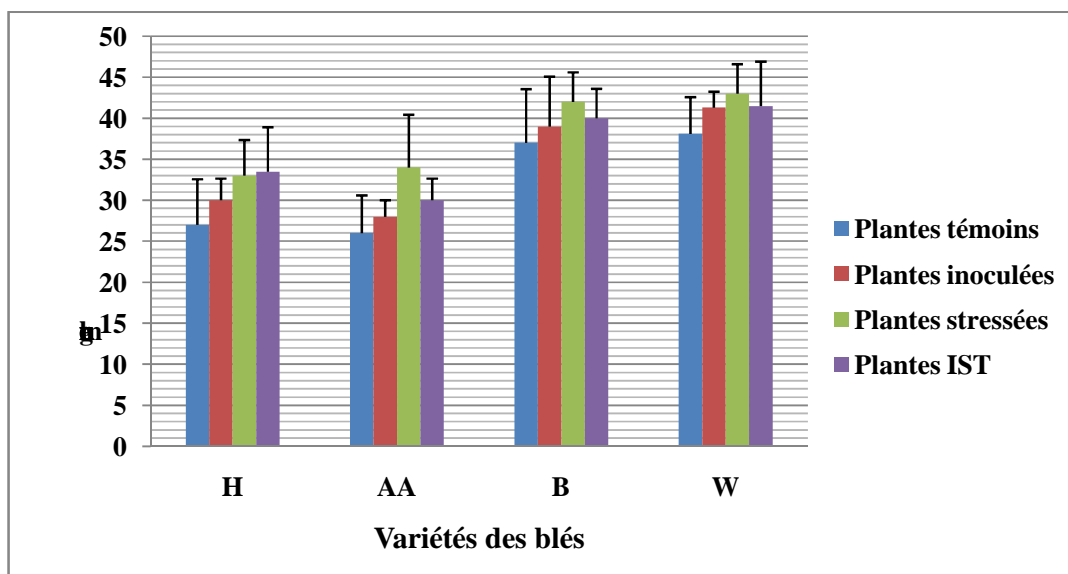


Figure 12 : Mesure de la longueur des racines des blés en différentes conditions.

H : variété de blé tendre (Hidhab) ; AA : variété de blé tendre (Ain-Abid) ; B : variété de blé dur (Boussellem) ; W : variété de blé dur (Waha) ; IST : plantes inoculées sous stress hydrique.

3. Mesure du poids sec des racines

La masse sèche totale des racines a été mesurée chez les quatre variétés de blé (voir **figure 13**). La plus forte valeur a été enregistrée chez les plantes stressées non-inoculées exactement chez la variété Hidhab avec une valeur de $1,8 \pm 0,77$ g. La même chose a été observée chez les plantes témoins, on a noté chez Hidhab la valeur de $1,22 \pm 0,04$ g. Aussi pour les plantes inoculées par les CMA en absence de stress hydrique, la plus grande valeur a été notée chez Hidhab avec $0,9 \pm 0,24$ g alors que la plus petite valeur a été enregistrée chez Waha avec $0,51 \pm 0,17$ g. En effet, les racines accumulent plus de réserves en cas de stress hydrique.

Les variétés inoculées par les CMA en régime de stress hydrique présentent des grandes valeurs comparées aux plantes témoins et aux plantes inoculées non-stressées. La plus grande valeur a été notée chez Hidheb et Ain-Abid avec respectivement les valeurs $0,93 \pm 0,19$ g et $0,8 \pm 0,1$ g.

Les travaux de Oihabi, (1991) sur le palmier dattier montre que l'inoculation des racines par *Glomus intraradices* ayant un taux plus élevé d'infection du système racinaire, ceci est en corrélation avec la plus forte production de matière sèche dans la partie aérienne et surtout la partie racinaire. Ce qui explique l'accumulation du poids sec racinaire chez les plantes inoculées non-stressées, ainsi que chez les plantes inoculées en présence de stress hydrique.

Chez l'arganier (*Argania spinosa*), Nouaim et Chaussod (1994) ont observé que la mycorhization pouvait augmenter de 3 à 4 fois la matière sèche formée, tout en diminuant de 40 à 50% le rapport partie racinaire / partie aérienne mettant ainsi en évidence la meilleure efficacité d'un système racinaire mycorhizé.

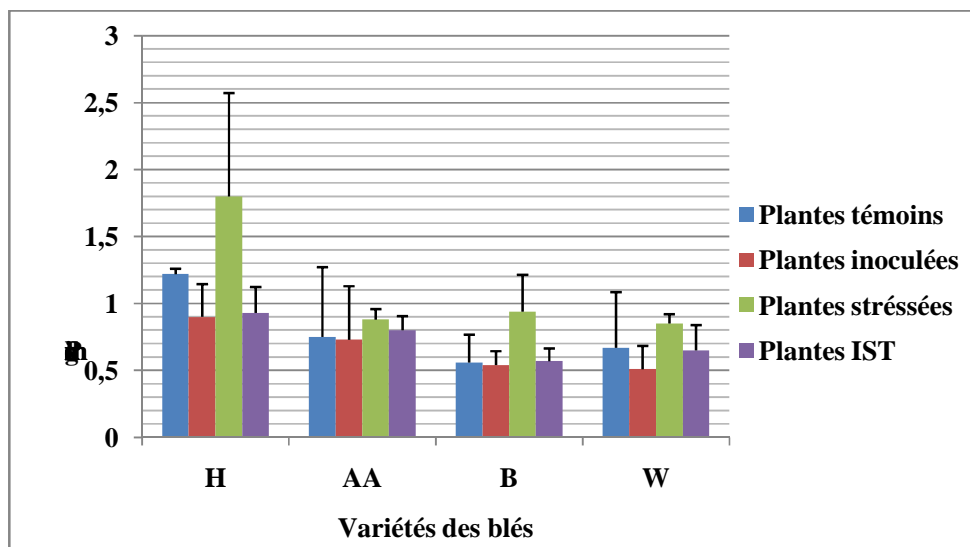


Figure 13 : Variations du poids sec des racines chez les variétés de blé dans différentes conditions. H : variété de blé tendre (Hidhab) ; AA: variété de blé tendre (Ain-Abid) ; B : variété de blé dur (Boussellem) ; W : variété de blé tendre (Waha) ; IST : plantes inoculées sous stress hydrique.

II. Paramètres physiologiques

1. Mesure du taux de chlorophylle totale (TCT« unité de SPAD »)

Les variétés inoculées non-stressées présentent les plus fortes valeurs de teneur en chlorophylle (voir **Figure 14**) comparativement aux plantes témoins, aux plantes stressées et aux plantes inoculées sous stress hydrique. On a noté les valeurs en teneur de chlorophylle de $54,9 \pm 4,6$; $48 \pm 3,6$; $46,9 \pm 2,59$; $37,4 \pm 4,6$ unité de SPAD, respectivement chez Boussellem, Hidhab, Waha et Ain-Abid.

Les plantes inoculées par les CMA sous stress hydrique présentent des variations entre les variétés des blés. Ainsi, la plus grande valeur a été notée chez les variétés Waha et Hidhab avec les valeurs de $44,5 \pm 7,8$ et $42 \pm 10,8$ unité de SPAD. Quant aux plantes témoins, la plus grande valeur a été notée chez Waha avec $45,7 \pm 7,9$ unité de SPAD, et la plus petite valeur a été observée chez Ain-Abid avec $24,4 \pm 3,17$ unité de SPAD.

D'après Smith et son équipe (1993), l'évaluation de la teneur en chlorophylle montre que toutes les variétés répondent négativement au stress hydrique, et plusieurs auteurs démontrent que la teneur en chlorophylle diminue en cas de stress hydrique

Selon Hireche (2006), les différentes observations de la teneur en chlorophylle totale entre les génotypes sont liées à la tolérance au stress hydrique, il montre dans ses travaux sur la luzerne que la variété *Dessica* a tendance à lutter contre le stress hydrique en baissant sa teneur en chlorophylle. Alors que la variété *Moapa* implique une stratégie inverse (Siakhène, 1984).

L'augmentation des teneurs en chlorophylle totale est la conséquence de la réduction de la taille des cellules foliaires sous l'effet d'un stress hydrique qui engendre une plus grande concentration (Siakhène, 1984). Par contre, la chute des teneurs en chlorophylle est la conséquence de la réduction de l'ouverture des stomates visant à limiter les pertes en eau par évapotranspiration et par augmentation de la résistance à l'entrée du CO₂ atmosphérique nécessaire à la photosynthèse (Bousba et al., 2009). La quantité de la chlorophylle des feuilles peut être influencée par beaucoup de facteurs tels que l'âge des feuilles, la position des feuilles, et les facteurs environnementaux tels que la lumière, la température et la disponibilité en eau (Hikosaka et al., 2006).

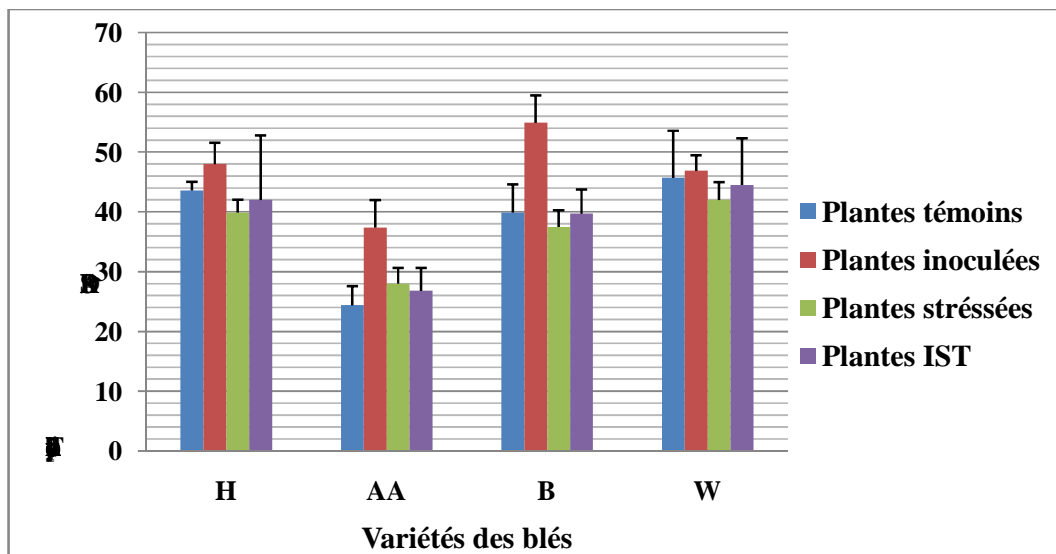


Figure 14 : Variation de la teneur en chlorophylle totale chez les variétés de blé en différentes conditions. H : variété de blé tendre (Hidhab) ; AA : variété de blé tendre (Ain-Abid) ; B : variété de blé dur (Boussellem) ; W : variété de blé dur (Waha) ; IST : plantes inoculées sous stress hydrique.

III. Paramètres biochimiques

1. Dosage de la proline (Prol « $\mu\text{g}/100\text{mg MF}$ »)

La proline constitue un marqueur de la résistance des plantes aux contraintes abiotiques. Les résultats ci-dessous montrent l'effet de l'osmoticum chez les variétés de blé soumises en différentes conditions.

La **Figure 15** nous informe que dans les conditions normales (plantes non-stressées non-inoculées), la teneur en proline est variable chez les quatre variétés des blés dur et tendre étudiés (Hidhab, Ain abid, Bousselem, et Waha). La plus forte valeur a été enregistrée chez la variété Waha ($0,87 \pm 0,3 \mu\text{g} / 100 \text{ mg MF}$), Hidhab ($0,709 \pm 0,52 \mu\text{g} / 100 \text{ mg MF}$), Ain abid ($0,644 \pm 0,15 \mu\text{g} / 100 \text{ mg MF}$), alors que la plus basse valeur a été notée chez Bousselem $0,308 \pm 0,09 \mu\text{g} / 100 \text{ mg MF}$.

Ces valeurs de teneur en proline présentent des différences avec les valeurs notées chez Waha et Hidhab quand ces variétés ont été inoculées par les CMA en conditions de stress hydrique ($0,88 \pm 0,23 \mu\text{g}/100 \text{ mg MF}$), dont la valeur la plus basse a été enregistrée chez Bousselem ($0,299 \pm 0,3 \mu\text{g}/100 \text{ mg MF}$).

En conditions de stress hydrique, on remarque une très forte accumulation de la teneur en proline foliaire. Il a été noté que la variété qui avait mieux répondu au déficit hydrique était la variété Waha ($1,864 \pm 0,34 \mu\text{g}/100 \text{ mg MF}$), alors que la variété Ain-Abid avait répondu de façon faible au stress hydrique.

Plusieurs auteurs montrent que l'augmentation de la teneur en proline est reliée directement à l'application du stress hydrique (Cechin et *al.*, 2006). L'accumulation de la proline a été démontrée chez de nombreuses espèces et dans différentes situations de stress (osmotiques, hydriques, thermiques) (Blum, 1996).

D'après Eliane et son groupe (2007), il apparaît que la proline peut conférer la tolérance des plantes aux stress par le développement d'un système antioxydant qui peut jouer un rôle d'indicateur d'ajustement osmotique.

La teneur en proline a été tellement faible chez les plantes inoculées non-stressées, et la variété qui a présenté la plus grande valeur est la variété Waha ($0,65 \pm 0,55 \mu\text{g}/100 \text{ mg MF}$). On peut conclure que l'effet des *Glomus* a pu réduire l'accumulation de la proline en condition de stress hydrique.

Les plantes inoculées non-stressées ont répondu au stress hydrique en abaissant leurs teneur en proline. La cause de cet effet peut être due au taux de l'inoculation qui est probablement faible. Une seconde hypothèse pourrait être que ces plantes n'ont pas pu tolérer au stress hydrique à cause de l'infection par les CMA.

Selon les recherches de Benkhalel, Gomez et Oihabi en 2003, l'inoculation du trèfle par les mycorhizes a augmenté la teneur en proline. En effet, les plantes répondent à la mycorhization par la synthèse des « osmotocums » dont la proline.

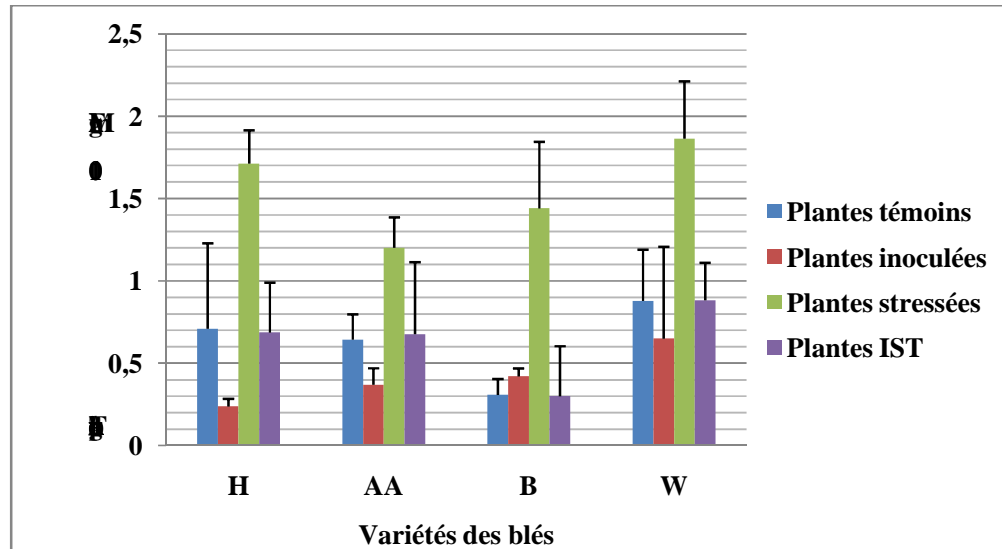


Figure 15 : variation de la teneur en proline chez les variétés des blés sou mises en différentes conditions. H : variété de blé tendre (Hidhab) ; AA: variété de blé tendre (Ain-Abid) ; B : variété de blé dur (Boussellem) ; W : variété de blé dur (Waha) ; IST : plantes inoculées sous stress hydrique.

2. Dosage des sucres solubles

La teneur en sucres solubles la plus élevée a été enregistrée chez les plantes soumises aux contraintes hydriques (voir **Figure 16**), dont les plus fortes valeurs ont été notées chez Boussellem, Waha et Hidhab ($2,581 \pm 0,08$; $2,433 \pm 0,07$; $2,113 \pm 0,21$ $\mu\text{g}/100$ mg MF). Le dosage des sucres solubles a montré que le stress hydrique a entraîné l'accumulation de cette molécule chez les quatre variétés de blé. En effet, Perata et son groupe (2001) ont montrés que l'accumulation des sucres solubles est un moyen adopté par les plantes en cas de stress, afin de résister aux contraintes du milieu.

Selon l'équipe de Hillali (2006) , les sucres solubles sont des indicateurs des degrés de stress, à cause de son importante augmentation lors de la sévérité, les sucres métaboliques (glucose, galactose, saccharose, et fructose) permettent la résistance aux différents stress.

Les plus basses valeurs ont été enregistrées chez les plantes inoculées non-stressées, dont on a noté les valeurs suivantes : $0,931 \pm 0,28$; $0,786 \pm 0,11$; $0,656 \pm 0,104$ et $0,148 \pm 0,04 \mu\text{g}/100 \text{ mg MF}$, respectivement chez Hidhab, Boussellem, Ain-Abid et Waha. Ces résultats ne sont pas en accord avec les résultats d'El Ouaraoui et ses collaborateurs (2003), qui ont montré que l'inoculation du trèfle par les mycorhizes a augmenté la teneur en sucres solubles. En effet, les plantes répondent à la mycorhization par la synthèse des sucres réducteurs.

Chez les plantes témoins, la plus grande valeur a été enregistrée chez la variété Waha avec $1,098 \pm 0,47 \mu\text{g}/100 \text{ mg MF}$, alors que la plus basse valeur a été notée chez Ain-Abid $0,559 \pm 0,004 \mu\text{g}/100 \text{ mg MF}$.

Les plantes inoculées par les CMA sous stress hydrique présentent des variations aux niveaux des taux des sucres solubles, dont la plus forte valeur a été notée chez la variété Hidhab ($1,786 \pm 0,08 \mu\text{g}/100 \text{ mg MF}$), et le plus faible taux de sucre a été enregistré chez la variété Ain-Abid ($1,118 \pm 0,12 \mu\text{g}/100 \text{ mg MF}$). Dans ce cas, on remarque l'effet du stress hydrique qui domine sur l'effet des CMA en stimulant la teneur en sucres chez les variétés des blés.

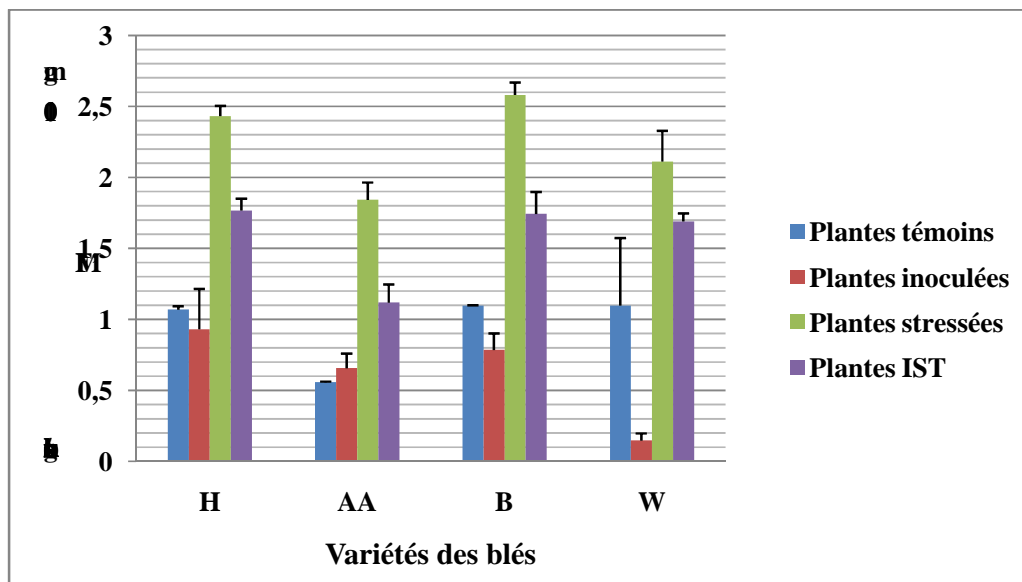


Figure 16 : Variation de la Teneur en sucres solubles chez les variétés des blés en différentes conditions ; H : variété de blé tendre (Hidhab) ; AA: variété de blé tendre (Ain-Abid); B: variété de blé dur (Boussellem) ; W: variété de blé dur (Waha) ; IST : plantes inoculées sous stress hydrique.

Dans le but de savoir la variété qui a mieux répondu au régime de stress hydrique, des tests statistiques ont été faite à l'aide du logiciel « XLSTAT », dont le premier test a été réalisé par L'ACP (Analyse en Composante principale) (voir **Annexe 10**) qui a pour objectif de déterminer le paramètre le plus discriminant parmi les six paramètres mesurables (longueur des feuilles, longueur des racines, poids sec des racines, SPAD , la teneur en proline, et la teneur en sucre solubles).

L'ACP nous a indiqué que ce sont les sucres solubles qui discriminent mieux (voir **Annexe 11 et 12**) entre les quatre variétés à tester dont Hidhab, Ain -Abid, Boussellem et Waha.

Pour confirmer les résultats de la première analyse (ACP), une autre analyse a été effectuée, c'est l'analyse de la variance (ANOVA) (voir **Annexe 13**), les résultats montrent qu'il y a effet variétés et traitements chacun à part, on a noté que l'effet entre les traitements ($F=110,508$) est plus significatif que celui entre les variétés ($F=13,489$). Donc l'interaction triple (Variétés de blés x Inoculation x Stress hydrique) a un effet hautement significatif pour le paramètre Sucres solubles.

Le test Newman-Keuls (SNK) au seuil 95% classe les variétés en trois groupes homogènes A, B et C (voir **Annexe 14**) dont les variétés Boussellem et Hidhab appartenant au groupe A, en suite la variété Waha (groupe B), et en dernier la variété Ain-Abid qui appartient au groupe C.

En ce qui concerne les traitements, le test de Newman -Keuls au seuil 95%, classe les quatre traitements en quatre groupes (voir **Annexe 15**) dont la différence est très hautement significative toujours pour le paramètre Sucres solubles , dont les meilleurs valeurs ont été notés chez plantes stressées (du premier groupe A). Ces valeurs sont meilleurs que les valeurs du groupes B en ce qui concerne les plantes i noculées sous stress hydriques. Ces derniers sont meilleurs que les valeurs noté chez les groupes C et D qui présentent respectivement les plantes témoins et les plantes stressées.

Ces résultats nous ont permis de conclure que l'inoculation par les champignons mycorrhizogènes à arbuscules a donnée un effet positif pour la tolérance aux contraintes issues du stress hydrique.

VI. Coloration des racines

Après un mois et demi, on a réalisé la coloration des racines, dont le but est de confirmer la présence des mycorhizes.



Figure 17 : Structure des champignons mycorhiziens arbusculaires chez le blé .

La présence des CMA, s'est manifestée au niveau des plantules par une coloration bleue au niveau racinaire et en présence de bleu de méthylène. Il s'agit de structure bien visible au microscope optique dans les tissus du cortex racinaire du blé. On a pu voir des vésicules.

Ces vésicules montrent le début de la colonisation des hyphes intraracinaires. Ce sont des structures riches en gouttelettes lipidiques, elles joueraient le rôle d'organes de réserve.

Nous avons observé qu'il y a une grande quantité de vésicules dans tous les fragments racinaires observés. Ce qui montre le début de la colonisation racinaire. Tandis que les arbuscules (ramifications latérales des hyphes fongiques dans les cellules du cortex) n'ont pas été observés sous microscope. On peut conclure que les espèces de champignons mycorrhizogènes existantes dans le système racinaire des plantules de *T. durum* et *T. aestivum* doivent faire partie du groupe de CMA qui produit des vésicules dans les tissus des racines hôtes.

Les études de Benmazari (2011) sur l'espèce du *Cupressus dupreziana* (voir **Figure 18**), ont montré la présence d'arbuscules au niveau des plantules et des parcelles d'études. En effet, les arbuscules représentent les points fonctionnels entre

les symbiotes et reflètent le mieux les potentialités d'échanges symbiotiques de l'association MA en place. De plus, Harrison (1999) confirme cette interface cellulaire qui est considéré comme le site d'échange bidirectionnel des éléments nutritifs entre les deux symbiotes. On peut aussi estimer que la durée de vie des arbuscules se limitent à quelques jours, après ils deviennent sénescents et se dégradent en laissant la cellule intacte et capable d'intégrer un nouvel arbuscule. Un autre chercheur a montré que dans la plupart des cas, après leurs résorptions, les arbuscules seront remplacées par de nombreuses vésicules (Benmazari, 2011).

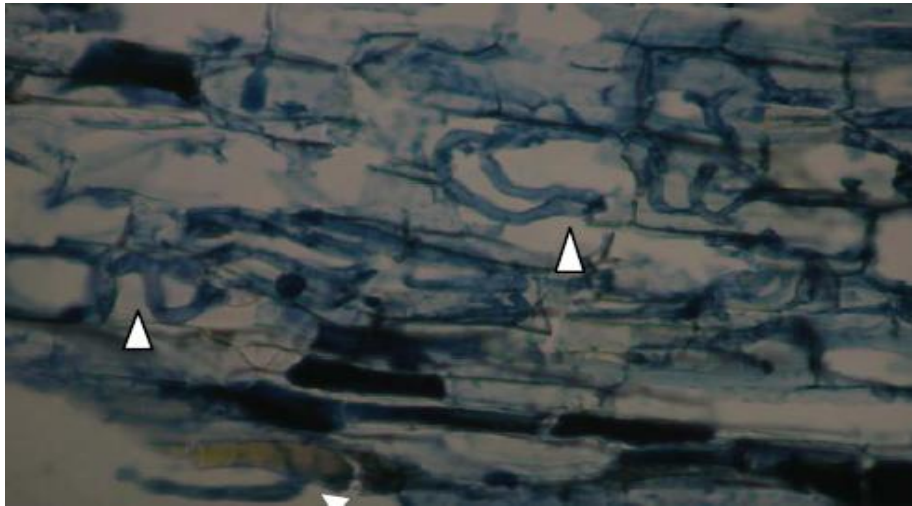


Figure 18 : Hyphe mycélien intercellulaire dont le tronc se ramifie (tête de flèche) pour former deux arbuscules dans deux cellules adjacentes (Benmazari, 2011).

*Conclusion et
Perspectives*

Conclusion et Perspectives

La filière des blés est plus en plus soumise en condition de sécheresse ce qui caractérise les régions arides et semi-arides dont l'Algérie. En effet, la sécheresse, en provoquant un déficit hydrique important est un handicap pour toute action d'amélioration de la culture céréalière en total.

La tolérance des plantes aux stress hydrique exige des changements morphologiques (longueurs et formes des feuilles et des racines, ainsi que leurs poids et leurs matière sèche) et métaboliques, tels que la sécrétion des molécules osmoprotéctrices dont la proline et les sucres solubles.

La plante profite aux associations symbiotiques avec les microorganismes de la rhizosphère, dont les champignons mycorhizogènes à arbuscules, pour déclencher la mise en place des mécanismes de résistance en mécanismes de résistance en protégeant indirectement les racines de la plante et en favorisant son développement et sa croissance sous stress hydrique.

L'objectif de ce travail est de tester l'effet de la mycorhization par les champignons mycorhiziens arbusculaires chez quatre variétés des blés dur et tendre en conditions de stress hydrique.

L'application du régime de stress hydrique et de l'inoculation par les CMA (champignons mycorhizogènes arbusculaires) se manifeste chez l'ensemble des variétés de blé (Hidhab, Ain-Abid, Boussellem et Waha) étudiées par des traits généraux communs. il s'agit, d'une modification morphologique, physiologique et biochimique de la plante.

Parmi les paramètres mesurés et les plus affectés, figurent la longueur des feuilles et des racines, le poids sec des racines, le taux de chlorophylle, la teneur en proline, la teneur en sucres solubles et la coloration des racines. Ces paramètres ont confié par une analyse statistique des différences significatives à hautement significatives pour seulement le paramètre discriminant dont les sucres solubles en de l'interaction triple (Mycorhization x Stress hydrique x Variétés des blés).

Les résultats obtenus durant cette étude montrent que l'inoculation augmente considérablement la croissance des feuilles en régime de stress hydrique comparativement avec celles des témoins, plus exactement chez les variétés Boussellem et Waha du blé dur. De même pour la longueur des racines dont l'accumulation du système racinaire chez les quatre variétés des blés dur et tendre soumises en régime hydrique sont significativement plus affectées que celles du régime modéré.

Conclusion et Perspectives

D'autre part, une accumulation remarquable de proline et des sucres solubles a été observée chez l'ensemble des variétés surtout chez Hidhab et Boussellem. Cette accumulation est en corrélation avec l'inoculation avec les CMA et l'application du stress hydrique.

L'observation de la morphologie des ramifications au niveau des racines de toutes les variétés des blés considérés, nous a permis de confirmer l'existence réelle des champignons mycorhizogènes à arbuscules.

En conclusion, nos résultats indiquent que l'inoculation avec les champignons mycorhizogènes à arbuscules (du genre *Glomus*) stimule la croissance et la nutrition minérale des quatre variétés des blés qui en sont dépendent même en situation de stress hydrique.

Une étude sur la variabilité de la réponse à la tolérance au stress hydrique est à envisager avec différents champignons mycorhiziens en mesurant d'autres paramètres écophysologiques (la conductance stomatique, la transpiration, le CO₂ échangé, le taux de mycorhization, l'indice de résistance au stress hydrique, la mesure de la nutrition minérale « N, P, K et Mg » dans les tiges feuillées, etc..).

Références
Bibliographiques

Aidaoui ,T. & Hartani. (2011) .Gestion de l'irrigation du blé dur par des indicateurs de l'état hydrique. Institut National Agronomique d'Alger (INA) . Avenue Hassen Badi, El Harrach, Algérie. 589- 590pp.

Amokrane, A., Bouzerzour, H., Benmahammed, A. & djekoun, A. (2002). Caractérisation des variétés locales, syriennes et européennes de blé dur évaluées en zone semi-aride d'altitude. *Sciences et Technologie*. Univ. Mentouri. Constantine. D : 33 -38.

Anonyme a. (2000) .La résistance des plantes à la sécheresse. INRA.[Online] <http://www7.inra.fr/internet/Directions/DIC/ACTUALITES/NATURE/pdf/secher2.pdf>. [Consulté le 21-Fev-2015].

Anonyme b. (2011). [Online]. <http://www.blehybride.net/stades-%20du-ble-532.aspx>.

Assem, N., El Hafid, L., Haloui, B. & El Atmani, K. (2006).Effets du stress hydrique appliqué au stade trois feuilles sur le rendement en grains de dix variétés de blé cultivées au Maroc oriental. *Science et changements planétaires / Sécheresse* . Vol 17 : 499-505.

Auriau, P., Doussinault , G., Jahier , J., Lecomte , C., Pierre , J., Pluchard , P., Rousset, M., Saur , L. & Trottet , M. (1992) .Le blé tendre. In *Amélioration des espèces végétales cultivées*. Ed. INRA. Paris. p. 22- 38.

Azcon.Aguilar, C. & A. M, Barea. (1992). Interactions between mycorrhizal fungi and other rhizosphere microorganisms. Dans: Allen, M.J. (éd), *Mycorrhizal Functioning : an integrative plant-fungal process*, Chapman and Hall, New York.163- 198p.

Barral, Y., Jentsch, S. & Mann, C. (1995). G1 cyclin turnover and nutrient uptake are controlled by a common pathway in yeast. 9: 399-409.

Becard, G. & Fortin, J.A. (1988).Early events of vesicular-arbuscular mycorrhizaformation on Ri T-DNA transformed roots. *New phytol.*108: 211-218.

Beddiar, Soumia. & Benkechrouda, Rekaia. (2013).Etude des caractères d'adaptation mopho-physiologique et biochimique des plantules du blé dur à la salinité. Thèse de Master : Université Kasdi Merbah. Ourgla. Algérie.24-25 p.

Benmazari, Nadjat. (2011) .Recherche des conditions adéquates pour la micropropagation du cyprès du Tassili *Cupressus duprziana* A.CAMUS étude préliminaire des mycorhizes. Thèse de doctorat : Université Mouloud Maamari. Tizi-ouzou. 15-22p.

Bennai, M. & Benabbas, B. (2007) .L'amélioration des rendements des céréales par une fertilisation adaptée aux conditions pédoclimatiques algériennes. [Disponible sur] www.profert-dz.com/images/swf/presenta_cereal.pdf.

Bhardwaj, R., Sharma, I., Kanwar ,M., Sharma, R., Handa, N., Kaur, H. & Kapoor ,D. (2013) .LEA Proteins in Salt Stress Tolerance. *Springer*. 79-112 p.

- Blum, A.** (1999). Crop responses to drought and the interpretation of adaptation plant growth regulation. 20: 135 - 148.
- Bogeat-Triboulot, M.B. & Irène, Hummel.** (2014). Division et élongation cellulaire dan l'apex de la racine : diversité de réponse au déficit hydrique. Thèse de doctorat : Université de Lorraine. France.
- Bouffaud, Marie-Lara.** (2014). Histoire évolutive des Poaceae et relations avec la communauté bactérienne rhizosphérique. Thèse de doctorat : Université Claude Bernard, Lyon, 2011. French. 12p.
- Bozzini, A.** (1988). Origin, distribution, and production of durum wheat in the world. In Durum: chemistry and Technology . Etats-Unis. 1-16 p.
- Cechin, I., Rossi, C., Oliveira, C. & Fumis, F.** (2006). Photosynthetic responses and proline content of mature and young leaves of sunflower plants under water deficit. *Photosynthetica*. Vol 44(1): 143-146.
- Chehat, F.** (2007). Analyse macroéconomique des filières, la filière blés en Algérie. *Projet PAMLIM* « Perspectives agricoles et agroalimentaires Maghrébines Libéralisation et Mondialisation » Alger : 7-9 avril.
- Chennafi, H., Aidaoui, A., Bouzerzour, H. & Saci, A.** (2006). Yield response of durum wheat (*Triticum durum* Desf) cultivar Waha to deficit irrigation under semi-arid growth conditions. *Asian Journal of Plant Science* .5: 854-860.
- Choueiri.** (2003). Analyse de filière. la céréaliculture [Online]. <http://www.agriculture.gov.lb>
- Clerget, Y.** (2011) .Biodiversité des céréales Origine et évolution. In La biodiversité des céréales et leur utilisation par l'homme. Société d'Histoire Naturelle du Pays de Montbéliard. Extrait de la vidéoconférence du Service éducatif du Muséum Cuvier de la Ville de Montbéliard « La biodiversité des céréales et leur utilisation par l'homme » publié dans le bulletin 2011 de la Société d'Histoire Naturelle du Pays de Montbéliard. 1-16 p.
- CNUCED.** (2011). Le blé [Online] : <http://www.unctad.info/fr/Infocomm/Produits-Agricoles/Ble/Culture/>. [Consulté le 11/03/2015].
- Crowe, J., Hoekstra, A. & Crowe, L.** (1992). Anhydrobiosis. *Annal Rev physiol*. 54: 579-599.
- Debaeke, P., Purch, J. & Casal, M.** (1996). Elaboration du rendement de blé d'hiver en condition de déficit hydrique. Mise au point et test d'un modèle de stimulation de la culture de blé d'hiver en conditions d'alimentation hydriques et azotée variées. *Agronomie*. Vol 16(1): 25-46.
- Delaux, P.M.** (2011). Rôles des strigolactones et évolution des compétences mycorhiziennes dans la lignée verte. In *biosciences végétales*. Thèse doctorat : Université Toulouse III. France. 25-29 p.

- Deziel, M.H.** (2000).Influence de l'inoculation endomycorhizienne aux champs sur le rendement et la qualité de la pomme de terre. In sciences de l'agriculture et de l'alimentation. Thèse de doctorat : Université Laval. Canada.
- Duhoux, E., & Nicole, N.** (2004).Association et interaction chez les plantes. IRD Edition . 56-59p.
- Djermoun, A.** (2009).La production céréalière en Algérie. Les principales caractéristiques. *Nature et Technologie*. 1: 45-53.
- Eliane, Cristina G.V., Ivan, S., Marcos, P., Carlos A.S., Hugo Bruno, C.M., Celso, J.M. & Ellis R.J.** (2007).The molecular chaperone concept. *Semin Cell Biol.* 1: 1-9.
- Felliet, P.** (2000).Le grain de blé. Composition et utilisation. Ed. INRA. Paris. p. 58- 98.
- Folkert, A., Hoekstra, E., Golvina, C. & Buitink, M.** (2001).Mechanisms of plant desiccation tolerance. *TRENDS in plant science.* 6(9): 431-438.
- Fortin, J.A., C, Plenchette. & Y, Piche.** (2008).Les mycorhizes, La nouvelle révolution verte. Edition multi monde. p.138.
- Garay.Arroyo, A., Colmenero.Flores, M., Garcarrubio, A. & Covarrubias, A.** (2000).Highly hydrophilic proteins in prokaryotes and eukaryotes are common during conditions of water deficit. *Biological Chem.* 275: 5668-5674.
- Gate, P.** (1995) .Ecophysiologie du blé. Ed. ITCF. Technique et Documentat ion. *Lavoisier.* Paris. p.419- 425.
- Gaufichon, L., Prioul, J. & Bachelier, B.** (2010) .Quelles sont les perspectives d'amélioration génétique de plantes cultivées tolérantes à la sécheresse, p.48-51.
- Glemen, M. & Smith, F.A.** (1993).Gas exchange and chlorophyll content of "Trif blue" rabbitey and "Sharp blue" southern highbush. Blueberry exposed to salinity and supplemental calcium. *J. Amerc. Soc. Horti. Sci.* II. 749-756 p.
- Gomez.Roldan, M.V.** (2008).Rôle des Strigolactones dans la Symbiose Mycorhizienne à Arbuscules. In Interaction plantes-microorganismes. Thèse de doctorat : Université Toulouse III. France.7-11 p.
- Gausson, C. & Rognon, P.** (1995) .Désertification et aménagement au Maghreb. Ed. Med-Campus. Paris. p 45.
- Hamidou, F., Zombre, D. & Guinko,T.** (2005) .Réponse adaptative de deux variétés de niébé à un stress hydrique. *Cahiers Agricultures* .vol 14. 6 : 561-567.
- Hamon, S.** (2007) .L'amélioration de la résistance à la sécheresse peut -elle être basée sur les méthodes de sélection traditionnelle et/ ou sur les méthodes biotechnologiques modernes ? Possibilités et limites respectives. Centre IRD de Montpellier. 1 -6 p.

Hassani, A., Dellal, A., Belkhodja, M. & Kaid.Harche, M. (2008) .Effets de la sécheresse et l'accumulation de certains osmolytes chez l'orge (*Hordeum vulgare*). *European journal of Scientific Research*. 23(1): 49-61.

Hayashi, F., Ichino, T., Osanai, M. & Wada, K. (2000).Oscillation and regulation of proline content by P5CS and ProDH gene expressions in the light/dark cycles in *Arabidopsis thaliana* L. *Plant Cellular Physiology*. 4 (10): 1096-1101.

Hikosaka, K., Ishikawa, K., Borjigidai, A., Muller, O. & Onoda ,Y. (2006).Temperature acclimation of photosynthesis. mechanisms involved in the changes in temperature dependence of photosynthetic rate. *J. Exp. Bot.* 57 : 291-302.

Hireche. (2006).Réponse de la luzerne *Médicago sativa* (L) au stress hydrique et à la profondeur du semis. Thèse de Magister.Univ . EL Hadj Lakhdar. Batna : 83 p.

Hopkinsw, W. (2003).Les relations hydriques dans la plante entière. In.Physiologie végétale.Ed.De book & Larcier.Bruxelles, p 44-58.

Hucl, P. & Baker R.J. (1989).Tillering patterns of spring wheat genotypes grown in a semi - arid environment. *Can J Plant Sci.* 69:71-79.

INRA. (2002) .Gestion et usages agricoles de l'eau. Institut National de Recherche Agronomique. Centre de Toulouse [online]. <http://capoul.toulouse.inra.fr/centre/centre/eau2.html> [Consulté le 26/02/2015].

Jean-Pierre, A., Philippe, D., Bernard, I., Gilles, L., Bernard, S., François, T. & Alban, T. (2006) .Sécheresse et agriculture. Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau. *Expertise scientifique collective, synthèse du rapport* , INRA. France. 72 p.

Jakobsen, I. (1995).Transport of phosphorus and carbon in arbuscular mycorrhizas .

Kruse, E., Uehlein, N. & Kaldenhoff, R. (2006).The aquaporins. *Genome Biol.*7 (2): 206.

Laaziza, Ben Khaled., Asuneion, Gomez., El Ouarraqi. & Oihabi, Abdallah. (2003).Réponses physiologiques et biochimiques du trèfle (*Trifolium alexandrinum* L.) à la double association Mycorrhizes- Rhizobium sous une contrainte saline. *Agronomie, EDP Sciences*. 23 (7) : 571-580.

Laberche, J.C. (2004) .La nutrition de la plante In. *Biologie Végétale*.Ed.Dunod. Paris. p.154 -163.

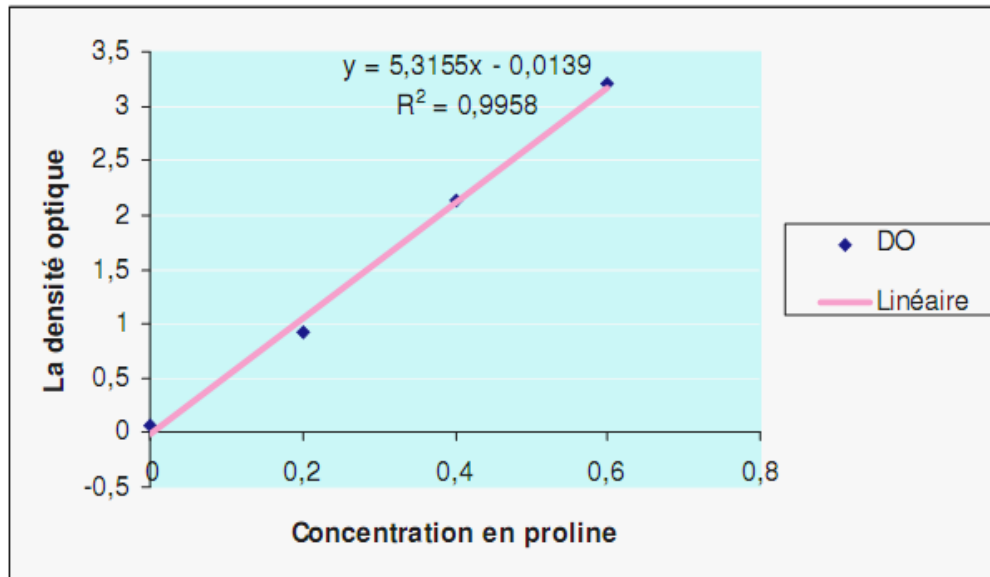
Laurent, H. & Sané, P. (2007) .Transfert d'eau et d'énergie. In .Bioclimatologie. Concept et application. Ed. Quae. Paris. p. 246.

- Lepoivre, P.** (2003) .Bases moléculaires et biologiques des pathosystèmes et fondements des stratégies de lutte. *In phytopathologie*. Ed. De boeck & larcier. Bruxelles. p.24-30.
- Loretti, E., De Bellis, L., Alpi, A. & Perata, P.** (2001). Why and how do plant cells sense sugars? *Ann Bot* 88 : 803 - 812.
- Maury, P., Langlade, N., Grieu, P., Rengel, D., Sarrafi, A., Debaeke, P. & Vincourt, P.** (2011) .Ecophysiologie et génétique de la tolérance à la sécheresse chez le tournesol. *Innovations Agronomiques*. 16 (14) : 123-138.
- Meddich, A. & Oihabi, A.** (1996).Effet des mycorhizes à arbuscules (MA) sur la croissance et la composition minérale du trèfle. Marrakech .Maroc.
- Meyer, S., Reeb, C. & Bosdeveix, R.** (2008).Adaptation des végétaux à leur environnement . *In Botanique* :biologie et physiologie végétales . Ed. Maloine. France.355-366 p.
- Mouellef, Adra.** (2010) .Caractères physiologiques et biochimiques de tolérance du blé dur (*Triticum durum Desf*) au stress hydrique. Thèse de magister : Université Frères Mentouri Constantine. 15p.
- Nabors, M.** (2008) .Réponse des plantes aux hormones et aux stimuli environnementaux. In : biologie végétal. Structure, fonctionnement, écologie et biotechnologie. Ed. Pearson Education. France. 247 p.
- Nouaim, R. & Chaussod, R.** (1996).Rôle des mycorhizes dans l'alimentation hydrique et minérale des plantes notamment des ligneux de zones arides. Zarragosa.Ciheam, cahiers options mediterraniennes ; n. 20.9-26.
- Nouaim, R. & Chaussod, R.** (1994).Mycorrhizal dependency of micropropagated argan tree (*Argania spinosa*): II) Mineral nutrition. *Agroforestry systems*.27: 67-77.
- Oihabi, A.** (1991) .Etudes des endomycorhizes à vésicules et à arbuscules sur le Bayoud et la nutrition du palmier dattier. Thèse de doctorat d'Etat Univ. MarraKech. 117 p.
- Olivier, B., Bertheau, Y., Diem, H.G. & Gianinazzi.pearson, V.** (1963) .Influence de la variété de *vigna unguiculata* dans l'expression de trois associations endomycorhiziennes à vésicules et arbuscules. *Can J Bot*, 61: 354-8.
- Passioura, J.B.** (1997).Drought and drought tolerance. *Plant Growth Regulation*, 20: 79-83.
- Peterson, L.R., Massicotte. Hugues, B., Melville. & Lewis, H.** (2004).Mycorrhizas: Anatomy and Cell Biology.*NCR research press*. Ottawa. p. 1-3, 147-153.
- Radhouane, L .** (2011) .Comportement physiologique de deux espèces de tabac au stress salin. *Revue des régions aride*. Institut des régions arides-Médénine-Tunisie. 5: 3-14.

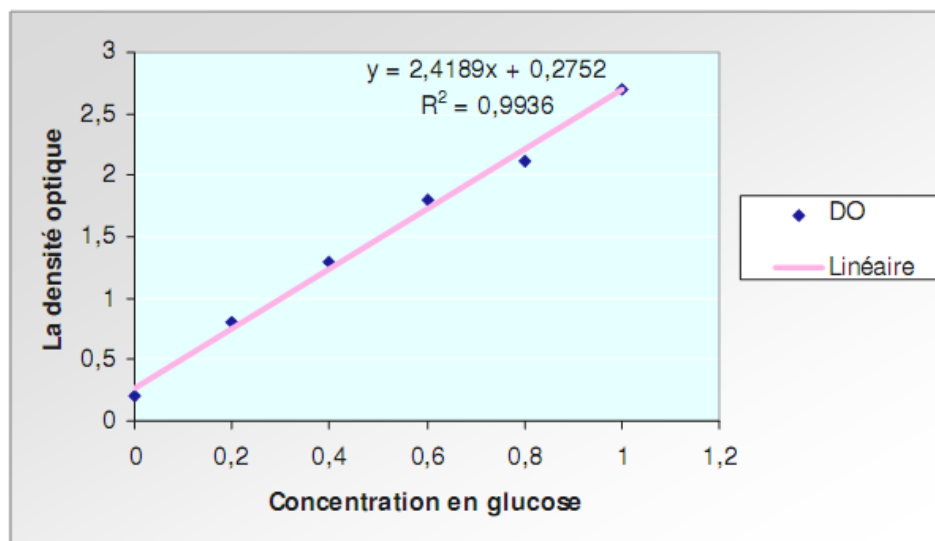
- Ramanjulu, S. & Bartels, D.** (2002). Drought and desiccation-induced modulation of gene expression in plants. *Plant Cell and Environment*. 25(2): 141-151.
- Readd, J.** (1984). The structure and function of the vegetative mycelium of mycorrhizal roots. In the ecology and physiology of the fungal mycelium. Edited by D. H. Jennings and A.D.M. Rayner. Cambridge University Press, Cambridge. 215-240p.
- Reece, J., Urry, L., Cain, M., Wasserma, S., Minorsky, P. & Jackson, R.** (2012) .Les réponses des végétaux aux stimuli internes et externes. In *CAMPBELL BIOLOGIE*. Ed. Pearson education. Canada. 955-948 p.
- Richardson, A.E., Simpson, R.J.** (2011). Soil microorganisms mediating phosphorus availability update on microbial phosphorus. *Plant Physiology*. 156:989 -996.
- Ricroch, A., Dattée, Y. & Fellous, M.** (2011). Biotechnologie végétale : environnement, alimentation, santé. Ed du Vuibert. Paris. 170-182p.
- Rorat, T.** (2006). Plant dehydrins tissue location, structure and function. Cellular & molecular biology letters. *Institute of plant genetics*. 11(4):536-556.
- Rurek, M.** (2010). Diverse accumulation of several dehydrin-like proteins in cauliflower (*Brassica oleracea* var. botrytis), *Arabidopsis thaliana* and yellow lupin (*Lupinus luteus*) mitochondria under cold and heat stress. *Plant Biology*. 10: 1-17.
- Sabbagh, C.** (2006). Sécheresse et agriculture. Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau. Synthèse du rapport INRA. France. 72- 121p.
- Schüßler, A., Schwarzott, D. & Walker, C.** (2001). A New Fungal Phylum, the Glomeromycota: Phylogeny and Evolution. *Mycological Research* 105:1413-1421.
- Seki, M., Narusaka, M., Abe, H., Kasuga, M., Yamaguchi, Shinozaki, K., Carninci, P., Hayashizaki, Y. & Shinozaki, K.** (2001) .Monitoring the expression pattern of 1300 *Arabidopsis* genes under drought and cold stresses using full -length cDNA microarray. *Plant Cell*. 13(1): 61-72.
- Sh, Li., J.G, Huguet., PG, Schoch., C, Bussi., P, Orlando. & J.C, L'hôtel.** (1990). Réponse de jeunes pêchers cultivées en pots à différents régimes d'alimentation hydrique. II : Effets sur la croissance et le développement. A gronomie, EDP Sciences. 350-363 p.
- Simard, Frédéric.** (2014). Stimulation de la synthèse des composés nutraceutiques et aromatiques dans les fines herbes et les légumes par les champignons mycorrhiziens à arbuscules. Thèse de doctorat : Université LAVAL. Québec. Canada. 6- 11p.
- Siakhène, N.** (1984). Effet du stress hydrique Sur quelques espèces de luzerne Annuelle. Mémoire ing Agr. INA. El Harrach. 90 p.

- Smart, B., Moskal, A., Cameron, D. & Bennett, B.** (2001). MIP Genes are downregulated under drought stress in *Nicotiana glauca*. *Plant Cell Physiol.* 42: 686-693.
- Smith, S.E. & Read, D.J.** (2008). *Mycorrhizal Symbiosis, Third Edition*. Academic Press.
- Smith, S.E. & Read D.J.** (1997). *Mycorrhizal Symbiosis, Third Edition*. Academic Press. San Diego. Calif. U.S.A.
- Tahri, E., Belabed, A. & Sadki, K.** (1997). Effet d'un stress osmotique sur l'accumulation de proline, de chlorophylle et des ARNm codant pour la glutamine synthétase chez trois variétés de blé dur (*Triticum durum Desf.*). *Bulletin de l'Institut Scientifique*. Rebat. 21:81-89.
- Tardieu, F. & Dreyer, E.** (1997). Régulation des échanges gazeux par les plantes soumises à la sécheresse. In : L'eau dans l'espace rural. Production végétale et qualité de l'eau. Ed. INRA. France. p.41-59.
- Triboï, E.** (1990). Modèle d'élaboration du poids du grain chez le blé tendre. *Agronomie*. 10 (3):191-200.
- Turner, C., Wright, G. & Siddique, M.** (2001). Adaptation of grain legume to waterlimited environments. *ELSEVIER*. 71: 193-231.
- Wang, B. & Qiu, Y.L.** (2006). Phylogenetic distribution and evolution of mycorrhizas, in land plants. *Mycorrhiza* 16: 299-363.
- Wong.** (2009). Dehydrin-like proteins in desiccation tolerance. in intertidal seaweeds. *Northeastern*. 45: 176-187.
- Yancey, H., Clark, E., Hand, C., Bowlus, D. & Somero, N.** (1982). Living with water stress. evolution of osmolyte systems. *Science*. 217: 1214-1222.
- Yokota, A., Takahara, K. & Akashi, K.** (2006). Water stress. In: *Physiology and Molecular Biology of Stress Tolerance in Plants*. Springer. p.22-25.
- Zerrad, W., Hillali, S., Mataoui, B., El Antri, S. & Hmyene, A.** (2006). Etude comparative des mécanismes biochimiques et moléculaires de résistance au stress hydrique de deux variétés de blé dur. *Biochimie, Substances naturelles et environnement*. Congrès international de biochimie. Agadir.
- Zeramndini, N.** (2009). Etude du polymorphisme intra et inter- spécifique du gène β -tubuline chez des espèces de champignons mycorrhiziens à arbuscules en vue de développer des marqueurs moléculaires. Thèse de M. Sc en sciences biologiques. Université de Montréal. 101 p.

Annexes



Annexe 01 : Courbe étalon du dosage de la proline.



Annexes 02 : Courbe étalon du dosage des sucres solubles.

	Témoins	Plantes inoculées	Plantes stressées	Plantes inoculées sous stress hydrique
Hidhab	20.30	26.00	19.00	15.50
Ain Abid	17.00	30.00	14.00	16.30
Boussellem	21.00	27.00	18.50	20.60
Waha	17.80	24.00	15.50	18.40

Annexe 03 : Longueur des feuilles au 4^{ème} stade

	Témoins	Plantes inoculées	Plantes stressées	Plantes inoculées sous stress hydrique
Hidhab	27.00	30.00	33.00	33,50
Ain Abid	26.00	28.00	34.00	30.00
Boussellem	37.00	39.00	42.00	40.00
Waha	38.10	40.20	43.00	41.50

Annexe 04 : Longueur des racines.

	Témoins	Plantes inoculées	Plantes stressées	Plantes inoculées sous stress hydrique
Hidhab	1.22	0.90	1.80	0.93
Ain Abid	0.75	0.73	0.88	0.80
Boussellem	0.56	0.54	0.94	0.57
Waha	0.67	0.51	0.85	0.53

Annexe 05 : Poids sec des racines.

	Témoins	Plantes inoculées	Plantes stressées	Plantes inoculées sous stress hydrique
Hidhab	43.60	48.00	39.90	42.00
Ain Abid	24.40	37.40	28.00	26.80
Boussellem	39.90	54.90	37.50	39.70
Waha	45.70	46.90	42.00	44.50

Annexe 06 : Taux en chlorophylle (SPAD).

	Témoins	Plantes inoculées	Plantes stressées	Plantes inoculées sous stress hydrique
Hidhab	0.709	0.238	1.713	0,687
Ain Abid	0.644	0.370	1.201	0.676
Boussellem	0.308	0.420	1.441	0.299
Waha	0.878	0.650	1.864	0.882

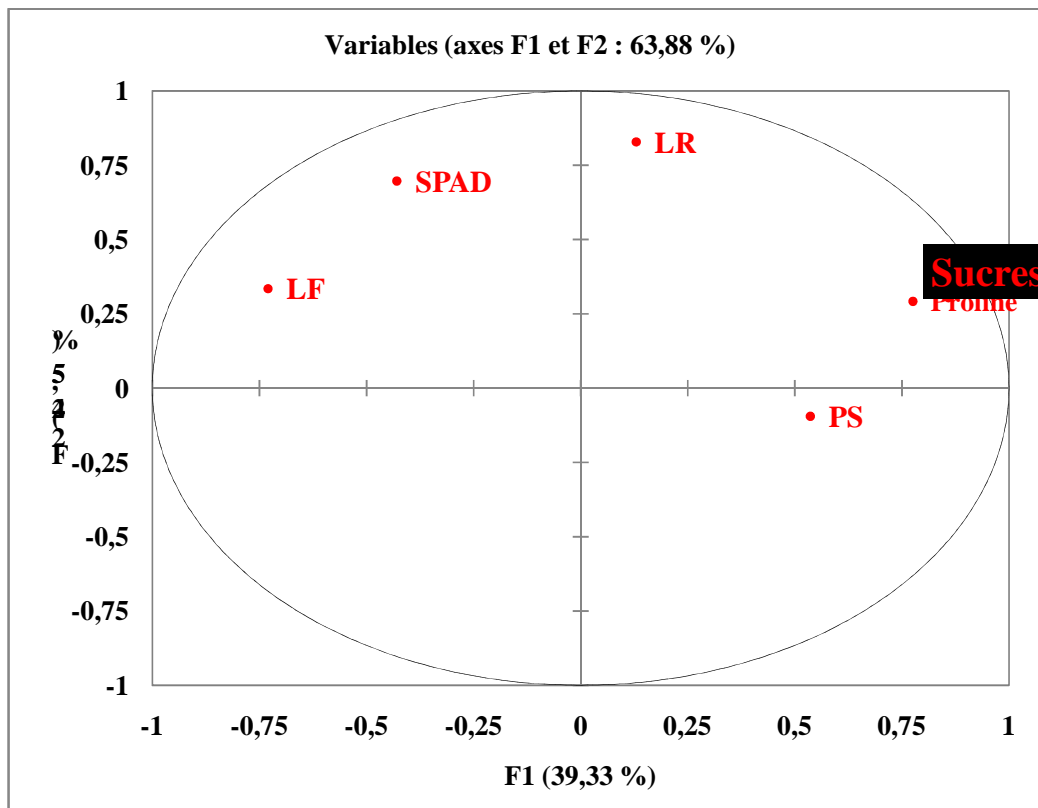
Annexe 07 : Dosage de la proline.

	Témoins	Plantes inoculées	Plantes stressées	Plantes inoculées sous stress hydrique
Hidhab	1.069	0.931	2.433	1.768
Ain Abid	0.559	0.656	1.843	1.118
Boussellem	1.097	0.786	2.591	1.743
Waha	1.098	0.143	2.113	1.690

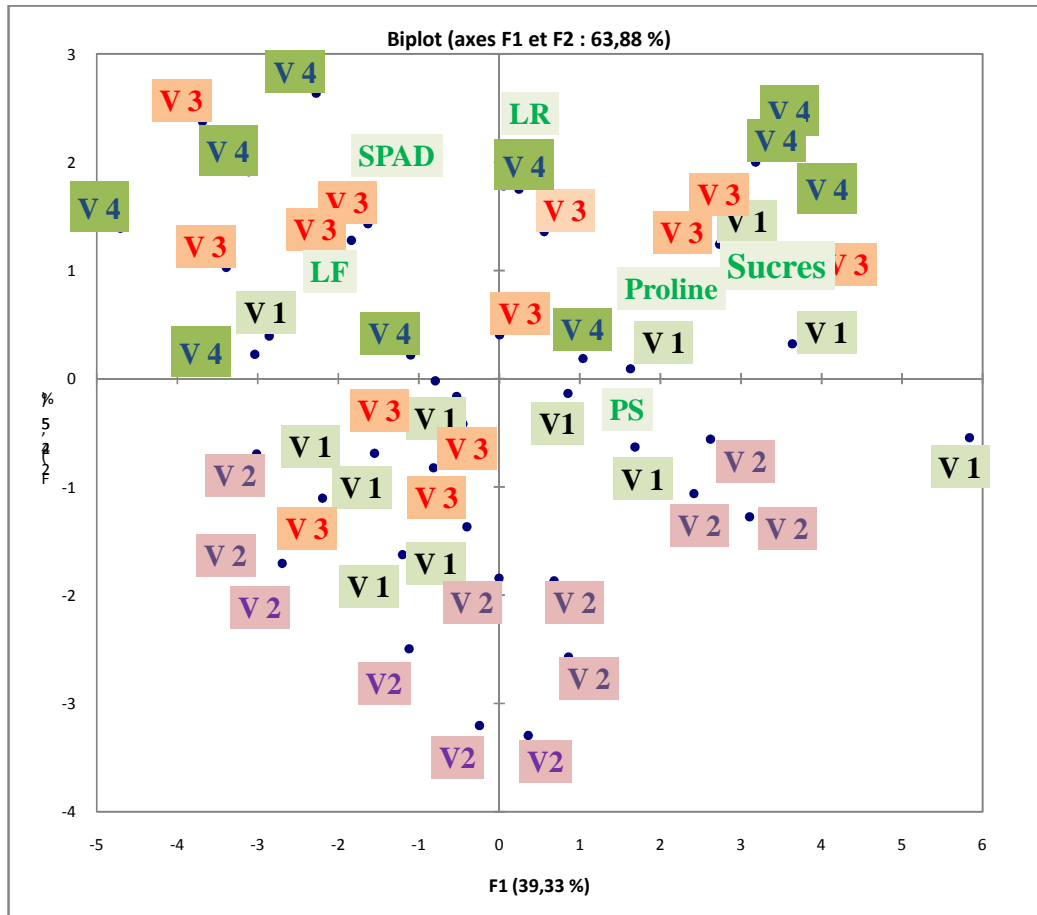
Annexe 08 : Dosage des sucres solubles.

	LF	LR	SPAD	PS	Proline	Sucres
Valeur propre	2,360	1,473	1,095	0,469	0,381	0,221
Variabilité (%)	39,333	24,547	18,250	7,824	6,357	3,688
% cumulé	39,333	63,880	82,130	89,955	96,312	100,000

Annexe 09 : Analyse en Composantes Principales des paramètres mesurés (LF : Longueur des feuilles, LR : longueur des racines, teneur en chlorophylle (SPAD), PS : Poids sec des racines, teneur en proline, et teneur en sucres solubles).



Annexe 10 : Analyse en Composantes Principales (ACP), en déterminant le paramètre le plus discriminant « Sucres solubles ».



Annexe 11 : Classement des variétés et des traitements en ACP par rapport à l'axe des sucres solubles. Boussellem (V3) en 1^{er}, Hidhab (V2) en 2^{ème} classe, Waha (V3) en 3^{ème}, et Ain-Abis (V4) en dernière classe (V : Variété).

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Variétés	3	2,222	0,741	13,489	< 0,0001
Traitements	3	18,207	6,069	110,508	< 0,0001

Annexe 12 : Analyse de la variance pour le paramètre (Sucres solubles) .

Modalité	Moyenne estimée	Groupes
Boussellem	1,559	A
Hidhab	1,550	A
Waha	1,262	B
Ain-Abid	1,044	C

Annexe 13 : Classement des groupes entre les 4 variétés selon le test Newman-Keuls (SNK) avec un intervalle de confiance à (95%).

Modalité	Moyenne estimée	Groupes
Plantes stressées	2,243	A
Plantes IST	1,580	B
Plantes témoins	0,964	C
Plantes inoculées	0,630	D

Annexe 14: Analyse des différences entre les traitements, selon Newman-Keuls (SNK) avec un intervalle de confiance à (95%).

M^{elle} BELABED Sihem.

Mémoire pour l'obtention du diplôme de : Master.

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie.

Filière : Sciences Biologiques.

Spécialité : Biotechnologie et Génomique Végétales.

Option : Biotechnologie et Génomique Végétales.

Thème : Effet de l'inoculation des blés dur et tendre (*Triticum durum* Desf et *T. aestivum* L) par les champignons mycorhizogènes arbusculaires sous stress hydrique.

Résumé :

La filière céréale en particulier les blés dur et tendre, est plus en plus soumise à des conditions climatiques défavorables, provoquant un stress hydrique important qui est souvent un frein à toute action d'amélioration.

L'objectif de ce travail est de tester l'effet de la mycorhization par les champignons mycorhiziens arbusculaires chez quatre variétés des blés dur et tendre en conditions de stress hydrique. A travers cette étude, une analyse des processus morphologiques, physiologiques, et biochimiques dont la longueur des feuilles et des racines, poids sec des racines, le taux en chlorophylle, les teneurs en proline et en sucres solubles des plantes ont été effectuées.

Les résultats obtenus montrent que l'inoculation augmente considérablement la croissance des feuilles et des racines, leurs poids sec et leurs teneur en chlorophylle, par contre elle réduit les teneurs en proline et en sucre soluble en régime de stress hydrique.

L'effet de l'interaction triple (4 variétés des blés x mycorhization x stress hydrique) a été hautement significatif surtout pour les deux paramètres teneurs en sucres solubles et en proline. En effet l'inoculation des plantes présente une alternative pour tenter de solutionner les problèmes de sécheresse pour lesquels les blés dur et tendre sont confrontés.

Mots clés : Champignons mycorhizogènes à arbuscules, stress hydrique, blé dur, blé tendre, paramètres morphologiques, physiologiques, biochimiques.

Jury d'évaluation :

Président du jury : M^{me} KHALFALLAH Nadra (Professeur - UFM Constantine).

Rapporteur : M^{me} BENABDOUN Faiza-Meriem (Maitre-Assistante « A » - UFM Constantine).

Examineurs : M^{me} HAMMOUDA Dounia (Maitre de conférence « B » - UFM Constantine).

Année universitaire : 2014/2015