



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE

SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABDELHAMID IBN BADIS DE MOSTAGANEM

FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE  
DEPARTEMENT DES SCIENCES  
AGRONOMIQUE

Domaine: Science de la nature et de la vie

Filière: Sciences Agronomiques

Spécialité: Production végétale

Mémoire de fin d'étude

**Présentée par**

BOUGUEROUDJ NAIMA  
LALOU AMINA

### **Thème**

Les champignons endophytes d'algues marines: Etude *in vivo* sur la culture du blé dur et perspectives à la tolérance au stress salin.

#### **Membres de Jury :**

<b>Président :</b>	Dr MAHIOUT Djamel	MCA	Université de Mostaganem
<b>Examineur :</b>	Dr HAMZA Lahouaria	MCA	Université de Mostaganem
<b>Encadrant :</b>	Pr BOUZOUINA Mohammed	Pr	Université de Mostaganem

**Année universitaire : 2023/2024**

## **Dédicace**

### *À Ma Mère*

*Affable, honorable, aimable, tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement. Tu n'as jamais cessé de m'encourager et de prier pour moi. Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études. Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour ses enfants, en me guidant sur le bon chemin dans ma vie et mes études. Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour.*

### *À Mon Père*

*Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour toi. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien-être. Ce travail est le fruit des sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation.*

### *À Ma Famille*

*À mes sœurs Mariam et Soumia et à mon frère Ismail et Amine, qui m'ont toujours soutenu et cru en moi.*

### *À ma tante et à mon oncle*

*Je dédie cette réalisation à mes tante Rabia et Zainab pour leur soutien moral et leur présence constante.*

### *À Mes Camarades*

*Ainsi qu'à tous mes camarades avec qui j'ai partagé une partie de mon parcours, et avec qui j'ai vécu des moments inoubliables de joie et de folie au cours de ces années universitaires. Votre complicité et votre amabilité ont été précieuses. Merci du fond du cœur. ZINEB BASMA KHEIRA NAIMA ZINEB DJAWHER AYA*

*L.AMINA*

## **Dédicace**

*À mes parents, dont l'amour, le soutien et les sacrifices ont éclairé chacune de mes journées. Votre foi inébranlable en moi a été la force motrice derrière chaque défi que j'ai relevé.*

*À mon frère et mes sœurs, pour les moments partagés, les conseils échangés, et cette complicité qui a toujours su alléger les moments les plus éprouvants.*

*À mon binôme : Amina*

*À mes amis : Zineb, Khaira, Djowhar, Imane, Amel et leila .*

*Et à tous ceux qui, de près ou de loin, ont cru en moi, m'ont soutenu et m'ont encouragé à poursuivre mes rêves. Cette réalisation est autant la vôtre que la mienne.*

*B. Naima*

## Remerciements

« Tout d'abord, nous rendons grâce à Dieu, le Tout-Puissant, de nous avoir permis de mener à bien ce travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre directeur de mémoire, Monsieur BOUZOUINA Mohammed, professeur au département d'Agronomie, faculté des sciences de la nature et de la vie de l'Université Abdelhamid Ben Badis de Mostaganem, pour son encadrement précieux tout au long de ce parcours. Ses conseils avisés, sa disponibilité et son soutien incondicional ont été déterminants dans la réussite de ce projet.

Nous adressons également nos sincères remerciements à M. MAHIOUT Djamel, Dr au département d'Agronomie, faculté des sciences de la nature de l'Université Abdelhamid Ben Badis de Mostaganem, pour sa précieuse contribution et son aide précieuse. Nos plus vifs remerciements, également, pour votre présence dans ce jury et soyez assuré de tous mes respects.

Je remercie également Mme HAMZALahouaria, Dr au département d'Agronomie, faculté des sciences de la nature et de la vie de l'Université Abdelhamid Ibn Badis (Mostaganem), de m'avoir fait l'honneur d'examiner ce travail. Qu'elle trouve ici l'expression de mes respectueuses considérations.

Nous remercions chaleureusement les équipes de la ferme expérimentale de MAZAGRAN pour leur collaboration et leurs efforts soutenus.

Nous exprimons notre reconnaissance aux membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail et pour leurs remarques constructives.

Nous adressons un remerciement tout particulier à nos camarades de classe, notamment LalouttLoukman, Dadi Hassan et Majdoub Leila, pour leur amitié et leur accompagnement.

Enfin, nous remercions chaleureusement toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail. »

## *Résumés*

## **Résumé**

Les champignons endophytes sont utilisés comme une alternative pour stimuler la croissance des plantes sous stress salin. La tolérance du blé dur (Variété Simeto) au stress salin à différentes concentrations de NaCl (0, 50, 100, 150 et 200mM), a été examinée après inoculation de l'endophyte codé AY1S sur les graines. La tolérance des plants de blé âgés de 35 jours, cultivés en pots dans une chambre de culture, a été évaluée en analysant le taux de levée, la croissance, la teneur relative en eau, les pigments photosynthétiques, ainsi que les niveaux de proline et de MDA (malondialdéhyde). Les résultats indiquent que l'augmentation des niveaux de salinité n'a pas d'impact négatif sur la croissance, les caractéristiques physiologiques et biochimiques du blé dur. Les taux de levée, le nombre racinaire et foliaire, les caroténoïdes et le MDA sont comparables à leur homologue témoin. Il en va de même pour la chlorophylle b à fortes concentrations de NaCl (150 et 200mM). Cependant, la hauteur et la surface foliaires ont été affectées négativement. En revanche, cette association symbiotique a montré une augmentation de la chlorophylle a à 200mM et des niveaux remarquables de proline dans les lots de 150 et 200mM de NaCl. Ces résultats révèlent l'intérêt halotolérant montré par AY1S sur l'atténuation des effets délétères du NaCl sur les plants du blé dur.

**Mots clés :** Blé dur, stress salin, Champignon endophyte AY1S, Tolérance, NaCl, Association.

## **Abstract**

Endophytic fungi are used as an alternative to stimulate plant growth under salt stress. The tolerance of durum wheat (variety SIMETO) to salt stress at different NaCl concentrations (0, 50, 100, 150 and 200mM) was studied after inoculation of the endophyte (AY1S) on the seeds. The tolerance of 35-day-old wheat plants, grown in a growth chamber under pots, was assessed by analysing emergence rate, growth, relative water content, photosynthetic pigments, as well as proline and MDA (malondialdehyde) levels. The results indicate that increasing salinity levels has no negative effect on the growth, physiological and biochemical characteristics of durum wheat. Emergence rates, number of roots and leaves, carotenoids and MDA are comparable to the control. The same is true for chlorophyll b at high NaCl concentrations (150 and 200mM). However, leaf height and leaf area were negatively affected. This symbiotic association showed an increase in chlorophyll a at 200mM and remarkable levels of proline at 150 and 200mM NaCl. These results demonstrate the halotolerant effect of AY1S in attenuating the deleterious effects of NaCl on durum wheat plants.

**Key-words:** Durum wheat, salt stress, endophytic fungi AY1S, Tolerance, NaCl, Association.

## الملخص:

تُستخدم الفطريات الداخلية كبديل لتحفيز نمو النبات تحت الإجهاد الملحي. تم فحص قدرة تحمل القمح الصلب (صنف سيميتو) لإجهاد الملح بتركيزات مختلفة من كلوريد الصوديوم (0، 50، 100، 150، و200 مللي متر) بعد تلقيح البذور بالفطر AY1S. تم تقييم قدرة تحمل نباتات القمح البالغة من العمر 35 يوماً المزروعة في أصص في حجرة النمو من خلال تحليل معدل الظهور والنمو والمحتوى المائي النسبي وأصباغ التمثيل الضوئي وكذلك مستويات البرولين و MDA (مالونديالدهيد)، وتشير النتائج إلى أن زيادة مستويات الملوحة ليس لها تأثير سلبي على النمو والخصائص الفسيولوجية والكيميائية الحيوية للقمح الصلب. فمعدلات النشوء، وأعداد الجذور والأوراق، والكاروتينات وال MDA مماثلة لنظيراتها في درجة الملوحة. وينطبق الأمر نفسه على الكلوروفيل (ب) عند تركيزات عالية من كلوريد الصوديوم (150 و200 مللي متر). ومع ذلك، تأثر ارتفاع الأوراق ومساحة الأوراق سلباً. من ناحية أخرى، أظهر هذا الارتباط التكافلي زيادة في الكلوروفيل أ عند تركيز 200 مللي متر ومستويات ملحوظة من البرولين في دفعتي 150 و200 مللي متر من كلوريد الصوديوم. تكشف هذه النتائج عن فائدة تحمل الملوحة التي أظهرها AY1S في تخفيف الآثار الضارة لكلوريد الصوديوم على نباتات القمح القاسي.

**الكلمات المفتاحية:** القمح القاسي، إجهاد الملوحة، فطر AY1S، فطر AY1S، التحمل، كلوريد الصوديوم، الارتباط.

## Liste des abréviations

**PDA:** Potato Dextrose Agar

**RWC:** Relative Water Content

**CCLS :**Coopérative des Céréales et des Légumes Secs

**AC :** Présence de champignon endophyt

**SC :** Absence de champignon endophyt

**MDA :** Malondialdéhyde

**FAO :**L'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture

**TBA :**Acidethiobarbiturique

**TCA :**Acide trichloracétique

**ROS :** ReactiveOxygenSpecies

## Liste des Figures

<b>Figure 1:</b> Carte du monde représentant les pays ayant des problèmes de salinité d'après Negacz.....	6
<b>Figure 2:</b> Schéma histologique d'une coupe longitudinale d'un grain de blé (Bounneche, 2015)...	13
<b>Figure 3:</b> Les différents stades de développement du blé (Ait Slimane et Ait Kaki, 2008). .....	15
<b>Figure 4:</b> Mode de croissance des champignons endophytes dans les tissu des plantes hôtes (Kusari et al., 2012) .....	17
<b>Figure 5:</b> Les classes d'endophytes selon la localisation des tissus colonisées (Andéol, 2016).....	20
<b>Figure 6:</b> Graines de blé dur de la variété SIMETO (photo originale, 2024). .....	25
<b>Figure 7:</b> Champignon endophyte AY1S (Vue macroscopique) photo originale.....	26
<b>Figure 8:</b> Dispositif expérimental de l'essai. Les traitements sont représentés par OmM/SC (Témoin sans AYS1), 0mM/AC (Témoin avec AYS1), 50mM/AC (50mM NaCl+AYS1), 100mM/AC (100mM NaCl+AYS1), 150mM/AC (150mM NaCl+AYS1), 200mM/AC (200mM NaCl+AYS1)	29
<b>Figure 9:</b> Taux de levée (%) des plants de <i>Triticum durum</i> sous l'effet de différentes concentrations de NaCl (0mM/SC, 0mM/AC, 50mM/AC, 100mM/AC, 150mM/AC et 200mM/AC), en présence (AC) et en absence (SC) du champignon endophyte (AY1S). Les valeurs représentent l .....	36
<b>Figure 10:</b> Nombre de racines de <i>Triticum durum</i> sous l'effet de différentes concentrations de NaCl (0mM/SC, 0mM/AC, 50mM/AC, 100mM/AC, 150mM/AC et 200mM/AC), en présence (AC) et en absence (SC) du champignon endophyte (AY1S). Les valeurs représentent les moyennes ±.....	37
<b>Figure 11:</b> Nombre de feuilles de <i>Triticum durum</i> sous l'effet de différentes concentrations de NaCl (0mM/SC, 0mM/AC, 50mM/AC, 100mM/AC, 150mM/AC et 200mM/AC), en présence (AC) et en absence (SC) du champignon endophyte (AY1S). Les valeurs représentent les moyennes.....	38
<b>Figure 12:</b> Longueur des racines de <i>Triticum durum</i> sous l'effet de différentes concentrations de NaCl (0mM/SC, 0mM/AC, 50mM/AC, 100mM/AC, 150mM/AC et 200mM/AC), en présence (AC) et en absence (SC) du champignon endophyte (AY1S). Les valeurs représentent les moyenne.....	39
<b>Figure 13:</b> Hauteur des feuilles de <i>Triticum durum</i> sous l'effet de différentes concentrations de NaCl (0mM/SC, 0mM/AC, 50mM/AC, 100mM/AC, 150mM/AC et 200mM/AC), en présence (AC) et en absence (SC) du champignon endophyte (AY1S). Les valeurs représentent les moyenne.....	40
<b>Figure 14:</b> Surface foliaire de <i>Triticum durum</i> sous l'effet de différentes concentrations de NaCl (0mM/SC, 0mM/AC, 50mM/AC, 100mM/AC, 150mM/AC et 200mM/AC), en présence (AC) et en absence (SC) du champignon endophyte (AY1S). Les valeurs représentent les moyennes ±.....	41
<b>Figure 15:</b> Teneur relative en eau(%) des plants de <i>Triticum durum</i> sous l'effet de différentes concentrations de NaCl (0mM/SC, 0mM/AC, 50mM/AC, 100mM/AC, 150mM/AC et 200mM/AC), en présence (AC) et en absence (SC) du champignon endophyte (AY1S). Les valeurs représen.....	42
<b>Figure 16 :</b> Teneurs en proline ( $\mu\text{g/g}$ MVF) des feuilles de <i>Triticum durum</i> sous l'effet de différentes concentrations de NaCl (0mM/SC, 0mM/AC, 50mM/AC, 100mM/AC, 150mM/AC et	

200mM/AC), en présence (AC) et en absence (SC) du champignon endophyte (AY1S). Les valeurs représentent les moyennes ± écarts types (n=5). a, b, c et bc: les valeurs portant des lettres différentes sont significativement différentes (P<0,05)..... 43

**Figure 17 :** Teneurs en MDA (nmole 10<sup>-4</sup>/g MVF) des feuilles de *Triticum durum* sous l'effet de différentes concentrations de NaCl (0mM/SC, 0mM/AC, 50mM/AC, 100mM/AC, 150mM/AC et 200mM/AC), en présence (AC) et en absence (SC) du champignon endophyte (AY1S). Les valeurs représentent les moyennes ± écarts types (n=5). a: les valeurs sont égales (P<0,05)..... 44

**Figure 18 :** Teneurs en chlorophylle totale (C : mg/g MVF) des feuilles de *Triticum durum* sous l'effet de différentes concentrations de NaCl (0mM/SC, 0mM/AC, 50mM/AC, 100mM/AC, 150mM/AC et 200mM/AC), en présence (AC) et en absence (SC) du champignon endophyte (AY1S). Les valeurs représentent les moyennes ± écarts types (n=5). a, b et c : les valeurs portant des lettres différentes sont significativement différentes (P<0,05)..... 45

**Figure 19:** Teneurs en chlorophylle totale (C : mg/g MVF) des feuilles de *Triticum durum* sous l'effet de différentes concentrations de NaCl (0mM/SC, 0mM/AC, 50mM/AC, 100mM/AC, 150mM/AC et 200mM/AC), en présence (AC) et en absence (SC) du champignon endophyte (AY1S). Les valeurs représentent les moyennes ± écarts types (n=5). a, b et c : les valeurs portant des lettres différentes sont significativement différentes (P<0,05)..... 46

**Figure 20:** Teneurs en chlorophylle totale (C : mg/g MVF) des feuilles de *Triticum durum* sous l'effet de différentes concentrations de NaCl (0mM/SC, 0mM/AC, 50mM/AC, 100mM/AC, 150mM/AC et 200mM/AC), en présence (AC) et en absence (SC) du champignon endophyte (AY1S). Les valeurs représentent les moyennes ± écarts types (n=5). a, b et c : les valeurs portant des lettres différentes sont significativement différentes (P<0,05)..... 47

**Figure 21:** Teneurs en caroténoïdes (D : µg/g MVF) des feuilles de *Triticum durum* sous l'effet de différentes concentrations de NaCl (0mM/SC, 0mM/AC, 50mM/AC, 100mM/AC, 150mM/AC et 200mM/AC), en présence (AC) et en absence (SC) du champignon endophyte (AY1S). Les valeurs représentent les moyennes ± écarts types (n=5). a, b et c : les valeurs portant des lettres différentes sont significativement différentes (P<0,05)..... 48

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1:</b> Classification botanique du blé dur (A.C.I.A, 2006).....	11
--	----

## Table des matières

Dédicace .....	2
Dédicace .....	3
Remerciements .....	4
Résumé .....	6
Abstract.....	6
المخلص.....	7
Liste des abréviations .....	8
Liste des Figures .....	9
Liste des tableaux .....	11
INTRODUCTION .....	1

## SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

### chapitre I : salinité

I.1. Définition de la salinité du sol .....	5
I.2. Définition de la salinisation du sol .....	5
I.3. Répartition des sols salés .....	5
I.3.1. Dans le monde.....	5
I.3.2. En Algérie .....	6
I.4. Effets du stress salin sur la plante.....	7
I.4.1. Effets du stress salin sur la germination.....	7
I.4.2. Effets du stress salin sur la croissance et le développement .....	7
I.4.3. Effets du stress salin sur la photosynthèse .....	7
I.4.4. Effet de la salinité sur l'état hydrique de la plante.....	8
I.5. Adaptation du blé au stress salin .....	8
I.5.1. L'exclusion.....	8
I.5.2. L'ajustement osmotique.....	9

### chapitre II : généralité sur le blé dur

II.1. Origine géographique et génétique du blé dur .....	11
II.2. Classification botanique .....	11
II.3. Importance et production du blé dans le monde et en Algérie .....	12
II.4. Le grain de blé : anatomie et composition .....	12
II.4.1. Les enveloppes (13-15%) .....	12
II.4.2. L'albumen (80-85%) .....	12

II.4.3. Le germe (3%) .....	13
II.5. Le cycle de développement du blé dur .....	13
II 5.1. La période végétative.....	13
II .5.1.1. Stade de germination .....	13
II .5.1.2. Stade levé.....	14
II .5.1.3. Stade tallage.....	14
II .5.2. La période reproductrice.....	14
II .5.2.1. Stade montaison - gonflement: .....	14
II .5.2.2. Stade épiaison - floraison: .....	14
II .5.2.3. Stade de remplissage du grain: .....	14

### **chapitre III : les champignons endophytes**

III.1. Généralité .....	17
III. 2. Diversité des champignons endophytes .....	18
III.3. Mode de transmission et de reproduction : .....	18
III.3.1. La transmission verticale.....	18
III.3.2. La transmission horizontale.....	18
III.4. Classification des champignons endophytes.....	19
III.5. Interaction champignons endophyte-plante .....	20
III.6. Le rôle des champignons endophytes .....	21

## **ETUDE EXPERIMENTALE**

### **chapitre I : matériel et méthodes**

I.1. Conduite de l'essai.....	25
I.2. Matériels .....	25
I.2.1. Matériel végétal.....	25
I.2.2. Matériel fongique .....	25
I.3. Méthodes.....	26
I.3.1. Préparation de l'inoculum (suspension des spores) .....	26
I.3.2. Préparation de la concentration.....	26
I.3.3. Installation de l'essai.....	27
I.3.4. Mesures effectuées .....	29
I.3.5. Paramètres physiologiques.....	30
I.3.6. Paramètres biochimiques .....	30
I.4. Analyses statistiques .....	32

### **chapitre II : résultats et discussions**

II.1. Paramètre morphologiques.....	35
-------------------------------------	----

II.1.1. Taux de levée .....	35
II.1.2. Nombres des racines et des feuilles .....	36
II.1.3. Longueur de la racine principale .....	38
II.1.4. La hauteur des feuilles.....	39
II.1.5. Surface foliaire.....	40
II.2.Paramètre physiologiques.....	41
II.2.1. TRE.....	41
II.3.paramètre biochimique .....	42
II.3.1. proline .....	42
II.3.2. MDA .....	43
II.3.3.Extraction et dosage des pigments Photosynthétiques .....	44
Discussion.....	50
Conclusion et perspective .....	54
Référence bibliographique.....	57

# *Introduction*

### INTRODUCTION

Aujourd'hui, la salinisation est l'un des principaux défis auxquels l'agriculture est confrontée. Selon la FAO (2021), sur la base de 73% des terres cartographiées, la superficie mondiale des sols affectés par le sel couvre 424 millions d'hectares de terres arables (0-30 cm) et 833 millions d'hectares de sous-sol (30-100 cm). Parmi lesquelles, plus d'un cinquième des terres arables et un tiers des terres irriguées sont affectées par une salinité élevée, et plus de la moitié des terres cultivées risquent de devenir improductives d'ici 2050, en raison des niveaux de stress liés à la salinité (Gupta et al., 2019 ; Siddiqui et al., 2022).

Le stress salin est un facteur majeur qui limite la croissance des plantes, en particulier dans les régions arides et semi-arides du monde (Munns et Tester, 2008). En outre, la salinité des sols présente un impact négatif sur la production agricole, entraînant une perte annuelle de plus de 27 milliards de dollars US dans le monde (Jha et al., 2011 ; Latta et al., 2018 ; Pal et al., 2021).

Le blé dur occupe une place prépondérante dans l'alimentation humaine et animale, ainsi que dans l'industrie. Il constitue la principale source de protéines pour de nombreuses populations et joue un rôle crucial dans la sécurité alimentaire mondiale (Oudjani, 2009).

La production mondiale de blé dur était estimée à environ 31,4 millions de tonnes en 2023 (CIC, 2023). En Algérie, le blé est la céréale la plus cultivée, avec 1,6 million d'hectares dédiés à sa production, soit 45% des surfaces céréalieres du pays. Cela permet de générer une production nationale d'environ 2,5 millions de tonnes (ONFAA, 2017).

La demande en blé dur en Algérie est en constante augmentation, stimulée par la croissance démographique et l'évolution des habitudes alimentaires. Les besoins de consommation devraient atteindre 11,2 millions de tonnes en 2024, soit une hausse de 50 000 tonnes par rapport à l'année précédente (USDA, 2024). Pour combler le déficit entre la production nationale et la demande croissante. Pour combler ce déficit, en 2023, le pays a importé 1,5 million de tonnes de blé dur, se classant ainsi au deuxième rang des importateurs mondiaux avec 8% du total (CIC, 2024).

Selon des études récentes sur l'alimentation et l'agriculture mondiales, la production mondiale devrait augmenter de 60 à 110% avant 2050 pour subvenir aux besoins alimentaires de la population. Cependant, le rendement ne peut excéder 24 à 39% de la production sur les surfaces cultivées les plus productives (Schmidhuber and Tubiello, 2007;Edgerton, 2009). Parallèlement à la demande d'accroissement de la production, il est tenu de préserver l'environnement et promouvoir la biodiversité dans les écosystèmes agricoles, principalement en réduisant l'utilisation des pesticides et des intrants. Dans ce contexte, l'utilisation des micro-organismes endophytes d'intérêt pour améliorer les performances des cultures, protéger les plantes hôtes contre divers stress biotiques et abiotiques et réduire les besoins

d'intrants chimiques est devenue une alternative cruciale (Lugtenberg et al., 2016 ; Singh et Trivedi, 2017 ; Llorens et al., 2019).

Face aux problèmes dus à ce phénomène, la création de variétés tolérantes au sel en utilisant les méthodes de la sélection habituelle ou des techniques moléculaires avancées nécessitent un temps assez large et sont, surtout, très coûteuses. De plus, le manque d'eau et les sécheresses prolongées empêchent l'utilisation de méthodes classiques de désalinisation, comme le drainage, dont l'installation et l'entretien sont assez coûteux. Il est donc crucial de trouver des solutions pour atténuer leurs effets néfastes.

La recherche de moyens biologiques, tels que les champignons endophytes, apparaît comme une alternative potentiellement plus efficace, surtout pour les zones semi-arides d'Algérie. Cette approche prometteuse et durable pour la restauration des sols salins (Wang et al., 2021) montre que ces microorganismes peuvent avoir des effets positifs sur la plante hôte, comme l'amélioration de la croissance, de la résistance et de la tolérance aux stress biotiques et abiotiques (Kavroulakis et al., 2007; Rodriguez et al., 2008; Kouadria et al., 2018; Bouzouina et al., 2021), ainsi que de la nutrition minérale végétale (AjarNathYadav, 2022).

Les champignons endophytes, naturellement présents dans les racines des plantes, peuvent jouer un rôle essentiel dans la tolérance au sel et la promotion de la croissance des plantes dans les sols salins. Ils améliorent l'absorption des nutriments et de l'eau par les plantes, tout en augmentant leur résistance au stress osmotique induit. De plus, ces champignons favorisent la structure du sol et stimulent l'activité microbienne, contribuant ainsi à la restauration de la fertilité des sols salinisés (Khan et al., 2018).

Dans ce contexte, notre étude a pour objectif d'évaluer l'effet du champignon endophyte, isolé de l'algue marine *Peyssonnelia coriacea* et désigné sous le code " AY1S", sur la tolérance du blé dur au stress salin. Elle vise également à déterminer la capacité du blé dur (*Triticum durum Desf.*) d'endurer la contrainte saline à travers l'analyse des paramètres morphologiques, physiologiques et biochimiques.

L'étude comporte deux parties : la première, bibliographique, est une synthèse sur les divers aspects de stress salin, les mécanismes de tolérance des plantes, les champignons endophytes et leur rôle dans la protection des plantes contre les stress biotiques et abiotiques, et une brève description de la culture de blé dur, sur laquelle l'étude s'est basée. La deuxième partie est divisée en deux chapitres : le premier présente les caractéristiques du matériel végétal utilisé et les différentes méthodes utilisées pour la réalisation des différents essais ; le deuxième chapitre comprend les résultats parvenus, leur discussion et terminées par une conclusion.

# *Synthèse bibliographique*

# *Chapitre I*

## *Salinité*

## **I.1. Définition de la salinité du sol**

La salinité des sols est considérée comme l'un des défis les plus importants auxquels l'agriculture est confrontée aujourd'hui. Elle affecte directement chaque étape de la croissance et du développement des plantes, la germination des graines et le rendement ((Rasool et al., 2013 ; Negacz et al., 2022).

Le stress salin entrave la germination et le développement des plantules soit en créant une pression osmotique qui empêche l'absorption d'eau, soit par les effets toxiques des ions salins comme  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ , et  $\text{HCO}_3^-$  (Sarkar et Sadhukhan, 2022).

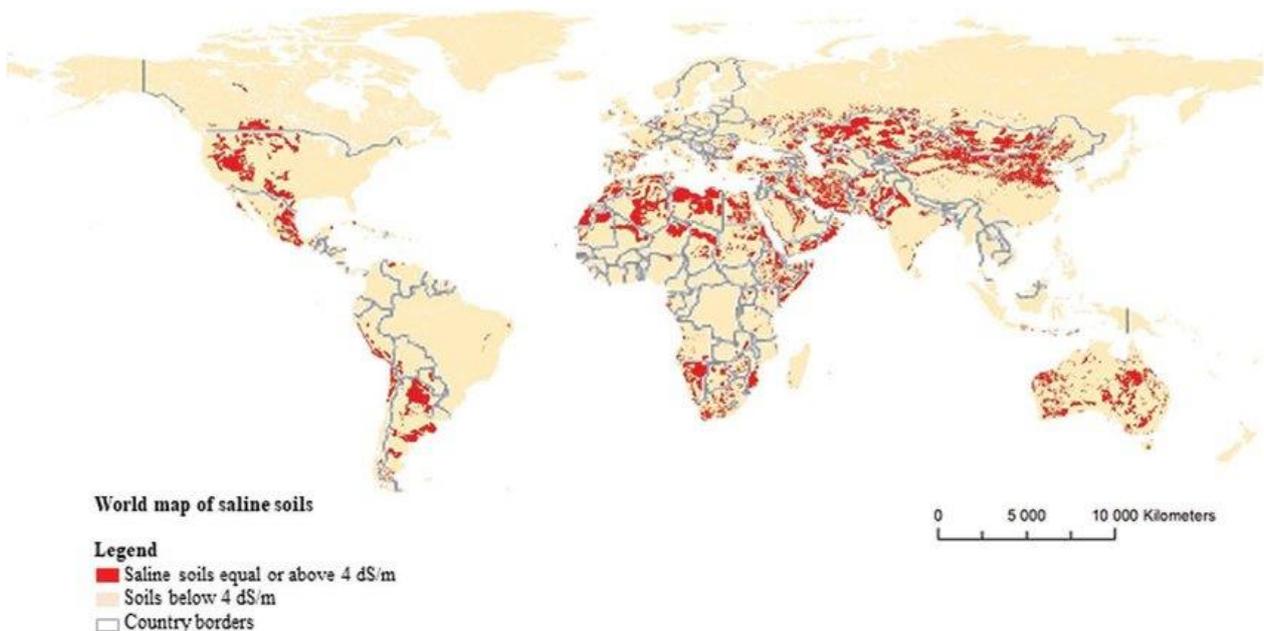
## **I.2. Définition de la salinisation du sol**

Selon Matti et Diatta (2018), la salinisation est un processus naturel de dégradation chimique des sols à l'interface entre «mer (océan) et continent ». Elle conduit à un enrichissement excessif du sol en sels solubles, comme les sels de sodium ( $\text{Na}^+$ ), les sels de calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ), les sels de magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ), les sels de potassium ( $\text{K}^+$ ), les chlorures ( $\text{Cl}^-$ ), les sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) et les bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ). L'accélération de ce processus est due à de multiples causes, tant naturelles (sécheresses fréquentes) qu'humaines (déforestation et mauvaise gestion des terres). Le phénomène de salinisation des terres est responsable d'une diminution annuelle de 1 à 2% des zones irriguées. Les zones les plus touchées sont les régions arides et semi-arides (Escudier et al., 2019).

## **I.3. Répartition des sols salés**

### **I.3.1. Dans le monde**

La salinisation croissante est devenue un problème majeur de dégradation des sols à l'échelle mondiale (Fig. 1). Plus d'un milliard d'hectares de sols souffrent de salinisation (Bartholomeus et al., 2019). Les sols salins se trouvent principalement en Chine, en Inde, au Pakistan, en Iran, en Australie et aux États-Unis (Wang et al., 2021). Les conséquences de la salinité des sols s'étendent aux questions environnementales et sociales, en particulier dans les régions arides et semi-arides. Au niveau mondial, environ 20% des sols irrigués sont salinisés, ce chiffre atteignant plus de 30 % en Égypte, en Iran et en Argentine (Metternicht et al., 2003).



**Figure 1:** Carte du monde représentant les pays ayant des problèmes de salinité d'après Negacz

### I.3.2. En Algérie

Les facteurs contribuant à la prévalence de la salinisation en Algérie sont liés au climat sec qui affecte plus de 95% du pays, à la mauvaise qualité de l'eau d'irrigation, au système de drainage inexistant ou souvent inefficace, et à la façon empirique dont l'irrigation est effectuée. Ces accumulations affectent profondément les propriétés physiques et chimiques du sol, avec pour résultat principal un environnement improductif, voire stérile. Dans les régions arides et semi-arides, en raison des activités naturelles et humaines (Bourizq, 2019), plus de 20% des sols irrigués sont affectés par la salinisation (Daoui et Hartani, 2007). Malheureusement, aucune étude cartographique fiable et précise n'a été réalisée pour identifier les zones affectées par la salinité des terres et mesurer la teneur en sel dans le sol. Cependant, il existe quelques données fragmentaires qui fournissent une idée générale du phénomène de salinisation et de dégradation des terres. Ce phénomène est observé dans les plaines et vallées de l'ouest du pays (Mnea, Chlef, HabraSiq, Moghnia), dans les hautes plaines de l'est (Constantine, Sétif, Bordj Bouaririg, Oum El Bouaghi), autour des plages et des sabkhas (Shatt el Sharqi, Shatt el Gharbi, Shatt el Hadna, Shatt el Hadna, Shatt el Melghar, Shatt el Moulgar, Sabkha de Oran, De Ben Zian, Zamoul, Zahra el Gharbi et El Gharbi, etc.) et dans le grand sud (dans les oasis et le long des oueds, etc.) (INIDDI, 2008).

## **I.4. Effets du stress salin sur la plante**

Le milieu salin provoque de nombreux effets négatifs sur le comportement physiologique de la plante, ce qui est dû au faible potentiel osmotique de la solution du sol (stress osmotique), aux effets des ions spécifiques ( $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$ ), à un déséquilibre nutritionnel ou à une combinaison de ces facteurs (Kausar et al., 2014).

### **I.4.1. Effet du stress salin sur la germination**

Le stade de la germination et les premiers stades de croissance sont cruciaux pour l'établissement des espèces se développant dans des environnements salins. Ce stade germinatif est souvent limité par la salinité du sol et se montre plus sensible par rapport aux autres stades de développements (Ouhaddach, 2016). Une salinité élevée entraîne une inhibition de la germination des graines par osmose ou par toxicité spécifique (Ouhaddach, 2016). Les effets osmotiques se traduisent par l'inaptitude des semences à absorber des quantités suffisantes en eau pour les ramener à leur seuil critique d'hydratation. Ce qui se trouve être nécessaire au déclenchement du processus de germination (Maas et Poss, 1989). Les effets toxiques sont quant à eux liés à une forte accumulation des ions ( $\text{Na}^+$ ) provoquant une perturbation des enzymes impliquées dans la physiologie des semences en germination.

### **I.4.2. Effet du stress salin sur la croissance et le développement**

Chez les céréales, l'effet du stress salin sur la croissance et le développement de la plante se manifeste à partir d'un seuil critique de concentration en sels, et cela dépendra de l'espèce (Brahimi, 2017). En effet, lorsque les ions  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  s'accumulent dans les tissus végétaux, ils affectent l'assimilation des cations essentiels comme  $\text{K}^+$  et  $\text{Ca}^{++}$ . Par conséquent, une concurrence entre le  $\text{Na}^+$  et  $\text{Ca}^{++}$  dans les sites de fixation apoplasmiques s'installe, il en résulte une réduction du taux de croissance et des activités fonctionnelles racinaires. Les conséquences de cet effet se traduisent par une réduction de la biomasse sèche, de la surface foliaire, de la longueur de racines, et un retard de tallage (Brahimi, 2017).

Chez le blé, la diminution de la surface foliaire est considérée comme la principale stratégie pour arriver à la limitation de la disponibilité de l'eau en conditions saline. Effectivement, le stress salin atteint l'activité physiologique de la feuille, et plus précisément la photosynthèse, qui constitue la cause principale de la diminution de la productivité végétale (Benmakhlouf, 2018).

### **I.4.3. Effet du stress salin sur la photosynthèse**

L'effet de sel sur la photosynthèse se manifeste également par la réduction de l'assimilation du  $\text{CO}_2$ , la conductance stomatique, et le ralentissement de l'activité du transport des électrons du photosystème II.

La baisse de l'activité photosynthétique se manifeste par une diminution du taux de chlorophylle et de caroténoïdes dans les feuilles ce qui engendre la chlorose des feuilles âgées qui finissent par tomber pendant une période prolongée de stress salin (Agastian, 2000). Le stress salin peut aussi inhiber la biosynthèse des phytohormones, principalement l'acide gibbérellique et la kinétine qui jouent un rôle important dans la germination des semences. Par contre, l'acide abscissique est stimulé en conditions de stress (Arif, 2015).

### **I.4.4. Effets du stress salin sur l'état hydrique de la plante**

Le plus souvent, le stress salin est causé par de fortes concentrations de  $\text{Na}^+$  et de  $\text{Cl}^-$  dans la solution du sol. Le bilan hydrique de la plante affecte et cause probablement la réduction initiale de la croissance (Yeo, 1998). L'état hydrique de la feuille est perturbé par la présence de fortes concentrations de sels minéraux dans la solution nutritive. De même, les potentiels hydrique et osmotique sont abaissés (Chaves et al., 2009). La diminution des potentiels hydrique et osmotique en présence de sels dans le milieu de culture est observée chez diverses espèces : l'orge (Horie et al., 2011), le blé dur (Ouerghi et al., 2015) et la tomate (Rivero et al., 2014). Le RWC (Relative water content/Teneur relative en eau) est largement utilisé pour évaluer l'état hydrique des plantes. En milieu salin, les plantes absorbent des quantités importantes de sodium et de chlore, mais le transport et l'accumulation de ces éléments dépend du degré de tolérance de l'espèce considérée (Munns et al., 2006). L'augmentation de la teneur de solutés chez les plantes traitées à la salinité provoque une sortie d'eau, un RWC faible sous l'effet de NaCl. Ceci est prouvé dans les mesures de l'état hydrique chez le blé dur où la pression de turgescence demeure inchangée par la salinité mais le RWC diminue significativement (Rampino et al., 2012).

### **I.5. Adaptation du blé au stress salin**

La tolérance à la salinité est un processus complexe, qui peut varier selon les espèces et les variétés. En effet, la plante déclenche des mécanismes de tolérance qui consistent à s'adapter aux stress osmotique, ionique et oxydatif provoqués par la salinité. Ces mécanismes permettent la régulation du déséquilibre nutritionnel, l'élimination ou l'accumulation dans différents organes, tissus, cellules et compartiments cellulaires des sels en excès, et l'ajustement de la pression osmotique interne grâce à l'accumulation de certains solutés organiques ainsi qu'à la mise en action des systèmes antioxydants (Zerroumda, 2012).

#### **I.5.1.L'exclusion**

L'exclusion des ions est un processus physiologique qui permet aux plantes de survivre en conditions de stress salin et d'exclure le sodium du cytoplasme vers l'extérieur de la cellule. Dans ce cas, les plantes limitent l'entrée des éléments salins et les rejettent dans le compartiment apoplasmique (Blumwald et al., 2004 ; Munns 2005). Selon Sen tenac et Berthomieu (2003), la

plante empêche le sel de remonter jusqu'aux feuilles. Une première barrière existe au niveau de l'endoderme couche interne des cellules de la racine. Cependant, cette barrière peut être interrompue, en particulier lors de l'émergence des ramifications de la racine. D'autres mécanismes limitent le passage des sels des racines vers les feuilles mais les gènes qui les gouvernent sont en cor largement inconnus. Le maintien d'une faible concentration de ( $\text{Na}^+$ ) dans les feuilles peut être dû à un mécanisme d'exclusion qui provoque une accumulation de ( $\text{Na}^+$ ) dans les racines, évitant une translocation excessive aux tiges ; mais, il peut être aussi lié à une mobilité élevée de cet élément dans le phloème. L'exclusion n'est, cependant, pas toujours synonyme de tolérance au stress salin. En effet, certains génotypes sensibles au stress salin accumulent fortement moins d'ions  $\text{Na}^+$  dans la tige comparativement aux génotypes tolérants (Zerroumda,2012). L'exclusion du sodium est réalisée par l'action combinée d'une série de protéines de type SOS « salt overly sensitive » qui sont des antiports  $\text{Na}^+ / \text{H}^+$  localisés au niveau de la membrane plasmique (Zhu, 2003).

### **I.5.2. L'ajustement osmotique**

Est considéré comme l'un des mécanismes les plus importants pour s'adapter au stress salin et hydrique. Le stress salin provoque un déficit hydrique chez les plantes, mais elles sont capables de le supporter en ajustant rapidement leur potentiel osmotique avec celui du milieu extérieur, dans le but de maintenir un gradient de potentiel hydrique entre la plante et le milieu salin (Badraoui et Meziani, 2019). Cet ajustement peut être réalisé par une augmentation des concentrations en  $\text{K}^+$  et  $\text{NO}_3^-$ , réponse caractéristique des céréales. Lorsque la plante s'adapte osmotiquement au milieu salin et que sa turgescence est restaurée, le déficit hydrique ne constitue plus un facteur limitant à la croissance sur un milieu salin (Badraoui et Meziani, 2019). Popova et al. (2003) ont montré que sous un stress salin une expression accrue de NADP- isocitrate déshydrogénase spécifique qui est impliquée dans la biosynthèse de la proline. Cette dernière permet le maintien de nombreuses fonctions physiologiques (photosynthèse, transpiration, croissance...) et intervient à tous les stades du développement du végétal (Grennan, 2006 ; Martinez et al., 2007). L'ajustement osmotique peut se faire également par le biais de métabolites, tels que les sucres solubles. Ces composés s'accumulent dans les feuilles selon l'espèce, le stade de développement et le niveau de la salinité (Benmakhlouf, 2018). Si les ions  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  sont accumulés dans les vacuoles de la cellule, les

ions  $\text{K}^+$  et les solutés organiques devraient s'accumuler dans le cytoplasme et les organites pour équilibrer la pression osmotique. Les solutés organiques qui s'accumulent le plus souvent sous stress salin sont la proline et la glycine bêtaïne, bien que d'autres molécules peuvent s'accumuler à des moindres degrés (Hasegawa et al., 2000).

## *Chapitre II*

### *Généralités sur le blé dur*

## II.1. Origine géographique et génétique du blé dur

Le blé connu aujourd'hui, ancêtre du blé dur, occupait déjà le Croissant fertile il y'a 7 000 à 10 000 ans. Cette région, berceau de l'agriculture, s'étend de la Palestine à l'Iran en passant par la Syrie et l'Irak (Fig. 2). Des vestiges de blés diploïdes et tétraploïdes datant du VIIe millénaire avant J.-C. ont été mis au jour sur des sites archéologiques du Proche-Orient (Sadouki et al., 2018).

Le blé dur (*Triticum durum*) s'est ensuite adapté aux climats de type méditerranéen, caractérisés par des hivers doux et des étés secs. C'est ainsi qu'il s'est implanté durablement dans les régions d'Afrique du Nord, du sud de l'Europe et du Moyen-Orient (Hannachi., 2017).

D'un point de vue phylogénétique, le blé dur est issu d'un croisement naturel entre le blé einkorn (*Triticum monococcum*, AA) et l'égilopes peltoïde (*Aegilops speltoides*, BB), suivi d'undédouement chromosomique donnant naissance au blé dur sauvage AABB *Triticum turgidums* sp. dicoccoïdes (ancêtre du blé dur actuel). Ce dernier a ensuite évolué vers *Triticum durum*, le blé dur cultivé (Rebahi, 2007).

## II.2. Classification botanique

Le blé dur (*Triticum durum* Desf), est une monocotylédone de la famille des graminées, dont le fruit est sec et indéhiscant, appelé caryopse, constitué d'une graine et de téguments. De la tribu des Triticées et du genre *Triticum* (A.C.I.A, 2006). Une classification détaillée est illustrée dans le tableau ci-dessous (Tab.1) :

**Tableau 1:** Classification botanique du blé dur (A.C.I.A, 2006)

Embranchement	Angiospermes
Sous embranchement	Spermaphytes
Classe	Monocotylédones
Ordre	Glumiflorales
Super ordre	Comméliniflorales
Famille	Gramineae = Poaceae
Tribu	Triticeae
Sous tribu	Triticinae
Genre	<i>Triticum</i>
Espèce	<i>Triticum durum</i> Desf

### **II.3. Importance et production du blé dans le monde et en Algérie**

De nos jours, la culture du blé dur s'étend bien au-delà du bassin méditerranéen. On le retrouve en Amérique du Nord, en Asie, et même au Canada et en France (Chibani et al ., 2022). Les principaux pays producteurs sont la Chine, l'Inde, les États-Unis, la Russie, le Canada et la France (Siouda et Benkhelifa, 2016).

Le blé est incontestablement la céréale la plus cultivée et la plus consommée à l'échelle mondiale, avec une production annuelle qui avoisine les 757 millions de tonnes (FAO, 2019). En termes de consommation, les pays arabes se distinguent comme les plus gros appétits. En effet, la consommation moyenne journalière par habitant dépasse les 700 grammes au Maroc, tandis qu'elle se situe autour de 600 grammes en Tunisie, en Algérie et en Égypte. En comparaison, la consommation est nettement moins élevée en Inde (400 grammes) et en France (320 grammes) (Abis, 2012).

En Algérie, le blé dur occupe 45% des sols sont réservés à la culture des céréales, soit 1,6 Mha (ONFA, 2017). Selon les données de la Direction des Statistiques Agricoles, de la Surveillance et de l'Information (DSASI), pour la période 2009-2019, la production moyenne de blé s'est établie à 3,04 millions de tonnes sur une superficie cultivée de 1,7 million d'hectares, avec un rendement moyen de 1,73 tonne par hectare. Ces chiffres représentent une amélioration notable par rapport à la décennie précédente (1998-2008), où la production moyenne de blé était de 2,02 millions de tonnes sur une superficie de 1,6 million d'hectares, avec un rendement moyen de 1,21 tonne par hectare.

### **II.4. Le grain de blé : anatomie et composition**

Le grain de blé (Fig. 4), source d'alimentation majeure pour l'humanité, est composé de trois parties distinctes aux propriétés et fonctions spécifiques.

#### **II.4.1. Les enveloppes (13-15%)**

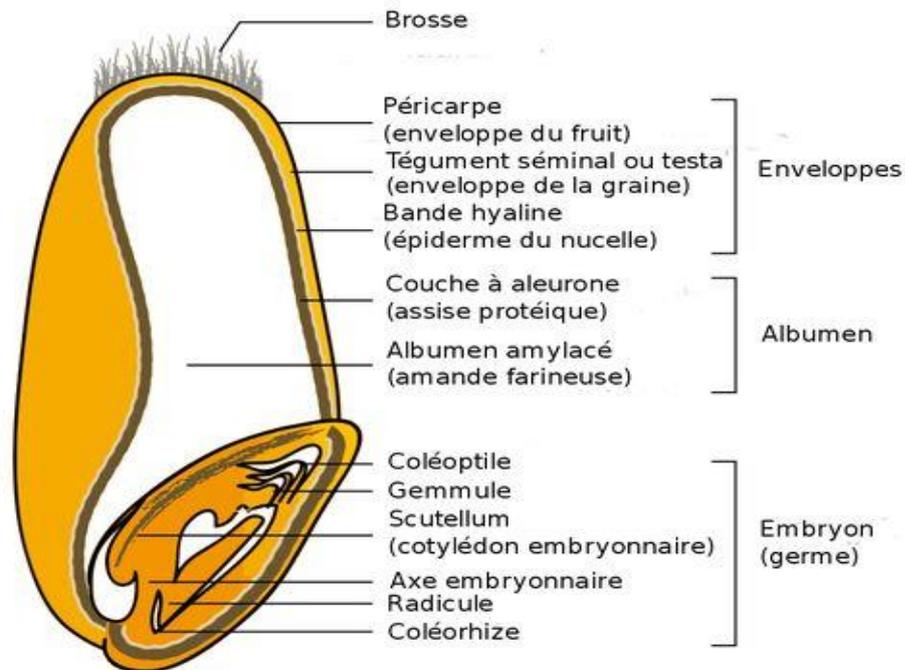
Constituées de cinq couches superposées, les enveloppes protègent le grain et contribuent à sa composition nutritionnelle. Elles sont riches en fibres, en composés phénoliques et en certaines vitamines (Bounneche, 2015).

#### **II.4.2. L'albumen (80-85%)**

Véritable réserve nutritive du grain, l'albumen est constitué de l'albumen amylicé, riche en amidon et en protéines, et de la couche à aleurone, concentrée en protéines et en vitamines (Clerget, 2011). C'est la partie du grain utilisée pour la production de farine.

### II.4.3. Le germe (3%)

Situé à l'extrémité du grain, le germe renferme l'embryon, capable de donner naissance à une nouvelle plante. Il est riche en nutriments essentiels, notamment en vitamines B, en minéraux et en lipides (Feillet, 2000).



**Figure 2:** Schéma histologique d'une coupe longitudinale d'un grain de blé (Bounneche, 2015).

### II.5. Le cycle de développement du blé dur

Le blé dur, comme toutes les plantes, suit un cycle de développement bien défini (Fig. 5) qui se déroule en plusieurs étapes. Ce cycle, peut être divisé en deux grandes périodes : la période végétative et la période reproductrice.

#### II 5.1. La période végétative

##### II .5.1.1. Stade de germination

La germination marque le début du cycle du blé dur. Elle survient lorsque les conditions de températures et d'humidités sont favorables, généralement entre 4 et 37°C. Environ 4 à 6 jours après la germination, la coléoptile, une gaine protectrice, apparaît suivi de la première feuille (Rorat, 2006).

### **II .5.1.2. Stade levé**

Ce stade est atteint lorsque 50% des plantules ont émergé du sol. C'est une étape cruciale car les jeunes plants sont encore fragiles et sensibles aux stress hydriques et thermiques (Karou et al., 1998).

### **II .5.1.3. Stade tallage**

À partir de la troisième feuille, la plante commence à produire des talles, qui sont des tiges secondaires issues de la base de la plante principale. Ce processus se poursuit à un rythme régulier jusqu'à la fin du tallage, marquant la fin de la période végétative et le début de la phase reproductrice (Gates, 1995).

## **II .5.2. La période reproductrice**

### **II .5.2.1. Stade montaison - gonflement:**

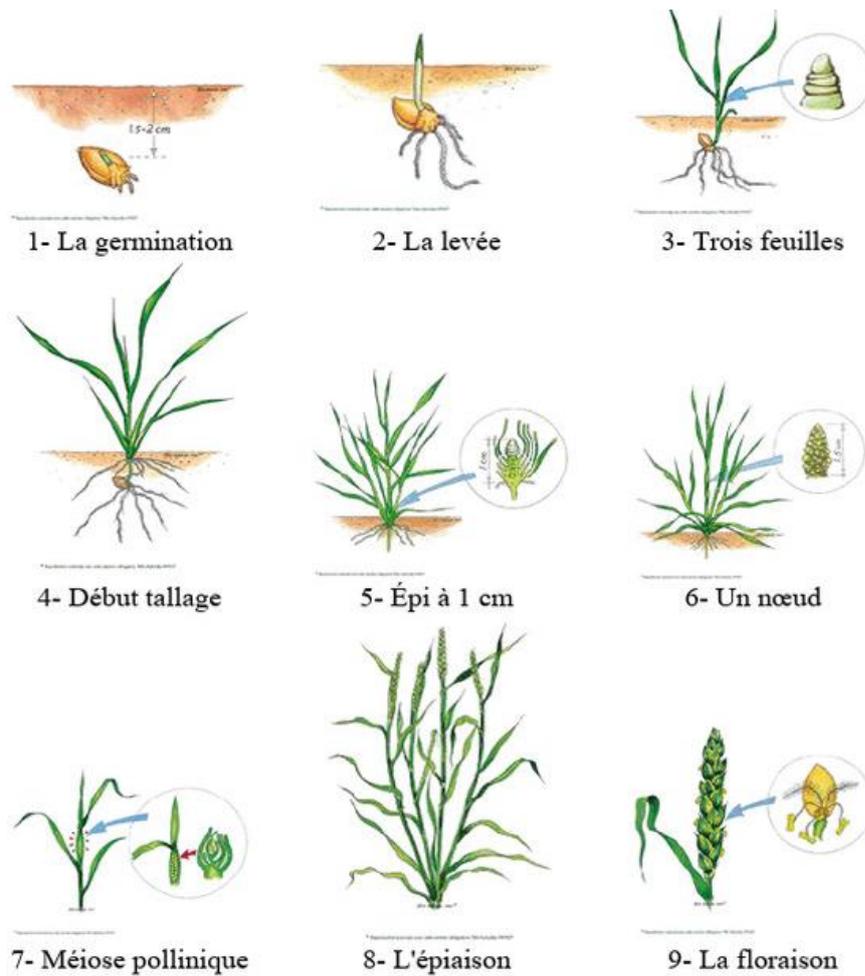
La montaison se caractérise par l'allongement des tiges et la différenciation des fleurs. Certains talles herbacés meurent à ce stade, tandis que d'autres se développent en épis. Les besoins en azote augmentent considérablement pour soutenir cette croissance active (Mazouz, 2006). Ce stade se termine lorsque les épis sont gonflés et visibles hors des gaines.

### **II .5.2.2. Stade épisaison - floraison:**

Les épis émergent complètement des tiges lors de l'épisaison. La floraison suit, durant laquelle les fleurs sont fécondées. Cette période peut durer de 3 à 6 jours selon les conditions climatiques (Rorat, 2006).

### **II .5.2.3. Stade de remplissage du grain:**

Après la fécondation, le grain se développe en trois étapes. La première est une phase de multiplication rapide des cellules, suivie d'une phase de remplissage actif où les sucres produits par la photosynthèse sont transférés dans le grain. La teneur en eau du grain se stabilise ensuite, puis diminue progressivement jusqu'à atteindre son poids sec final (Wardlaw, 2002).



**Figure 3:** Les différents stades de développement du blé (Ait Slimane et Ait Kaki, 2008).

## *Chapitre III*

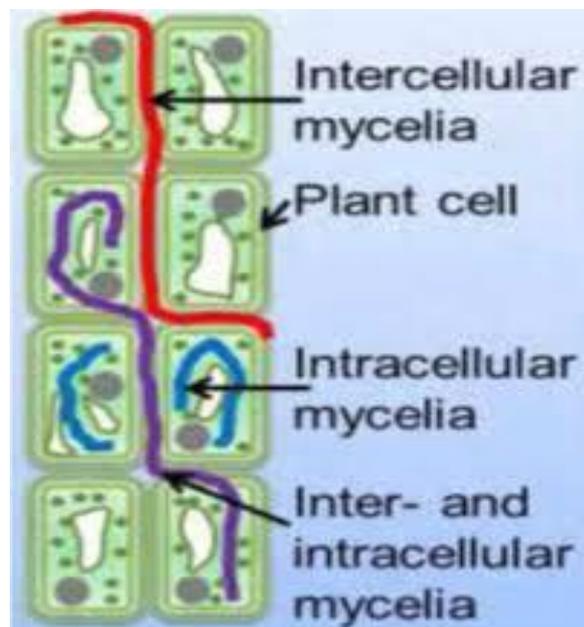
# *Les champignons endophytes*

### III.1. Généralité

Les plantes et les microorganismes présentent un complexe d'habitat écologique très divers (Bacon et White, 2000). Le terme endophyte a été utilisé pour la première fois par Debary en 1866 pour décrire les champignons qui colonisent l'intérieur des tissus des végétaux, des tiges et des feuilles (Wilson, 1995).

D'une manière littérale, le terme « endophyte » signifie "dans la plante" (endon Gr = dans, phyton = plante). L'usage de ce terme est aussi large que sa définition et le spectre des hôtes ainsi que les organismes qui les habitent (ex : Bactéries, champignons...etc.) (Schulz et Boyle, 2006). Les endophytes sont des microorganismes (bactéries et champignons) qui peuvent coloniser et survivre à l'intérieur des tissus d'une plante apparemment saine (Bacon et White, 2000).

Les Champignons endophytes sont majoritairement issus du phylum Ascomycota (Arnold AE, 2007) et présentent une grande diversité. Ils sont hétérotrophes et prélèvent des nutriments à l'hôte sans que celui-ci ne présente de quelconques signes de maladie. Ils peuvent croître dans le milieu intracellulaire ou extracellulaire (Figure 04).



**Figure 4:** Mode de croissance des champignons endophytes dans les tissu des plantes hôtes (Kusari et al., 2012)

Ces microorganismes sont ubiquistes, ils ont été détectés dans pratiquement toutes les espèces de plantes (Saikkonen K. et al., 1998), à tous les latitudes (Arnold AE., 2007). Une même espèce de champignon endophyte est capable de coloniser plusieurs hôtes différents.

### **III. 2.Diversité des champignons endophytes**

La biodiversité des champignons endophytes demeure largement sous-estimée, mais les estimations suggèrent qu'entre 500 000 et 600 000 espèces existent potentiellement (González et Tello, 2011). Bien que plus de 100 taxons endophytes aient été identifiés, environ 465 000 espèces restent encore à définir (Bottella et diez, 2011). Certaines espèces végétales abritent une remarquable diversité d'endophytes (Sun *et al.*, 2011). Cette grande diversité fongique (Lakshman et Kurandawd, 2013), couplée à la capacité des endophytes à produire divers métabolites secondaires bioactifs (Rivera-Orduna *et al.*, 2011) et à promouvoir la croissance et la résistance de leurs hôtes, fait de l'étude des endophytes l'un des domaines les plus importants de la recherche en mycologie (Lakshman et Kurandawd, 2013).

### **III.3.Mode de transmission**

Deux modes de transmission sont observés chez les champignons endophytes: le mode de transmission est le moyen par lequel le champignon endophyte peut coloniser un autre individu végétal à partir de l'hôte initial :

**III.3.1.La transmission verticale** :se fait par la croissance végétative des hyphes qui est complètement interne ; ainsi les hyphes du champignon sont transmis de la plante infectée vers la descendance via les graines. Ceci est communément appelé transmission verticale. Et c'est le principal mode de transmission des champignons endophytes (Saikkonen et al., 2010).

**III.3.2.La transmission horizontale** : Elle se caractérise par la colonisation d'un nouvel hôte n'ayant la plupart du temps pas de lien avec l'hôte primaire. La caractérisation des groupes endophytes est basée surtout sur le groupe végétal infecté, la modalité de l'infection et de la répartition (colonisation) des tissus de l'hôte ainsi que le mode de transmission au sein de la communauté végétale (Bensaci, 2016).

Les endophytes possèdent deux modes de reproduction (la reproduction sexuée et la reproduction asexuée). Etant donné que certains champignons peuvent produire soit des sporessexuées soit asexuées et que la reproduction sexuée nécessite des spores sexuées, elle est donc toujours horizontale, contrairement à la reproduction asexuée qui peut se faire

Verticalement via les graines ou horizontalement par les spores ou éventuellement les hyphes (Saikkonenetal., 2004).

### **III.4.Classification des champignons endophytes**

La classification de ces microorganismes est essentiellement basée sur la colonisation des tissus (figure 05).

- **Endophytes classe 1**

Ils sont constitués par des champignons appartenant à la famille Clavicipitaceae (Ascomycota) constituée actuellement de 37 genres. 4 possèdent des espèces endophytismes : Balansia, Epichloë, Ephelis et Neotyphoduim (Andéol, 2016), ils colonisent principalement les tiges et les rhizomes (Rodriguez et al., 2009).

- **Endophytes classe 2**

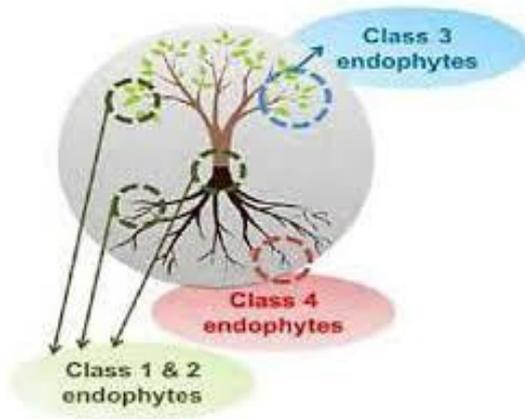
Sont tous issus de la famille Dikarya, ils sont en majorités constitués d'Ascomycota (uniquement de pezizomycotina, mais ils comprennent également quelques représentants des Basidiomycota (Agaricomycotina, Pucciniomycotina) (Andéol, 2016), Ils colonisent principalement les racines (Rodriguez et al., 2009).

- **Endophytes classe 3**

En particulier les Pezizomycota (familles des Sordariomyceta, Dothideomyceta, Pezizomyceta et Eurotiomyceta, on trouve également les Basidiomycota, plus souvent présents dans les tissus ligneux que dans les tissus foliaires, peuvent coloniser en grand nombre les parties aériennes d'une plante (Andéol, 2016), ils colonisent principalement les tiges (Rodriguez et al., 2009).

- **Endophytes classe 4**

Cette classe n'est pas encore clairement établie, ils appartiendraient aux Ascomycota du sous embranchement des Pezizomycotina : en particulier les ordres des Pleosporales, Pezizales et Helotiales. Associés à des arbustes ou arbres et colonisent uniquement les racines des plantes (Andéol, 2016), ils colonisent principalement les racines (Rodriguez et al., 2009).



**Figure 5:** Les classes d'endophytes selon la localisation des tissus colonisés (Andéol, 2016)

### III.5. Interaction champignons endophyte-plante

La réaction plante hôte-endophyte est complexe. En effet, les deux organismes synthétisent des composés qui ne sont pas directement impliqués dans le processus de croissance, il s'agit des métabolites secondaires (Saliba, 2015). Les endophytes possèdent différents modes de vie, donnant différentes interactions qui sont variables d'un endophyte à un autre et d'un hôte à un autre (Zabal gogezcoa, 2008), elles dépendent des facteurs abiotiques, des interactions avec d'autres espèces, de la géographie et de la phylogénie, et varient de l'antagonisme au mutualisme, c'est pour cette raison que la gamme d'interactions endophyte-hôte est considérée comme un continuum (Zabal gogezcoa, 2008).

Les effets de cette interaction peuvent se manifester par une promotion de la croissance, une protection via l'induction de l'ISR (Induced Systemic Resistance) ou une résistance systémique induite et/ou une action antagoniste directe sur les agents pathogènes (He et al., 2009).

N'importe quelle interaction plante-champignon endophyte est précédée par un contact physique entre la plante et le champignon, suivie par plusieurs barrières physiques et chimiques qui doivent être surmontées pour établir une association réussie (Kusari et Spiteller, 2012).

### III.6. Le rôle des champignons endophytes

- **Promotion de la croissance :**

Généralement les communautés de champignons endophytes jouent un rôle bénéfique important dans la physiologie des plantes hôtes. Les mécanismes directs se manifestent lors de la fixation de l'azote atmosphérique, la solubilisation des minéraux telle que le phosphore et la production des régulateurs de croissance tels que les auxines, les gibbérellines, les cytokinines et l'éthylène (Ahmad et al., 2008).

Certains endophytes peuvent stimuler la croissance des plantes en produisant des phytohormones ou en fixant l'azote atmosphérique. Ces effets bénéfiques peuvent avoir des implications importantes pour l'agriculture durable (Afrin et al., 2021).

- **Protection contre les pathogènes**

Les endophytes produisent une variété de métabolites secondaires qui confèrent à la plante une résistance accrue aux maladies causées par des bactéries, des champignons ou des virus. Une étude récente (Wang et al., 2023) a mis en évidence le rôle d'un nouveau composé produit par un endophyte dans la lutte contre un pathogène majeur des céréales. ont la capacité d'utiliser divers mécanismes pour stopper les microorganismes phytopathogènes, certains éléments incluent la fabrication d'antibiotiques, la stimulation des mécanismes de défense de l'organisme, la compétition pour la nourriture ou les sites de colonisation ainsi que les mycoparasites (Cao et al., 2009). Plusieurs extraits liquides provenant des cultures des endophytes ont prouvé leur capacité à entraver la croissance de diverses espèces de champignons phytopathogènes (Kim et al., 2007).

- **Protection contre les insectes**

Certaines espèces de champignons endophytes génèrent des métabolites qui possèdent des propriétés antifongiques et insecticides, ce qui peut contribuer à préserver les plantes des attaques d'insectes. Par exemple, les espèces de champignons *Epichloë* génèrent des alcaloïdes comme la lolitrem B qui possèdent des propriétés anti-insectes (Scharidl et al., 2013).

Les caractéristiques chimiques de la plante peuvent être modifiées par certains champignons endophytes, ce qui peut rendre les plantes hôtes moins attrayantes ou moins digestibles pour les insectes. Prenons l'exemple des champignons endophytes qui ont la capacité d'accroître la quantité de composés phénoliques ou de lignine présents dans les tissus végétaux, ce qui peut dissuader les insectes qui sont à la recherche d'herbes (Pineda et al., 2010).

- **Tolérance au stress**

Les endophytes aident les plantes à mieux résister aux stress environnementaux tels que la sécheresse, la salinité, les températures extrêmes ou la pollution. Ils peuvent améliorer l'absorption des nutriments, réguler la croissance des racines et favoriser la production d'hormones de croissance (Rodriguez et al., 2009).

Les endophytes peuvent aider les plantes à tolérer et supporter les facteurs de stress biotiques et abiotiques (stress hydrique, salin, hautes températures, ...etc.) (Redman et al., 2002).

*Etude expérimentale*

# *Chapitre I*

## *Matériels et méthodes*

## I.1. Conduite de l'essai

Cet essai a été conduit afin de déterminer l'influence du champignon endophyte ‘‘ *AYIS* ‘‘ sur la tolérance au stress salin de blé dur (*Triticum durum Desf*). La réponse comportementale de ce dernier est recherchée sur les plans morphologique, physiologique et biochimique.

L'expérimentation a été réalisée dans des conditions semi contrôlée à l'intérieure de la chambre de culture, au niveau du laboratoire de protection des végétaux, unité culture *in vitro* de l'Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem.

## I.2. Matériels

### I.2.1. Matériel végétal

Le matériel végétal utilisé dans cette étude a été, aimablement, fourni par la Coopérative des Céréales et des Légumes Secs de la ville de Relizane (nord-ouest Algérie). Il s'agit de SIMETO, variété d'origine Italienne.



**Figure 6:** Graines de blé dur de la variété SIMETO (photo originale, 2024).

### I.2.2. Matériel fongique

Dans cette expérience, le champignon employé est un champignon endophyte isolé à partir du thalle de l'algue marine *peyssonnelia coriacea*. Ce champignon fait partie de la collection des endophytes isolés et conservés par le laboratoire ‘‘Protection des végétaux’’ de l'université de Mostaganem.

À partir de la souche mère (Fig7), sous un bec Bunsen, dans une zone stérile et avec respect des conditions recommandées, des fragments de la colonie fongique ont été repiqués dans des boîtes de Pétri contenant le milieu PDA et placées, ensuite, dans un incubateur à 25 °C.

Les colonies de AY1S croissent modérément . Leur texture est poudreuse. De face, la couleur est d'abord blanche et devient chamois avec le temps. La couleur inverse est généralement havane avec un centre brunâtre (fig.07).



*Figure 7: Champignon endophyte AY1S (Vue macroscopique) photo originale*

### **I.3. Méthodes**

#### **I.3.1. Préparation de l'inoculum (suspension des spores)**

Après une semaine d'incubation à l'étuve, la surface de la culture fongique riche en spores a été raclée à l'aide d'une spatule métallique, récupérant ainsi une suspension de spores. Cette suspension a ensuite été filtrée sur un film de mousseline afin d'éliminer les fragments mycéliens. La solution récupérée, contenant uniquement les spores, a été ajustée au volume souhaité avec de l'eau distillée stérile.

#### **I.3.2. Préparation de la concentration**

Pour déterminer la concentration de spores à partir d'une solution, la cellule de Malassez et une lamelle de verre est employée. Un volume de 10 à 15  $\mu\text{l}$  de la suspension de spores a été déposé entre lame et lamelle, puis observé au microscope, où le nombre de spores est compté dans 9 zones quadrillées. Sachant que chaque zone représente un volume de 0,01  $\mu\text{l}$ , la concentration est donc calculée en divisant le nombre total de spores comptés par le volume total observé (0,09  $\mu\text{l}$ ). La concentration initiale de la suspension, étant de  $10^6$  spores/ml, est ensuite ajustée en fonction du facteur de dilution.

**Densité spores/ml** = Nb spores comptées/Nb de rectangles comptés  $100 Fd \times 10^3$

Moyenne du nombre des spores par rectangle.

OÙ :

- $\times 100$  Ce qui revient à diviser par le volume d'un rectangle (0,01  $\mu$ l) ;
- Fd Facteur de dilution éventuel ;
- $\times 10^3$  pour passer des  $\mu$ l aux ml.

Après préparation, la concentration de la solution recherchée a été déterminée. Ensuite, un aliquot de Tween 20 à une concentration de 0,01 % a été ajouté pour faciliter l'adhésion des spores sur les graines de blé lors de leur processus de traitement.

### **I.3.3.Installation de l'essai**

- **Priming**

Des graines de blé dur (SIMETO), indemnes de toutes contaminations visibles ont été désinfectées dans une solution d'hypochlorite de sodium 2% pendant une durée de 30 secondes rincées avec de l'eau distillée stériles à trois reprises, puis laissées séchées à l'air libre.

L'amorçage des semences, une technique simple et ancestrale, vise à améliorer le taux et la rapidité de germination, à obtenir une croissance uniforme et à accroître le rendement dans diverses conditions environnementales. Toutefois, l'efficacité des protocoles d'amorçage varie en fonction de plusieurs facteurs, notamment l'espèce végétale ou le génotype, le potentiel hydrique des agents d'amorçage, la durée du traitement et les conditions environnementales. Essentiellement, l'amorçage est une préparation physiologique des graines, qui active les métabolismes pré-germinatifs par trempage. Il est cependant essentiel d'interrompre le traitement au moment opportun, suivi d'un séchage rapide, pour éviter les problèmes de conservation des semences liés à un traitement prolongé (Rakshit et al 2018).

- **Préparation du sol**

Le sol utilisé dans cette expérimentation est de nature limono-sableuse, prélevé à la ferme expérimentale de l'université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem. Tout d'abord, le sol a

été désinfecté en utilisant la méthode traditionnelle de Bergerac (Rouxel et al.,1991). Celle-ci élimine les germes pathogènes tout en préservant la matière organique. Cette technique consiste à prélever la quantité de terre nécessaire pour l'essai, à la placer dans une plaque métallique au-dessus d'une source de chaleur (feu), puis à l'arroser abondamment tout en la remuant constamment. Ce processus est poursuivi jusqu'à ébullition complète de l'eau.

Enfin, après refroidissement, le sol a été amendé par une quantité de terreau à raison de 50 grammes pour 950 g de sol sec.

- **Salinisation du sol**

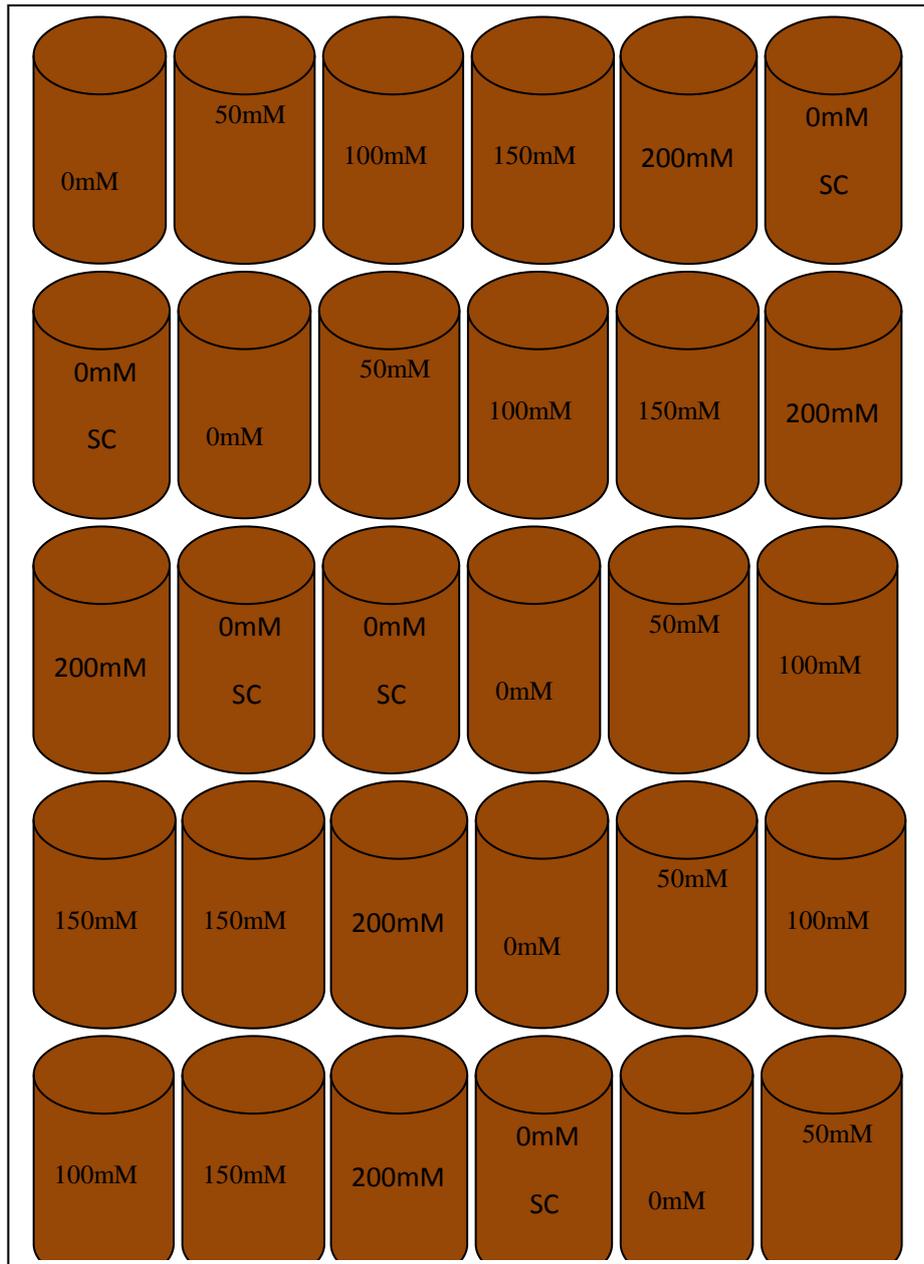
Cette étape consiste à irriguer le sol par des concentrations ascendantes de NaCl (50, 100, 150et 200mM). Ces dernières sont équivalentes à :

50Mm -----	2,925 g./l. (NaCl)
100mM-----	5,85 g./l. (NaCl)
150mM-----	8,775g./l. (NaCl)
200Mm-----	11,7g./l. (NaCl)

Chaque pot a été salinisé avec 450 ml de solution saline ; quantité inférieure à la capacité au champ du sol appliquée. Chaque concentration saline est appliquée avec cinq répétitions.

- **Semi et conduite de l'essai**

Les graines ont été semées dans des pots de 3 kg, contenant 2850 g de sol salé stérilisé et 150 g de matière organique (tourbe stérile). L'essai a été conduit dans une chambre de culture, sous une photopériode de 16/8 h de lumière/obscurité, à une température de  $22\pm 2$  °C. Le plan d'expérience utilisé dans cette étude est à un facteur étudié en randomisation totale avec 5 répétitions pour chacun des traitements (Fig. 08). Le semis a été réalisé à raison de 36 graines par pot, et le sol a été irrigué chaque semaine avec 120 ml d'eau distillée.



**Figure 8:** Dispositif expérimental de l'essai. Les traitements sont représentés par 0mM/SC (Témoin sans AYS1), 0mM/AC (Témoin avec AYS1), 50mM/AC (50mM NaCl+AYS1), 100mM/AC (100mM NaCl+AYS1), 150mM/AC (150mM NaCl+AYS1), 200mM/AC (200mM NaCl+AYS1)

### I.3.4. Mesures effectuées

- **Mesures des paramètres de croissance**

Après 35 jours de culture, les plants de blé ont été soigneusement retirés des pots, les racines ont été rincées à l'eau distillée, puis placées entre des papiers humidifiés pour éliminer toute humidité de surface. Les paramètres morphologiques étudiés sont comme suit :

- 1- Pourcentage de levée
- 2- Longueur des racines
- 3- Nombre des racines
- 4- Hauteur de la tige
- 5- Surface foliaire; La surface des feuilles a été calculée classiquement par le produit des longueurs et largeurs maximales affecté du coefficient 0,75 (Li et al., 2004)

### I.3.5. Paramètres physiologiques

- **Teneur relative en eau**

L'état hydrique de la plante a été évalué en mesurant la teneur relative en eau (TRE). Cette mesure a été effectuée sur l'avant-dernière feuille, bien développée, en utilisant la méthode de Scippa et al. (2004). La feuille a été prélevée à la base du limbe et immédiatement pesée pour obtenir le poids frais (Pf). Ensuite, la partie sectionnée a été immergée dans de l'eau distillée et placée dans l'obscurité à 4°C pendant 24 heures. La feuille a été pesée à nouveau pour obtenir le poids en pleine turgescence (Ppt). La matière sèche (Ps) a été déterminée après passage à l'étuve à 80°C pendant 48 heures. La teneur relative en eau a été calculée selon la formule suivante :

$$\text{TRE} = ( \text{Pf} - \text{Ps} ) / ( \text{P pt} - \text{Ps} ) * 100$$

### I.3.6. Paramètres biochimiques

- **Estimation de la proline**

La proline est l'un des vingt principaux acides aminés qui entrent dans la constitution des protéines. La proline est facilement oxydée par la ninhydrine, c'est sur cette réaction que se base le protocole de mise en évidence de la teneur en proline dans les échantillons foliaires (El Jaafari, 1993). La méthode utilisée pour la quantification de la proline est celle de Bates et al. (1973), avec de légères modifications. La proline pure a été utilisée pour standardiser les échantillons.

Dans des tubes à essai, approximativement 500 milligrammes de feuillage frais ont été homogénéisés dans 10 ml d'acide sulfosalicylique aqueux à 3 % et l'homogénat a été centrifugé à 4000 rpm pendant 10 minutes. Ensuite, deux ml de filtrat ont été mis en réaction avec 2 ml

de ninhydrine acide et 2 ml d'acide acétique glacial pendant 1 heure à 100°C. Enfin, la réaction a été terminée dans un bain de glace. Le mélange réactionnel a été extrait avec quatre millilitres de toluène, agité vigoureusement avec un agitateur de tube à essai pendant 15 à 20 secondes, puis séparé de la phase aqueuse à température ambiante. L'absorbance a été mesurée à 520 nm

en utilisant le toluène comme un blanc. La concentration en proline a été déterminée à partir d'une courbe standard et calculée sur la base du poids frais comme suit :

$$[(\mu\text{g de proline/ml} \times \text{ml de toluène}) / 115,5 \mu\text{g}/\mu\text{mole}]/[(\text{g d'échantillon})/5] = \mu\text{moles de proline/g de matière fraîche.}$$

Réactif. La ninhydrine acide a été préparée en chauffant 1,25 g de ninhydrine dans un mélange de 30 ml d'acide acétique glacial et 20 ml d'acide phosphorique 6 M, sous agitation, jusqu'à dissolution complète. Le réactif, conservé au frais à 4°C, reste stable pendant 24 heures.

- **Quantification du MDA**

La concentration en MDA, sous-produit de la peroxydation lipidique, a été mesurée par la méthode TBA (Thiobarbiturique Acide). L'évaluation du contenu en MDA a été réalisée en suivant le protocole de Madhavrao et Sresthi (2000), modifié. Approximativement 0,5 g d'échantillons frais ont été homogénéisés avec 5 ml d'acide trichloracétique (TCA) à 0,5% (w/v). Ce mélange a été ensuite centrifugé à 3000 rpm pendant 10 minutes. 2 ml du surnageant, qui contient les produits de la peroxydation lipidique, sont prélevés et mélangés à 2 ml de thiobarbiturique acide (TBA) à 0,67%. Ce mélange est ensuite chauffé dans un bain-marie à 100°C pendant 30 minutes. Cette étape permet de dériver les produits de la peroxydation lipidique en MDA. Après refroidissement, le mélange est à nouveau centrifugé à 3000 rpm. L'absorbance du mélange réactionnel a été mesurée successivement à 600 nm et 532 nm à l'aide d'un spectrophotomètre.

Les valeurs de DO600 et DO450 sont soustraites des valeurs du complexe MDA-TBA à 532 nm selon la formule  $6,45 \times (A_{532} - A_{600}) - 0,56 \times A_{450}$  (Zisheng et al., 2011) et la concentration de MDA est calculée en utilisant la loi de Lambert-Beer avec un coefficient d'extinction  $\epsilon_M = 155 \text{ mM}^{-1}\text{cm}^{-1} \cdot \text{nmol/g FW}$   $A = \epsilon l C$

- **Mesure de la teneur en chlorophylle (Chlorophylle a et b) et caroténoïdes**

L'extraction des chlorophylles et des caroténoïdes a été réalisée à partir de 0,2 g d'échantillons de feuilles finement hachées et placées dans des tubes à essai contenant 10 ml de mélange éthanol-acétone (80/20, v/v). Ensuite, les tubes ont été mis sous agitation orbitale à une vitesse de 120 xxx pendant 24h à l'obscurité, jusqu'à ce que la couleur verte soit complètement retirée du tissu (Pompelli et al., 2012). Les mesures au spectrophotomètre ont été effectuées à des absorbances de 663, 645 et 460 nm. Les teneurs en pigments ont été déterminées en respectant les formules suivantes.

$$\text{Chlorophylle a (mg/g)} = [(12,7 \times A_{663}) - (2,69 \times A_{645}) \times V] / (1000 \times W)$$

$$\text{Chlorophylle b (mg/g)} = [(22,9 \times A_{645}) - (4,68 \times A_{663}) \times V] / (1000 \times W)$$

$$\text{Chlorophylle totale (mg/g)} = [(20,2 \times A_{645}) + (8,02 \times A_{663}) \times V] / (1000 \times W)$$

$$\text{Caroténoïdes (mg/g)} = [((100 \times A_{460}) - (3,27 \times (\text{Chla}) - 104 \times (\text{Chlb}))/229 \times V] / (1000 \times W).$$

#### **I.4. Analyses statistiques**

Les données des traitements ont été examinées par l'analyse de la variance (ANOVA). Les résultats sont présentés en moyennes  $\pm$  écarts types. Le test de Student - Neuman - Keuls est utilisé pour comparer ces moyennes, lorsque l'ANOVA montre une signification.  $P \leq 0,05$  indique un effet significatif.

## *Chapitre II*

### *Résultats et discussion*

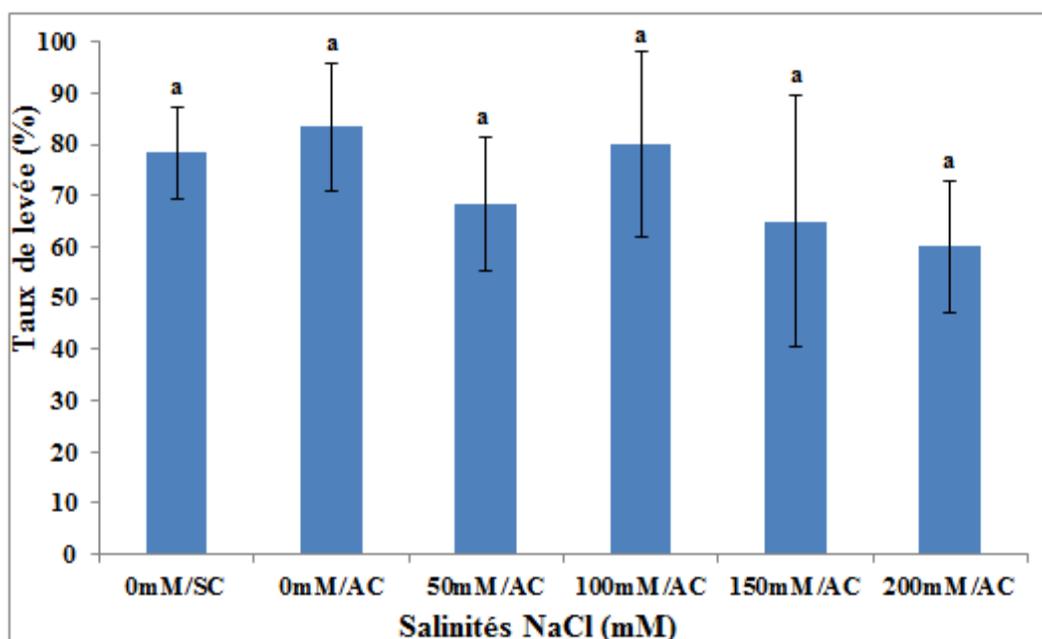
# *Résultats*

Pour évaluer l'impact de l'application du champignon endophyte AY1S sur l'atténuation des effets délétères du stress salin chez des plants de blé dur âgés de 35 jours après semis, les changements observés au niveau des caractéristiques morphologiques, physiologiques et biochimiques ont été étudiés.

### **II.1. Paramètre morphologiques**

#### **II.1.1. Taux de levée**

Aucune influence significative de l'augmentation progressive du NaCl sur le taux de levée des graines de blé n'a été mise en évidence, comme l'indiquent les valeurs  $F=1,562$  et  $P>0,05$ . Cela montre que les résultats des différents lots de l'expérience sont similaires. Ce qui souligne l'importance du champignon endophyte étudié dans l'accélération de la germination et la croissance des épi cotyles dans les lots exposés à la salinité, contrairement au lot témoin sans champignon. Les données présentées dans l'histogramme (Fig.09) indiquent que ce champignon a fait preuve d'une grande tolérance à la salinité et n'est plus affecté par les différentes concentrations de sel testées, du moins en termes de taux de levée. L'atténuation de l'effet négatif du sel est observée avec des taux de levée de  $78,33\pm 8,96\%$ ,  $83,33\pm 12,42\%$ ,  $68,33\pm 12,91\%$ ,  $80,00\pm 18,09\%$ ,  $65,00\pm 24,47\%$  et  $60,00\pm 12,91\%$  pour les concentrations de NaCl de 0, 50, 100, 150 et 200mM, respectivement.



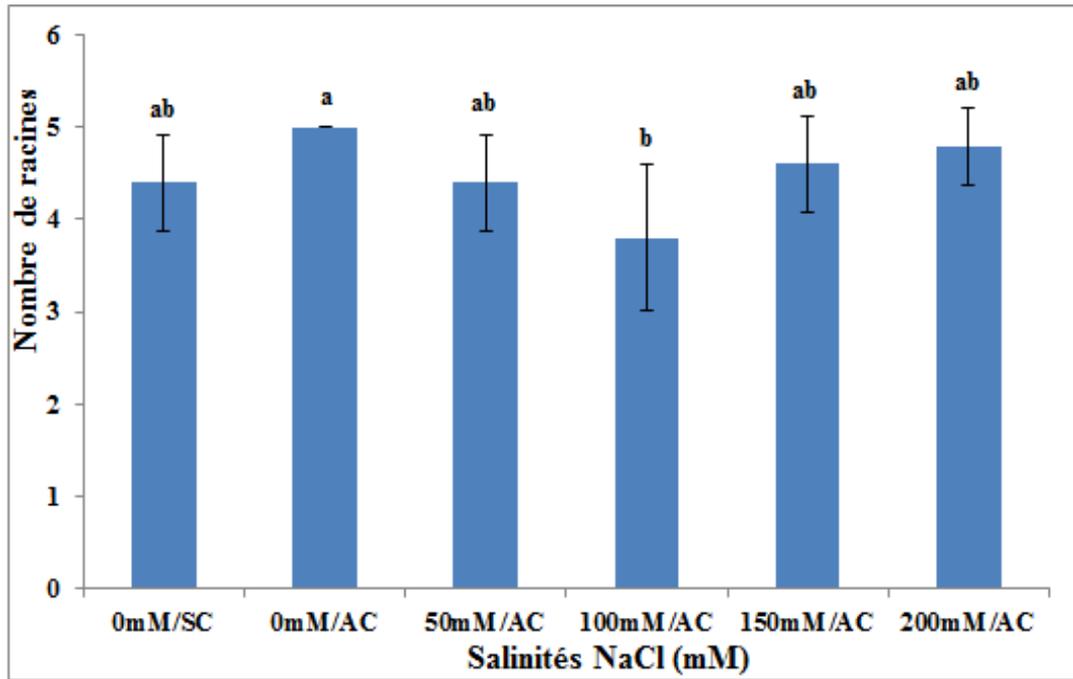
**Figure 9:** Taux de levée (%) des plants de *Triticum durum* sous l'effet de différentes concentrations de NaCl (0mM/SC, 0mM/AC, 50mM/AC, 100mM/AC, 150mM/AC et 200mM/AC), en présence (AC) et en absence (SC) du champignon endophyte (AY15). Les valeurs représentent l'moyenne + écarts types (n=5). A : les valeurs sont significativement égales ( $P > 0,05$ ).

## II.1.2. Nombres des racines et des feuilles

- **Nombre de racines**

L'analyse des résultats obtenus révèle un effet significatif de l'activité du champignon sur le nombre de racines de blé dur exposé à différentes concentrations salines (NaCl), avec  $F=2,867$  et  $P=0,03606$ .

En se référant à la figure 10, le nombre le plus élevé de racines est observé dans le lot non salé en présence du champignon (0mM/AC), avec 5 racines. Ce nombre diminue progressivement dans les lots 0mM/SC, 50mM/AC, 150mM/AC et 200mM/AC, affichant respectivement des valeurs de l'ordre de  $4,40 \pm 0,52$ ,  $4,40 \pm 0,52$ ,  $4,60 \pm 0,52$  et  $4,80 \pm 0,42$ . Alors que le nombre de racines le plus faible est enregistré dans le lot 100mM/AC, avec seulement  $3,80 \pm 0,79$ .



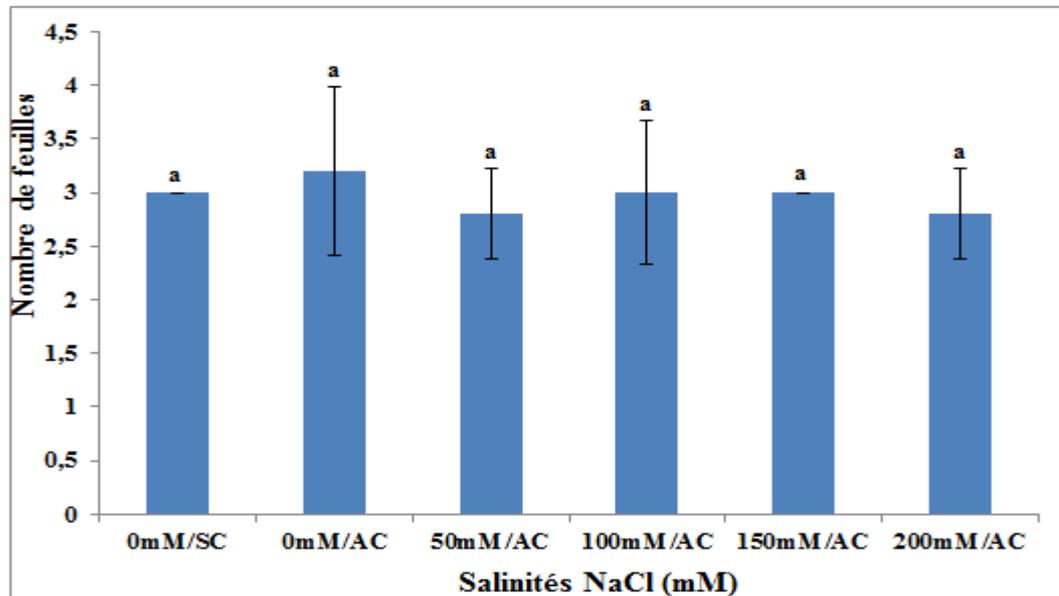
**Figure 10:** Nombre de racines de *Triticum durum* sous l'effet de différentes concentrations de NaCl (0mM/SC, 0mM/AC, 50mM/AC, 100mM/AC, 150mM/AC et 200mM/AC), en présence (AC) et en absence (SC) du champignon endophyte (AY1S). Les valeurs représentent les moyennes  $\pm$  écarts types ( $n=5$ ). A, b et ab : les valeurs portant des lettres différentes sont significativement différentes ( $P<0,05$ ).

- **Nombre de feuilles**

Comme précédemment, l'effet bénéfique du champignon endophyte AY1s se manifeste également dans les résultats relatifs au nombre de feuilles. Cependant, l'analyse de la variance n'a pas mis en évidence de différences significatives entre les différents lots de l'essai ( $F=0,425$  et  $P=0,82772$ ).

Malgré les différentes concentrations de NaCl appliquées (0mM/SC, 0mM/AC, 50mM/AC, 100mM/AC, 150mM/AC et 200mM/AC), le nombre moyen de feuilles par plante est resté globalement stable, indiquant que, dans les conditions expérimentales de cette étude, les niveaux de salinité utilisés n'ont pas eu d'effet notable sur la production de nouvelles feuilles chez le blé dur.

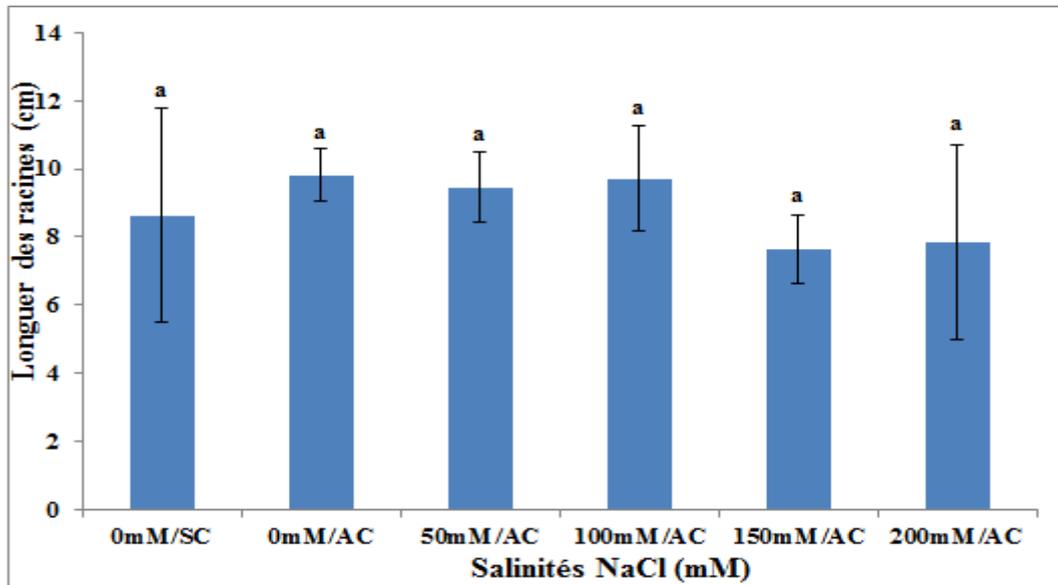
Les données obtenues (Fig11) se résument ainsi à  $03,00 \pm 0,00$  (0mM/SC) -  $03,2 \pm 0,79$  (0mM/AC) -  $02,8 \pm 0,42$  (50mM/AC) -  $03 \pm 0,67$  (100mM/AC) -  $03 \pm 0,00$  (150mM/AC) et  $02,8 \pm 0,42$  (200mM/AC).



**Figure 11:** Nombre de feuilles de *Triticum durum* sous l'effet de différentes concentrations de NaCl (0mM/SC, 0mM/AC, 50mM/AC, 100mM/AC, 150mM/AC et 200mM/AC), en présence (AC) et en absence (SC) du champignon endophyte (AY1S). Les valeurs représentent les moyennes écarts types ( $n=5$ ). a : les valeurs sont significativement égales ( $P < 0,05$ ).

### II .1.3. Longueur de la racine principale

La longueur des racinaires de blé dur a été mesurée après 35 jours d'expérimentation. Le traitement des données par l'analyse de la variance montre que le facteur salinité en présence et en absence du champignon endophyte ne semblent être à l'origine d'aucune variation significative de la longueur racinaire ( $F=1,366$  et  $P=0,27138$ ). La comparaison des moyennes obtenues pour les lots inoculés au champignon AY1s par rapport au témoin non salé et non inoculé montrent des valeurs similaires, confirmant ainsi l'effet probant de ce champignon dans l'élongation des racines de blé dur. La représentation graphique (Fig. 12) résume les valeurs suivantes :  $8,64 \pm 3,14$  cm (0mM/SC),  $9,83 \pm 0,79$  cm (0mM/AC),  $9,46 \pm 1,01$  cm (50mM/AC),  $9,72 \pm 1,55$  cm (100mM/AC),  $7,64 \pm 1,01$  cm (150mM/AC) et  $7,84 \pm 2,85$  cm (200mM/AC).



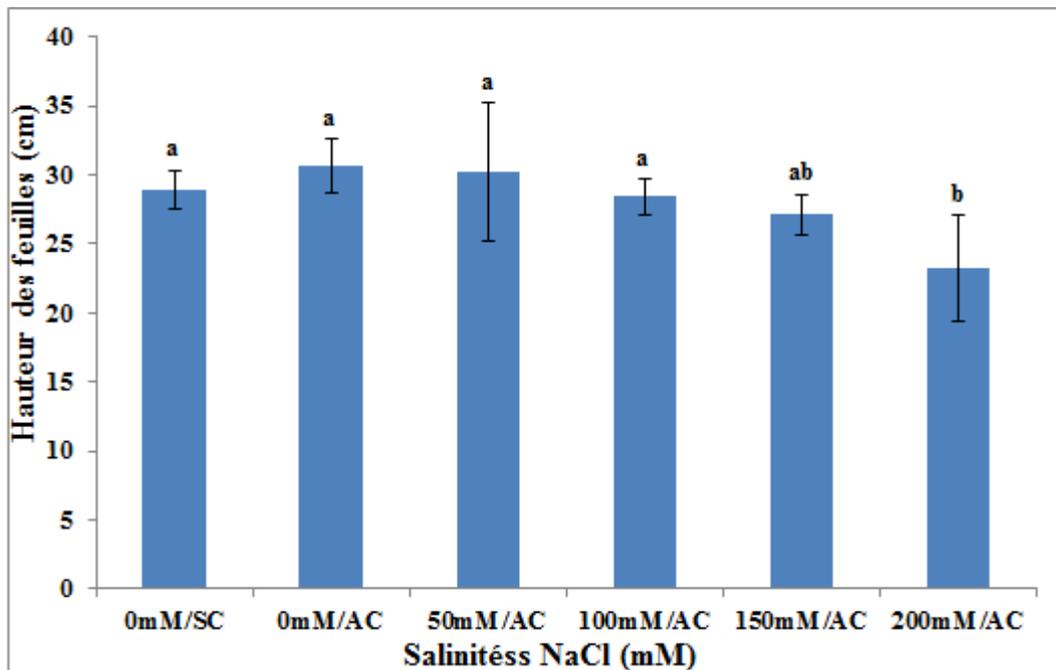
**Figure 12:** Longueur des racines de *Triticum durum* sous l'effet de différentes concentrations de NaCl (0mM/SC, 0mM/AC, 50mM/AC, 100mM/AC, 150mM/AC et 200mM/AC), en présence (AC) et en absence (SC) du champignon endophyte (AY15). Les valeurs représentent les moyenne  $\pm$  écarts types ( $n = 5$ ) a les valeurs sont égales ( $P < 0, 5$ )

#### II .1.4. La hauteur des feuilles

Contrairement aux paramètres précédents, le champignon endophyte n'a pas prouvé sa capacité sur l'élongation des feuilles. L'effet significatif du facteur salinité a été montré par l'étude statistique ( $F=3,799$  et  $P=0,01127$ ) et par conséquent a mis en évidence une influence notable sur la hauteur des feuilles de blé dur.

Dans cette étude, deux plages de concentrations ont été différenciées (Fig. 13). La première correspond à une salinité faible à modérée (0, 50 et 100mM), tandis que la deuxième représente une salinité relativement élevée (150 – 200mM).

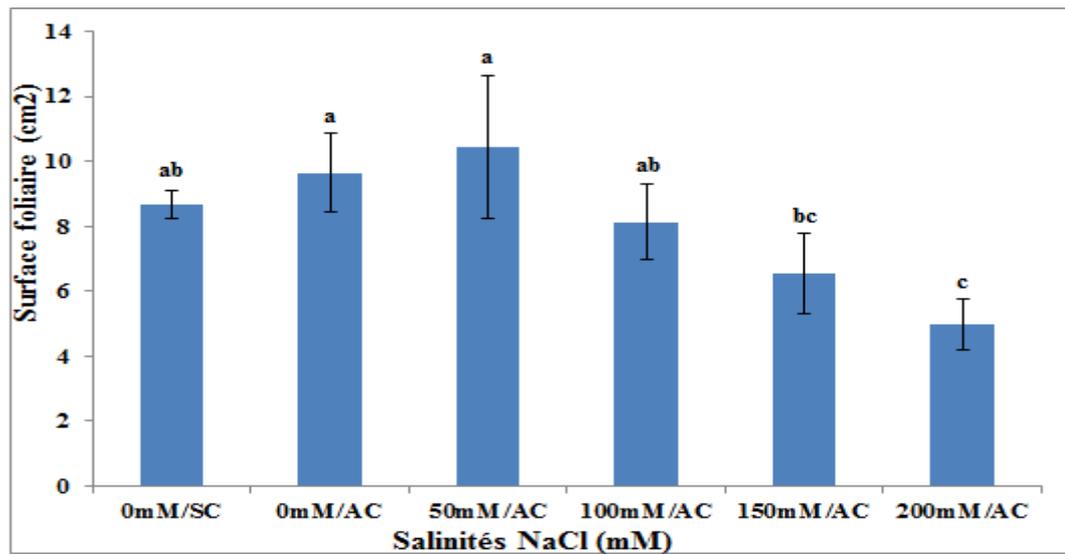
Dans la première gamme, tous les lots se sont montrés similaires en termes de hauteur des feuilles, variant entre  $28,92 \pm 1,40$  (0mM/SC),  $30,62 \pm 1,98$  (0mM/AC),  $30,20 \pm 5,03$  (50mM/AC) et  $28,42 \pm 1,35$  cm (100mM/AC). En revanche, dans la deuxième gamme, une diminution progressive de la hauteur des feuilles a été observée avec l'augmentation de la salinité :  $27,12 \pm 1,41$  (150mM/AC) et  $23,30 \pm 3,85$  cm (200mM/AC).



**Figure 13:** Hauteur des feuilles de *Triticum durum* sous l'effet de différentes concentrations de NaCl (0mM/SC, 0mM/AC, 50mM/AC, 100mM/AC, 150mM/AC et 200mM/AC), en présence (AC) et en absence (SC) du champignon endophyte (AY1S). Les valeurs représentent les moyennes  $\pm$  écarts types ( $n=5$ ). A, b et ab : les valeurs portant des lettres différentes sont significativement différentes ( $P<0,05$ ).

### II .1.5. Surface foliaire

Comme pour la hauteur des feuilles, le champignon AY1s ne semble pas atténuer les effets néfastes du NaCl sur la surface foliaire. L'analyse de la variance révèle que la salinité, en présence ou en absence du champignon endophyte, entraîne une variation significative de la surface foliaire ( $F=10,827$  et  $P=0,00002$ ). La surface foliaire varie de manière corrélée à la concentration en sel appliquée. Les plus grandes surfaces ont été observées dans les lots inoculés avec le champignon à faibles concentrations de sel : 0mM/AC ( $9,65 \pm 1,20$  cm<sup>2</sup>) et 50mM/AC ( $10,42 \pm 2,21$  cm<sup>2</sup>), suivis par le lot témoin sans champignon ( $8,68 \pm 0,42$  cm<sup>2</sup>) et le lot traité à 100mM/AC ( $8,13 \pm 1,17$  cm<sup>2</sup>). Au-delà de cette concentration, la surface foliaire diminue progressivement, atteignant un minimum de  $4,98 \pm 0,80$  cm<sup>2</sup> pour le lot 200mM/AC.

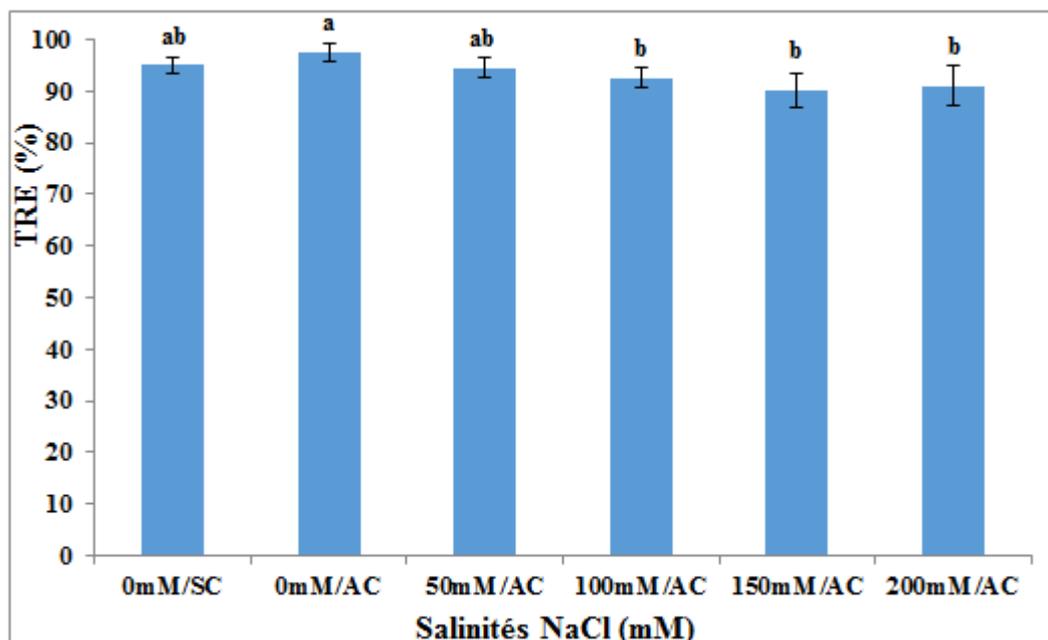


**Figure 14:** Surface foliaire de *Triticum durum* sous l'effet de différentes concentrations de NaCl (0mM/SC, 0mM/AC, 50mM/AC, 100mM/AC, 150mM/AC et 200mM/AC), en présence (AC) et en absence (SC) du champignon endophyte (AY15). Les valeurs représentent les moyennes  $\pm$  écarts types ( $n = 5$ ) a, ab, bc et c : les valeurs portant des lettres différentes sont significativement différentes ( $P < 0, 5$ )

## II.2. Paramètres physiologiques

### II.2.1. TRE

L'analyse par l'ANOVA ( $F=5,163$  et  $P=0,00234$ ) et comparaison des moyennes par le test de Newman-Keuls des résultats de la teneur relative en eau montre une différence significative entre les teneurs relatives en eau du blé dur exposé à différentes concentrations salines (NaCl). Cela met en évidence l'importance de l'endophyte étudié dans la rétention d'eau. En effet, la teneur est significativement supérieure dans les feuilles du lot non salé en présence du champignon ( $97,625 \pm 1,694$ ), comparativement au lot témoin sans champignon ( $95,07 \pm 1,481$ ). Alors que cette dernière est par ailleurs comparable à celle obtenue dans l'essai 50mM/AC ( $94,602 \pm 2,006$ ). Contrairement, les données notées dans les lots 100, 150 et 200mM avec champignon semblent être légèrement inférieures ( $92,687 \pm 2,049$ ,  $90,166 \pm 3,389$  et  $90,96 \pm 3,896\%$ , respectivement). Quel que soit la valeur obtenue, l'état cellulaire paraît rester turgescent.

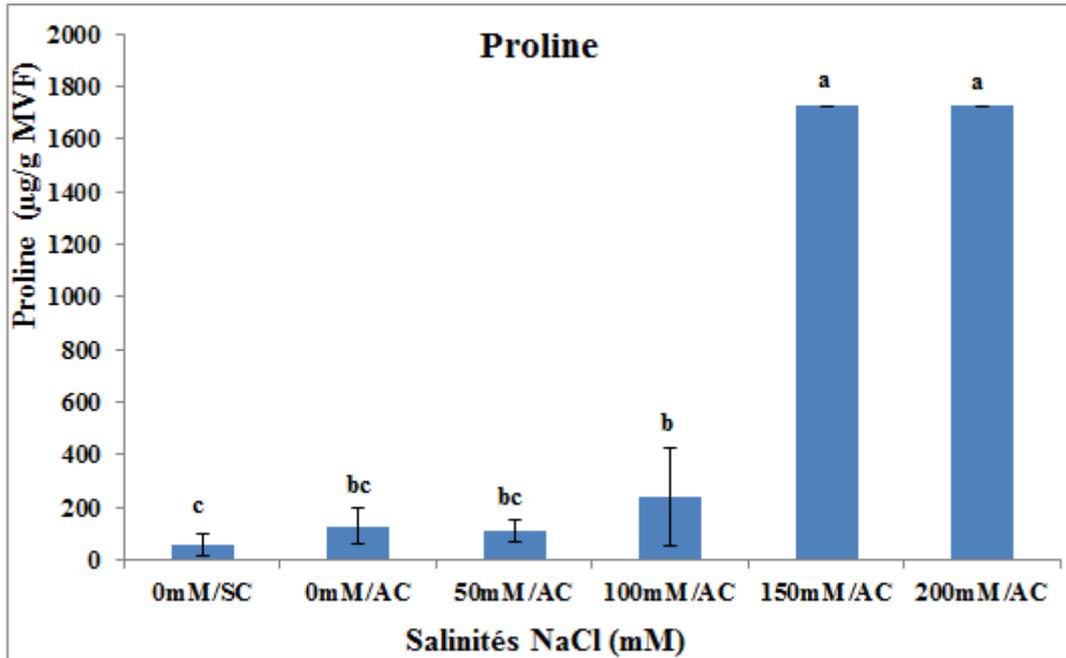


**Figure 15:** Teneur relative en eau(%) des plants de *Triticum durum* sous l'effet de différentes concentrations de NaCl (0mM/SC, 0mM/AC, 50mM/AC, 100mM/AC, 150mM/AC et 200mM/AC), en présence (AC) et en absence (SC) du champignon endophyte (AY1S). Les valeurs représen les moyennes  $\pm$  écarts types ( $n=5$ ). A, b et ab : les valeurs sont significativement différentes ( $P<0,05$ ).

## II.3.paramètre biochimique

### II.3.1. proline

D'après les résultats représentés dans la figure 18, les feuilles de blé cultivées dans des conditions ascendantes de salinité montrent des réponses distinctes en termes de biosynthèse de la proline. Une différence significative a été observée entre les différents lots de l'expérience ( $F=415,995$ ;  $P=0$ ). Les valeurs les plus faibles de proline ont été enregistrées dans les feuilles du groupe témoin, sans champignon(0mM/SC), avec  $56,457\pm 42,459\mu\text{g/g}$  MVF. Ensuite, les essais avec champignon à 0 et 50mM ont montré des concentrations de  $111,710\pm 42,341$  et  $239,817\pm 188,154\mu\text{g/g}$  MVF, respectivement. Une légère augmentation a été observée dans le lot à 100mM/AC, atteignant également  $239,817\pm 188,154\mu\text{g/g}$  MVF. Toutefois, une accumulation marquée de proline a été observée dans les sols fortement salinisés (150 et 200mM), avec des valeurs maximales de  $1726,217\pm 2,056$  et  $1726,504\pm 0,406\mu\text{g/g}$  MVF.



**Figure 16 :** Teneurs en proline ( $\mu\text{g/g}$  MVF) des feuilles de *Triticum durum* sous l'effet de différentes concentrations de NaCl (0mM/SC, 0mM/AC, 50mM/AC, 100mM/AC, 150mM/AC et 200mM/AC), en présence (AC) et en absence (SC) du champignon endophyte (AY1S). Les valeurs représentent les moyennes  $\pm$  écarts types ( $n=5$ ). a, b, c et bc: les valeurs portant des lettres différentes sont significativement différentes ( $P<0,05$ ).

### II.3.2. MDA

Les données des niveaux de MDA dans les feuilles de blé dur inoculé par le champignon endophyte AY1s, sous différentes conditions de salinité, sont présentées dans la figure 19. L'analyse statistique de la variance montre une égalité des moyennes calculées ( $F=1,169$  ;  $P=0,37933$ ). Les concentrations de NaCl appliquées ne semblent pas influencer ces niveaux, ce qui suggère une absence de stress oxydatif dû à la salinité. Cette constance met en lumière l'importance potentielle du champignon endophyte dans la protection contre la peroxydation des constituants membranaires des cellules. Les taux de MDA sont comme suit :  $21,973 \pm 3,377$  (0mM/SC) -  $18,351 \pm 2,752$  (0mM/AC) -  $19,478 \pm 4,546$  (50mM/AC) -  $16,655 \pm 6,007$  (100mM/AC) -  $15,565 \pm 3,618$  (150mM/AC) et  $22,426 \pm 2,454 \text{ nmole } 10^{-4} / \text{g MVF}$  (200mM/AC).

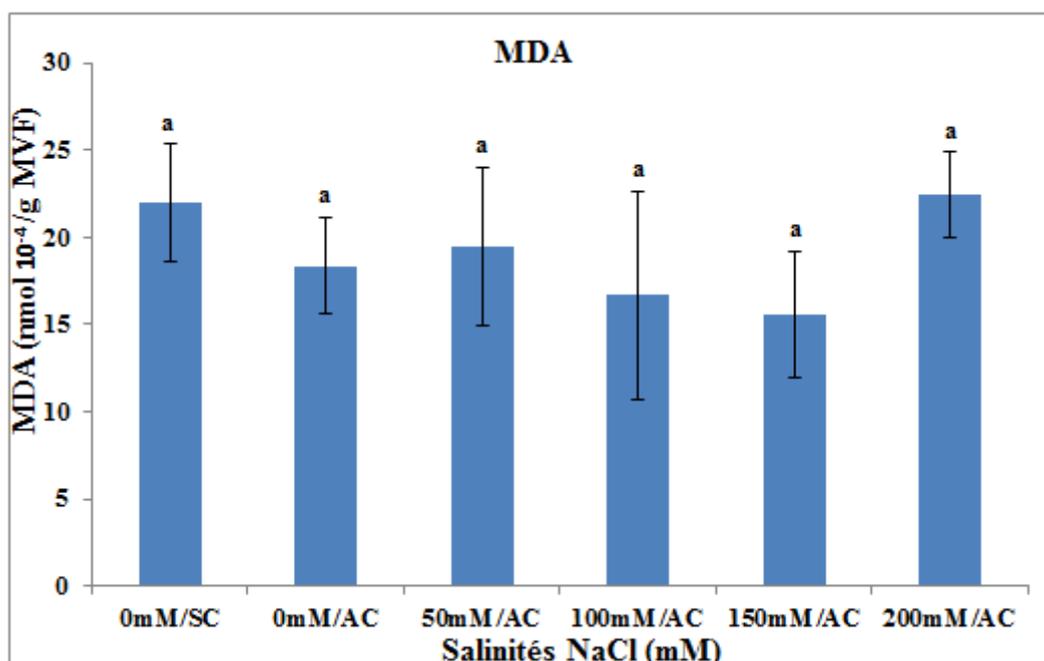
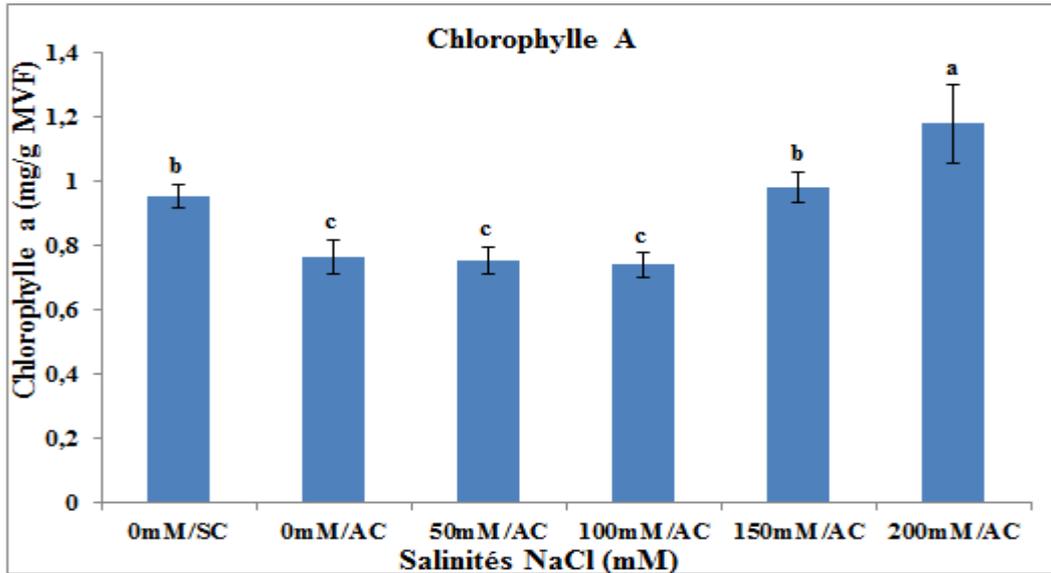


Figure 17 : Teneurs en MDA (nmole 10<sup>-4</sup>/g MVF) des feuilles de *Triticum durum* sous l'effet de différentes concentrations de NaCl (0mM/SC, 0mM/AC, 50mM/AC, 100mM/AC, 150mM/AC et 200mM/AC), en présence (AC) et en absence (SC) du champignon endophyte (AY1S). Les valeurs représentent les moyennes ± écarts types (n=5). a: les valeurs sont égales (P<0,05).

### II.3.3.Extraction et dosage des pigments Photosynthétiques

- .Chlorophylle (a)

La teneur en chlorophylle a est affectée par les variations de salinité, ce qui semble être avantageux en présence du champignon endophyte. Les résultats obtenus sur le blé dur cultivé sur un sol à conductivité de 0mM, sans endophyte, et à des conductivités croissantes (0-200 mM) en présence de AY1s (Fig.18 ) montrent clairement la tolérance de ce champignon endophyte au NaCl. En l'absence de champignon (0 mM/SC), la teneur en chlorophylle a atteint 0,952±0,035 mg/g, une valeur significativement plus élevée (F = 18,299 et P = 0,00004) que celle des lots non salinisés et modérément salinisés en présence du champignon (0mM/AC = 0,765±0,051 - 50 mM/AC = 0,755±0,041 - 100 mM/AC = 0,741±0,037 mg/g MVF). Toutefois, à des concentrations salines plus élevées, la teneur en chlorophylle a a augmenté, atteignant un maximum de 1,180±0,048 mg/g MVF (200mM/AC), confirmant ainsi l'intérêt de l'endophyte dans la protection de la chlorophylle a contre l'oxydation induite par le sel.



**Figure 18 :** Teneurs en chlorophylle totale (C : mg/g MVF) des feuilles de *Triticum durum* sous l'effet de différentes concentrations de NaCl (0mM/SC, 0mM/AC, 50mM/AC, 100mM/AC, 150mM/AC et 200mM/AC), en présence (AC) et en absence (SC) du champignon endophyte (AY1S). Les valeurs représentent les moyennes  $\pm$  écarts types (n=5). a, b et c : les valeurs portant des lettres différentes sont significativement différentes ( $P < 0,05$ ).

- **Chlorophylle (b)**

Comme pour la chlorophylle a, un schéma similaire est observé pour la chlorophylle b. Sa teneur est également influencée par les variations de la salinité, que ce soit en présence ou en absence du champignon endophyte ( $F = 16,008$ ;  $P = 0,00008$ ). Selon la figure 19, pour le lot cultivé sur un sol à 0mM sans endophyte, la teneur en chlorophylle b est de  $0,516 \pm 0,011$  mg/g MVF. Cette valeur est comparable à celles mesurées dans les feuilles des lots exposés à des concentrations de 150 et 200mM en présence de l'endophyte, avec des teneurs respectives de  $0,466 \pm 0,054$  et  $0,547 \pm 0,058$  mg/g MVF. En revanche, même en présence du champignon, la chlorophylle b subit une oxydation dans les milieux salins dont la concentration est comprise entre 0 et 100mM, avec des valeurs de  $0,358 \pm 0,012$  (0 mM/AC),  $0,354 \pm 0,009$  (50 mM/AC) et  $0,356 \pm 0,018$  mg/g MVF (100 mM/AC).

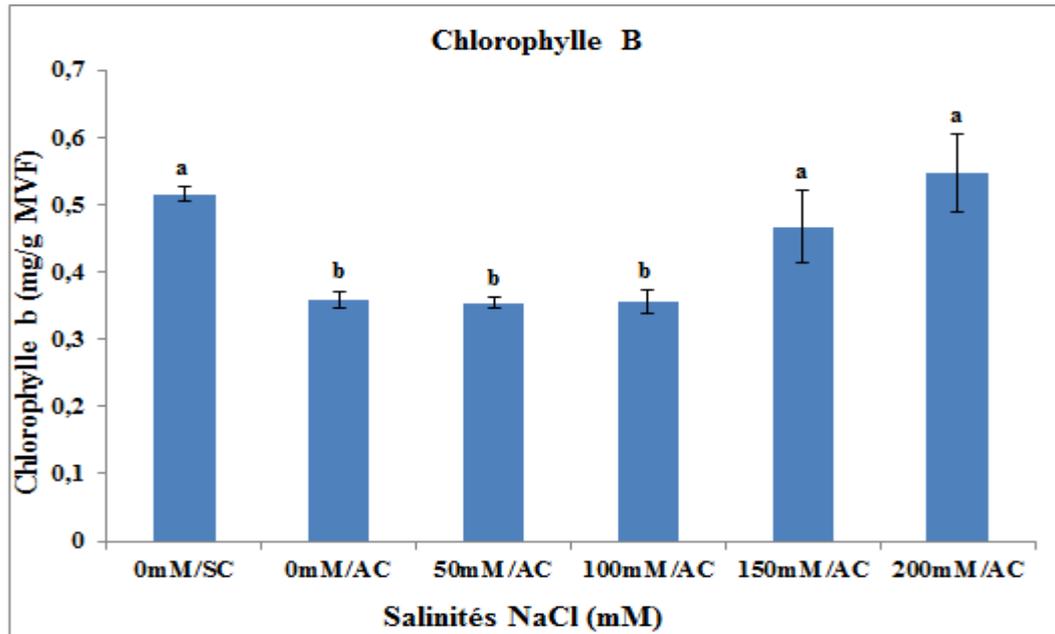


Figure 19: Teneurs en chlorophylle totale (C : mg/g MVF) des feuilles de *Triticum durum* sous l'effet de différentes concentrations de NaCl (0mM/SC, 0mM/AC, 50mM/AC, 100mM/AC, 150mM/AC et 200mM/AC), en présence (AC) et en absence (SC) du champignon endophyte (AYIS). Les valeurs représentent les moyennes  $\pm$  écarts types ( $n=5$ ). a, b et c : les valeurs portant des lettres différentes sont significativement différentes ( $P<0,05$ ).

- **.Chlorophylle totale (a+b)**

De même, pour la chlorophylle totale, la comparaison des données à l'aide de l'analyse de variance ( $F=22,47;P=0,00002$ ) révèle deux niveaux distincts de salinité en termes de teneur en chlorophylle totale (Fig.20 ). Par rapport au témoin (0mM/SC), la première teneur, la plus faible, est observée dans les lots exposés à des concentrations de sel nulles à modérées (0-100mM) en présence du champignon endophyte, avec des valeurs de  $1,122\pm 0,063$  (0mM/AC),  $1,109\pm 0,048$  (50mM/AC) et  $1,096\pm 0,051$ mg/g MVF (100mM/AC). En revanche, le deuxième niveau, correspondant à des concentrations de 150 et 200mM en sel, indique respectivement une teneur comparable à celle du témoin ( $1,534\pm 0,065$ mg/g MVF) et une teneur plus élevée ( $1,726\pm 0,178$ mg/g MVF).

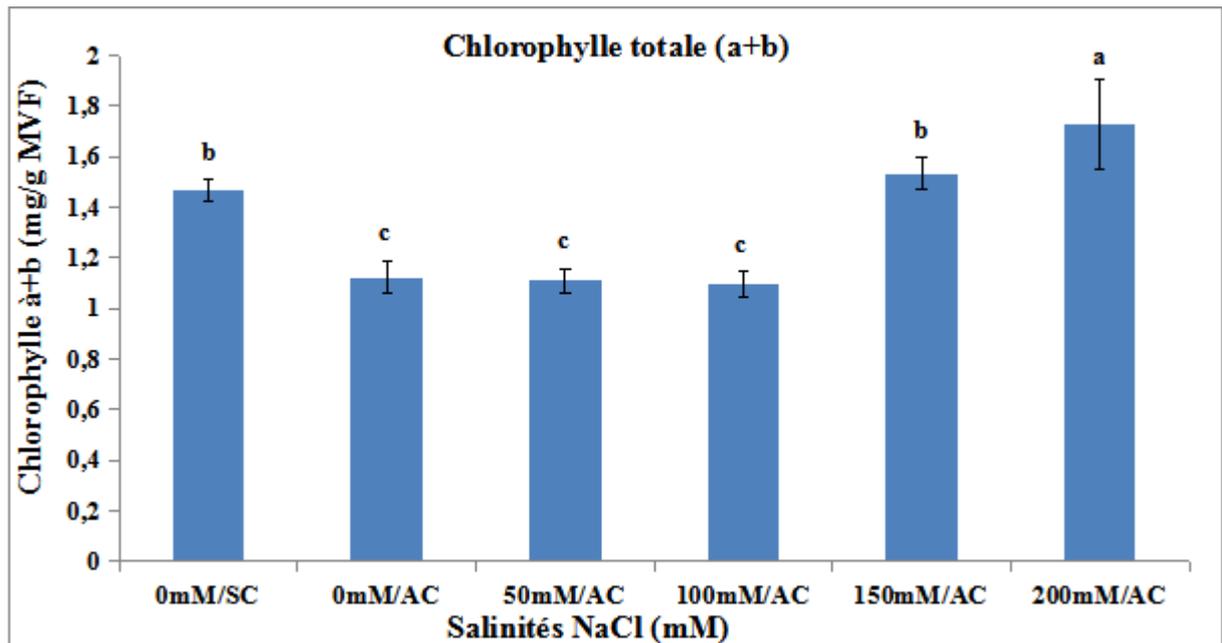
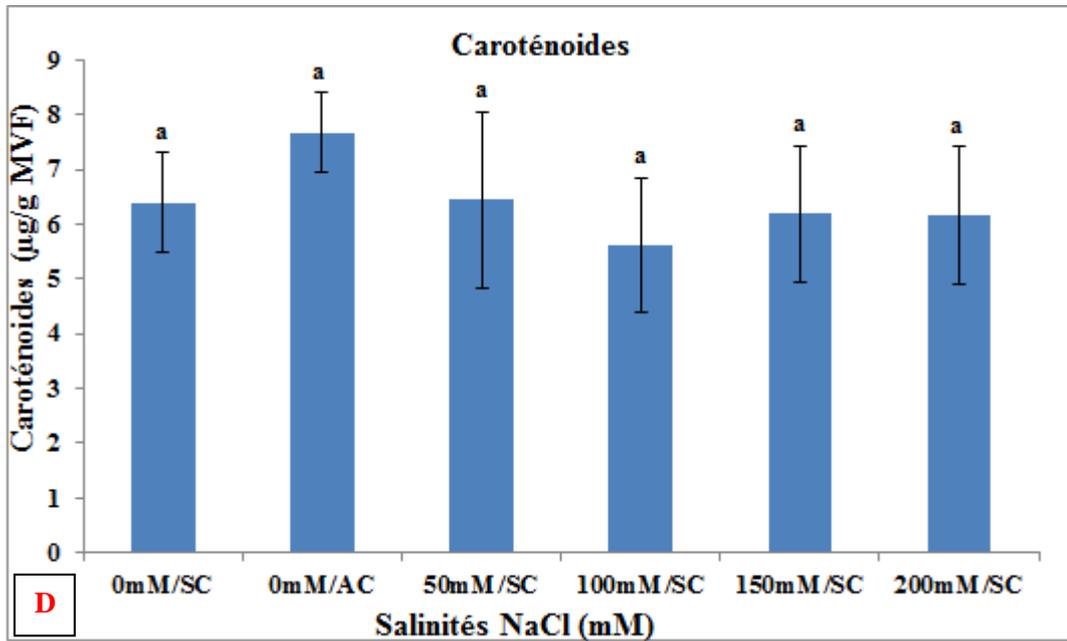


Figure 20: Teneurs en chlorophylle totale (C : mg/g MVF) des feuilles de *Triticum durum* sous l'effet de différentes concentrations de NaCl (0mM/SC, 0mM/AC, 50mM/AC, 100mM/AC, 150mM/AC et 200mM/AC), en présence (AC) et en absence (SC) du champignon endophyte (AY1S). Les valeurs représentent les moyennes  $\pm$  écarts types ( $n=5$ ). a, b et c : les valeurs portant des lettres différentes sont significativement différentes ( $P < 0,05$ ).

- **caroténoïdes**

La concentration en sel n'a montré aucun impact sur la teneur en caroténoïdes des feuilles de blé dur ( $F=0,79; P=0,578$ ). L'homogénéité des résultats obtenus souligne le rôle bénéfique de l'inoculation du champignon endophyte AY1s dans la protection des caroténoïdes contre l'oxydation en conditions salines (Fig. 21).



**Figure 21:** Teneurs en caroténoïdes (D : µg/g MVF) des feuilles de *Triticum durum* sous l'effet de différentes concentrations de NaCl (0mM/SC, 0mM/AC, 50mM/AC, 100mM/AC, 150mM/AC et 200mM/AC), en présence (AC) et en absence (SC) du champignon endophyte (AYIS). Les valeurs représentent les moyennes ± écarts types (n=5). a, b et c : les valeurs portant des lettres différentes sont significativement différentes (P<0,05).

## *Discussion*

## Discussion

La salinité constitue l'un des stress abiotiques les plus sévères, affectant gravement la productivité des plantes et provoquant parfois des dommages importants pouvant aller jusqu'à leur perte (Bourizq, 2019).

Au cours de ces dernières décennies, les scientifiques ont cherché des solutions durables pour atténuer les effets délétères de la salinité sur les cultures et améliorer leur rendement. Plusieurs études récentes ont proposé des approches innovantes pour protéger les plantes du stress salin (Yu et al., 2019). Parmi ces stratégies, l'exploration des champignons endophytes se distingue. Ces champignons établissent une relation symbiotique avec la plante hôte, offrant une protection contre les agents pathogènes et facilitant la synthèse de nutriments, créant ainsi des conditions favorables pour résister à la toxicité du chlorure de sodium (NaCl) (Afzal et al., 2013 ; Yu et al., 2019). Les recherches montrent que ces champignons peuvent produire des systèmes de défense naturels, biologiquement actifs et diversifiés, qui aident les plantes à faire face aux stress environnementaux (Schulz, 2002 ; Bilal et al., 2019 ; Yu et al., 2019).

L'influence du champignon endophyte AY1S d'origine algue marine *Peyssonnelia coriacea*, précédemment isolé et identifié a été exploité *in vivo* sur le blé dur cultivé avec ou sans stress salin. Cette étude a été suivie afin d'évaluer l'effet de la présence de ce champignon sur la croissance et le fonctionnement du blé dur dans des conditions anormales.

D'après les résultats obtenus en conditions stressantes sur le plan morphologique, aucune influence significative de l'augmentation progressive du NaCl sur les trois paramètres, à savoir le taux de levée, la longueur des racines et le nombre des feuilles n'a été soulignée, ce qui permet de montrer l'importance du rôle du champignon endophyte AY1S dans la tolérance à la salinité. Selon Rahman et Saiga (2005), les champignons endophytes jouent un rôle crucial dans la tolérance des plantes au stress salin en produisant des acides organiques et d'autres composés. De plus, ces champignons peuvent favoriser la croissance des plantes, notamment en augmentant la longueur des racines et des pousses. Cette activité est attribuée à la production de phytohormones telles que l'acide abscissique (AAI) et l'acide gibbérellique. Ces hormones stimulent une croissance racinaire accrue et améliorent l'absorption des nutriments (Egamberdieva et Kucharova, 2009). Ces résultats corroborent ceux obtenus par Kouadria (2019) sur le blé dur et l'orge en présence de champignons endophytes sous stress salin.

De même, l'inoculation des graines de blé par le champignon endophyte AY1S a amélioré le nombre de racines dans les conditions normales ou le nombre le plus élevé de racines est observé dans le lot non salé en présence du champignon (0mM/AC). Ce nombre diminue progressivement

dans les lots à différentes concentration de NaCl. La salinité du sol affecte significativement le développement racinaire du blé. Le nombre de racines, en particulier, diminue de manière notable .

sous l'effet du stress salin. Cette réduction du système racinaire a des conséquences directes sur la croissance et le développement de la plante (El-Hendawy et al., 2005 ; Ahmad et al., 2013).

Le champignon endophyte testé n'a pas modifié les dimensions foliaires. Les résultats statistiques ont clairement démontré que la salinité était le principal facteur influençant la hauteur et la surface des feuilles, soulignant ainsi son rôle prépondérant dans la croissance foliaire des plantes étudiées. Comme l'a souligné Zhao en 2007, la salinité induit des modifications morphologiques au niveau des feuilles. Les plantes exposées à des conditions salines présentent une réduction significative de la longueur de leurs feuilles, ce qui a pour conséquence une diminution de la surface foliaire totale.

Les dommages causés à la plante sont associés à l'accumulation, à des niveaux toxiques, des ions  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$ , dans les feuilles, affectant négativement le métabolisme. En effet, selon Munns et al. (2006), la réponse immédiate au stress salin est la réduction de la surface foliaire. La limitation de la croissance foliaire lors d'un stress salin représente un mécanisme adaptatif qui permet de réduire la transpiration et donc de maintenir l'état hydrique des plantes, ceci traduit une différence dans la régulation des gènes affectant la croissance chez les parties aériennes lors d'un stress (Wu et Cosgrove, 2000).

Cette étude a montré que la présence d'un endophyte fongique améliore significativement la rétention d'eau dans les feuilles de blé dur, en particulier en l'absence de stress salin. Bien que l'effet protecteur de l'endophyte s'atténue avec l'augmentation de la concentration en sel, les plantes associées à l'endophyte maintiennent un meilleur état hydrique que les plantes témoins. Ce résultat est conforme à l'hypothèse qui montre que les endophytes promeuvent les stratégies de conservation de l'eau chez les plantes en situation de stress (Malinowski et Belesky, 2000).

En ce qui concerne l'accumulation de la proline, nos résultats révèlent que les plantes de blé dur infectées par l'endophyte présentent des teneurs en proline supérieures par rapport aux plantes témoins. Cette accumulation est d'autant plus importante que le niveau de salinité augmente. Ces observations sont également en accord avec les résultats de Kouadria (2019), Bouzouina et al., (2021) et d'autres travaux antérieurs de Pinior et al. (2005) et Dardanelli et al. (2010), qui ont mis en évidence un effet similaire chez le blé dur et d'autres espèces végétales.

La stabilité des taux de MDA, observée malgré les variations de salinité, suggère un rôle protecteur de l'endophyte AY1S au niveau des membranes cellulaires. En renforçant les mécanismes antioxydants de la plante ou en séquestrant les radicaux libres, l'endophyte pourrait

limiter la peroxydation lipidique, un phénomène couramment associé au stress abiotique. Ce constat concorde avec l'idée largement admise que les MDA constituent un biomarqueur fiable du stress oxydatif. De plus, les champignons endophytes, reconnus pour leur potentiel antioxydant (Sharma et al., 2019), semblent atténuer les effets néfastes du stress salin chez le blé, comme l'ont montré Dief et al. (2021) et Bouzouina et al. (2021). Selon White et Torres (2010) et Hamilton et al. (2012), cet effet bénéfique pourrait s'expliquer par un équilibre fin entre la production de ROS et la réponse antioxydante, favorisé par la symbiose plante-champignon.

L'étude a montré que la présence du champignon endophyte (AY1S) a un impact significatif sur la teneur en chlorophylle a et b dans les plants de blé soumis à différents niveaux de salinité. Les plantes inoculées par l'endophyte AY1S avaient une teneur en chlorophylle totale plus élevée à des niveaux de salinité plus élevés. Des études ont montré que les endophytes peuvent atténuer les effets négatifs du stress salin sur la photosynthèse, en partie grâce à une augmentation de la teneur en pigments (Afkhami et al., 2013). La chlorophylle totale et la, entraînant une augmentation du rendement de la photosynthèse des plantes par rapport aux autres dépourvues d'endophyte (Obledo et al., 2003).

Les caroténoïdes n'ont montré aucune altération sous l'effet de la salinité, quel que soit le traitement appliqué. Cette uniformité des résultats suggère que l'endophyte AY1S protège efficacement les caroténoïdes contre l'oxydation, même en milieu salin. Des observations similaires ont été faites, montrant une augmentation significative des concentrations de chlorophylle et de caroténoïdes chez le blé et le maïs infectés par certains champignons endophytes (Rodriguez et al., 2009; Guo et al., 2018).

*Conclusion*  
*et Perspectives*

### Conclusion et perspectives

Face au défi mondial de la salinité des sols, les chercheurs explorent des solutions biologiques. Les champignons endophytes pourraient constituer une réponse prometteuse à cette problématique. Cette étude se concentre sur l'évaluation de l'effet du champignon endophyte AY1S sur la tolérance au sel du blé dur (variété Simeto).

Les résultats de cette étude démontrent clairement le potentiel de l'espèce AY1S à atténuer les effets néfastes du stress salin sur le blé dur. En favorisant la croissance racinaire, en améliorant la teneur en chlorophylle et en proline dans les plantes inoculées témoigne d'une meilleure adaptation de ce champignon à ces conditions défavorables. De plus, la stabilité des taux de MDA suggère un renforcement des mécanismes antioxydants de la plante en présence de l'endophyte.

L'utilisation des champignons endophytes représente une stratégie durable pour atténuer les effets du stress salin sur les plantes et pourrait les rendre cultivables dans des terres affectées par la salinité.

Ce travail ouvre de nouvelles perspectives de recherche visant à clarifier la relation potentielle entre le blé dur et les champignons endophytes d'origine algale sous les conditions salines. Il serait donc intéressant de :

- Se baser sur l'étude des mécanismes moléculaires par lesquels l'endophyte améliore la tolérance au stress salin (production d'hormones, des antioxydants, etc.) ;
- S'intéresser à l'étude *in situ*, pour mieux comprendre son utilité dans un monde complexe ;
- Évaluer les autres espèces d'endophytes pour améliorer la tolérance au stress salin.

*Références  
bibliographiques*



## Références bibliographiques

- Abis, K. (2012).** Le blé dans les pays du Maghreb et du Machrek : production, consommation et commerce.
- Afkhami, M. H., Chaichi, M. & Bahar, M. (2013).** The role of endophytic fungi in improving plant tolerance to abiotic stresses. *African Journal of Microbiology Research*, 7(38): 3954-3963.
- Afrin, T., Chowdhury, M. M. R. & Hossain, M. A. (2021).** Plant growth promotion by endophytic fungi: A review. *Journal of Advanced Research*, 22(3): 507-516.
- Afzal S., Samrah T., Viqar S., Jehan A., Syed E. H. (2013).** Managing the root diseases of okra with endo-root plant growth promoting *Pseudomonas* and *Trichoderma* viride associated with healthy okra roots. *Pak. J. Bot.* 45 1455–1460.
- Agastian, P., Kingsley, S. J. & Vivekanandan, M. (2000).** Effect of salinity on photosynthesis and biochemical characteristics in mulberry genotypes. *Photosynthetica*, 38(2) : 287-290.
- Ahmad, N. & Seymour, R. G. (2008).** Defining entrepreneurial activity: Definitions supporting frameworks for data collection.
- Andéol S.C., Benjamin C., (2016).** Les champignons endophytes : impact sur les écosystèmes et production de molécules d'intérêt thérapeutique. Science pharmaceutique .Dumas-01266084.
- Kumar, S. A. & Sadhu, S. K. (2022).** Plant stress: Challenges and management in the new decade (pp. 375-399). In S. Roy, P. Mathur, A. P. Chakraborty & S. P. Saha (Eds.), *Plant stress: Challenges and management in the new decade* (1st ed.). Springer.
- Arif F. (2015).** Effets du stress salin et d'osmoprotecteurs naturels sur la germination de blé dur (*Triticum durum*) inoculé par *Pseudomonas fluorescens*. Thèse de Doctorat. Algérie : Université Ferhat Abbas Sétif 1, p 205.
- Badraoui H, Meziani S. (2019).** Effet de la contrainte saline sur la germination et la croissance de quelques variétés de blé dur (*Triticum durum Desf.*) [En ligne]. Mémoire de Master. Algérie : Université 8 Mai 1945 Guelma, p 248.
- Baena, J. P. C., Steier, L., Tress, W., Saliba, M., Neutzner, S., Matsui, T. & Hagfeldt, A. (2015).** Highly efficient planar perovskite solar cells through band alignment engineering. *Energy & Environmental Science*, 8(10): 2928-2934.
- Bates, L. S., Waldren, R. P. A. & Teare, I. D. (1973).** Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and soil*, 39: 205-207.

- Benmakhlouf Z. (2018).** Etude de l'effet des phytohormones sur la croissance du blé dur (*Triticum durum Desf.*) var. Kebir cultivée dans des conditions salines. Mémoire de Master. Algérie : Université des Frères Mentouri Constantine1, p 152.
- Bernatchez, L., Glémet, H., Wilson, C. C. & Danzmann, R. G. (1995).** Introgression and fixation of Arctic char (*Salvelinus alpinus*) mitochondrial genome in an allopatric population of brook trout (*Salvelinus fontinalis*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 52(1):179-185
- Bilal S., Shahzad R., Khan A. L., Al-Harrasi A., Kim C. K., Lee I. J. (2019).** Phytohormones enabled entophytic *Penicillium funiculosum* LHL06 protects *Glycine max* L. from synergistic toxicity of heavy metals by hormonal and stress-responsive proteins modulation. *J. Hazard. Mater.* 37(9):120824. 10.1016/j.jhazmat.2019.120824)
- Blumwald, E., Grover, A. & Good, A. G. (2004).** Breeding for abiotic stress resistance: challenges and opportunities. In *New directions for a diverse planet*". Proceedings of the 4th International Crop Science Congress, Brisbane, Australia.
- Boscan, P., Cochran, S., Monnet, E., Webb, C. & Twedt, D. (2014).** Effect of prolonged general anesthesia with sevoflurane and laparoscopic surgery on gastric and small bowel propulsive motility and pH in dogs. *Veterinary anaesthesia and analgesia*, 41(1) :73-81
- Botella, L., & Diez, J. J. (2011).** Phylogenetic diversity of fungal endophytes in Spanish stands of *Pinus halepensis*. *Fungal Diversity*, 47, 9-18.
- Bounneche, S. (2015).** Les blés durs d'Algérie : caractérisation morphologique, biochimique et technologique. Thèse de doctorat, Université d'Alger 3.
- Bourizq, Z. (2019).** Caractérisation phénotypique et génotypique des germoplasmes de blé (*Triticum aestivum* L.) vis-à-vis de la salinité (Doctoral dissertation).
- Bouzouina, M., Kouadria, R. & Lotmani, B. (2021).** Fungal endophytes alleviate salt stress in wheat in terms of growth, ion homeostasis and osmoregulation. *Journal of Applied Microbiology*, 130(3) : 913-925.
- Cao, L., Qiu, Z., You, J., Tan, H. & Zhou, S. (2009).** Isolation and characterization of endophytic *Streptomyces* antagonists of *Fusarium* wilt pathogen from surface-sterilized banana roots. *FEMS Microbiology Letters*, 29(2) : 190-194.
- Chibani, F., Boumendjel, K. & Benladda, S. (2022).** Analyse de la compétitivité de la filière blé dur en Algérie: cas de la wilaya de Sétif. In *Actes du 8ème Congrès International sur le Développement Agricole Durable (ICDA 2022)* pp:105-112.
- Choi, I. & Saikkonen, P. (2004).** Testing linearity in cointegrating smooth transition regressions. *The Econometrics Journal*, 7(2) :341-365.
- CIC (2023).** Marché mondial du blé dur. Note de Conjoncture, Février 2023.

**CIC (2024).** Marché mondial du blé dur. Note de Conjoncture, Mai 2024.

**Clerget, M. (2011).** La céréale : biologie, développement, valorisation. Editions Quae.

**Douaoui, A. et Hartani, T. (2007).** Impact de l'irrigation par les eaux souterraines sur la dégradation des sols de la plaine du Bas-Chélif. Actes de l'atelier régional SIRMA, Tunis.

**DSASI 2020** Direction des Statistiques Agricoles, de la Surveillance et de l'Information Données sur la production de céréales en Algérie.

**Egamberdieva, D. & Kucharova, Z. (2009).** Selection for root colonising bacteria stimulating wheat growth in saline soils. *Biology and fertility of soils*, 45:563-571.

**Egamberdieva, D. & Kucharova, Z. (2009).** Selection for root colonising bacteria stimulating wheat growth in saline soils. *Biology and fertility of soils*, 45: 563-571.

**El Jaafari, S., Paul, R., Lepoivre, P., Semal, J. & Laitat, É. (1993).** Résistance à la sécheresse et réponses à l'acide abscissique: analyse d'une approche synthétique. *Cahiers Agricultures*, 2(4): 256-263.

**Escudier, J-L, B. Gillery, H. Ojeda et H. Etchebarne., 2019,** Maitrise de la salinité des eaux d'irrigation pour la viticulture, BIO Web of Conferences, Les Ulis vol. 12, Les Ulis

**FAO (2019).** <https://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/en>

**FAO (2021).** Salinité des sols et gestion des sols salés. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. <https://www.fao.org/global-soil-partnership/resources/highlights/detail/fr/c/1458975/>

**González, V. & Tello, M. L. (2011).** The endophytic mycota associated with *Vitis vinifera* in central Spain. *Fungal diversity*, 47(1): 29-42.

**Goudjil, M. B., Ladjel, S., Zighmi, S., Hammoya, F., Bensaci, M. B., Mehani, M. & Bencheikh, S. (2016).** Bioactivity of *Laurus nobilis* and *Mentha piperita* essential oils on some phytopathogenic fungi (in vitro assay). *J. Mater. Environ. Sci.*, 7(12):4525-4533.

**Grennan A. K., 2006.** High Impact Abiotic Stress in Rice. An «Omic» Approach; *Plant Physiology*, April 2006, Vol. 140: pp. 1139-1141.

**Guo, S., Li, L., Wang, Y. & Liu, Y. (2018).** Endophytic fungi enhance photosynthetic capacity and antioxidant enzyme activity in wheat seedlings under drought stress. *Frontiers in Plant Science*, 9: 1138.

**Gupta, B. S., Kumar, A., Pandey, D. N., Bohra, J. S. & Tyagi, V. K. (2019).** Soil salinity management: A global perspective. In *Sustainable management of soil resources in the changing environment* pp:283-316. Springer.

**H.E.S. Dief et al. (2021).** Alleviation of salt stress in *Triticum aestivum* by biopriming with *Phanerochaete chrysosporium* JCSB.

- Hamilton, C. E., Gundel, P. E., Helander, M., and Saikkonen, K. (2012).**Endophytic mediation of reactive oxygen species and antioxidant activity in plants: a review. *Fungal Divers.* 54: 1–10. doi: 10.1007/s13225-012-0158-9.
- Hannachi, M. (2017).** Le blé dur (*Triticum durum* Desf.): une culture majeure de la région méditerranéenne. In 1ères Journées Scientifiques du RREC pp : 1-10.
- Harman, G. E., Howell, C. R., Viterbo, A., Chet, I. & Lorito, M. (2004).** Trichodermaspecies—opportunistic, avirulent plant symbionts. *Nature reviewsmicrobiology*, 2(1) : 43-56.
- Hasegawa P.M., Bressan R. A., Zhu J. K. and Bohnert H. J., 2000.** Plant cellular and molecular responses to high salinity. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 51:463-499.
- Higgins, K. L., Arnold, A. E., Miadlikowska, J., Sarvate, S. D. & Lutzoni, F. (2007).** Phylogenetic relationships, host affinity, and geographic structure of boreal and arctic endophytes from three major plant lineages. *Molecularphylogenetics and evolution*, 42(2) : 543-555.
- Ivushkin K, Bartholomeus H, Bregt AK, Pulatov A, Kempen B, De Sousa L.** Global Mapping Of Soil Salinity Change. *Remote Sens Environ.* (2019);231: Article 111260.
- Jha, D., Rengasamy, P., Ravi, S., Sen, A. K. & Chander, M. (2011).** Salt tolerance mechanisms in plants: A review. *Journal of the Indian Society of Soil Science*, 56(3): 275-289.
- Khan, M. A., Hamayun, M., Siddique, S. B., Jehangir, A. & Rasul, G. (2018).** Salinity tolerance of maize plants inoculated with endophytic fungi. *Plant Growth & Regulation*, 86(1): 101-112.
- Kim, J. C., Choi, G. J., Park, J. H. & Kim, H. T. (2007).**Biocontrol activity of *Paenibacilluspolymyxa* AC-1 against *Phytophthora blight* on hot pepper. *Journal of AppliedMicrobiology*, 102(4): 902-912.
- Kouadria, R. (2019).** Contribution des champignons endophytes à la tolérance aux facteurs adverses (biotiques et abiotiques) des espèces cultivées : isolement des champignons endophytes et étude de leur contribution à la tolérance à la salinité ou à des polluants. Thèse de Doctorat, Université de Mostaganem, Algeria, 128 pp.
- Kusari, S., Hertweck, C. & Spiteller, M. (2012).** Chemical ecology of endophytic fungi: origins of secondary metabolites. *Chemistry&biology*, 19(7) :792-798.
- Kusari, S., Hertweck, C. & Spiteller, M. (2012).** Chemical ecology of endophytic fungi: origins of secondary metabolites. *Chemistry&biology*, 19(7) : 792-798.

- Latta, H. C., Bapna, P. K., Kumar, M., Babu, S., Sinha, A. K. & Gupta, R. K. (2018).** Breeding for salt tolerance in rice: Current status and future prospects. *Journal of Experimental Botany*, 69(11): 2797-2813.
- Li F.S., Kang S.Z. and Zhang J. 2004.** Interactive effects of elevated CO<sub>2</sub>, nitrogen and drought on leaf area, stomatal conductance, and evapotranspiration of wheat. *Agricultural Water Management* 67: 221-233.
- Li, Y., Wang, J., Li, X., Geng, D., Li, R. & Sun, X. (2011).** Superior energy capacity of graphenenanosheets for a nonaqueous lithium-oxygen battery. *Chemical Communications*, 47(33) : 9438-9440.
- Lopes, P., Pino, M., Carletti, G., Hamidi, S., Legué, S., Kerhervé, H., Rigaud, A. S. (2016).** Co-conception process of an innovative assistive device to track and find misplaced everyday objects for older adults with cognitive impairment: the TROUVE project. *Irbm*, 37(2) : 52-57.
- Malinowski D.P. and Belesky D.P. (2000).** Adaptation of endophyte-infected cool-season grasses to environmental stresses: mechanisms of drought and mineral stress tolerance. *Corp Science* 40: 923-940.
- Matty F.et M. Diatta, (2018),** Le phénomène de salinisation : impacts sur les sols et la végétation, pp. 1-5, dans : Faye E., A. Tamba et M. Diatta (eds), Actes du séminaire national “Lutte contre la salinisation et valorisation des terres salées au Sénégal : état des connaissances et perspectives”, Dakar, Sénégal : 244 p.
- Mekaoussi, M. (2015).** L'évolution de la production céréalière en Algérie : analyse par département. In Actes du Séminaire international sur la recherche scientifique et innovation technologique dans la filière céréales en Algérie pp : 21-28.
- Mermoud, M. (2006).** Étude de la relation salinité-sodicité des sols salés de la plaine du Bas-Cheliff. *Agronomie, Environnement & Développement*, 37(2) : 229-242.
- Metternicht GI, Zinck JA.Mohammadi, N. Sturz and Christe, (2003)** Remote Sensing Of Soil Salinity: Potentials And Constraints. *Remote Sens Environ.* 2003; **85**(1):1–20.
- Munns, R. (1993).** Physiological processes limiting plant growth in saline soils: some dogmas and hypotheses. *Plant, Cell&Environment*, 16(1) : 15-24.
- Munns, R. & Tester, M. (2008).** Mechanisms of salinity tolerance in plants. *Annual review of plant biology*, 59(1): 351-381.
- Negacz, K., Malek, Ž., de Vos, A. &Vellinga, P. (2022).** Saline soils worldwide: Identifying the most promising areas for saline agriculture. *Journal of arid environments*, 203 : 104775.
- ONFAA (2017).** Bilan de la campagne céréales 2016-2017. Office National des Filières Agricoles, Algérie.
- Oudjani, M. L. (2009).** Le blé dur en Algérie: enjeux et perspectives. Actes des Journées

- Ouhaddach, M., ElYacoubi, H., Douaik, A., Hmouni, D. & Rochdi, A. (2016).** Réponse à la salinité de quelques paramètres physiologiques et biochimiques du Blé (*Triticum aestivum*L.) au stade montaison.
- Pal, D., Kumar, A. & Bohra, J. S. (2021).** Salt stress tolerance in plants: Mechanisms and strategies for crop improvement. In *Abiotic stress tolerance in plants* pp.:303-330. Springer.
- Pineda, A., Kaplan, I., Bezemer, T. M. & Marneweck, D. A. (2010).** Digestive and systemic enzyme activities in an omnivorous and a carnivorous mammalian system. *Integrative and Comparative Biology*, 50(6) : 980-990.
- Pompelli, M. F., Antunes, W. C., Ferreira, D. T., Cavalcante, P. G., Wanderley-Filho, H. C. L. & Endres, L. (2012).** Allometric models for non-destructive leaf area estimation of *Jatropha curcas*. *Biomass and bioenergy*, 36: 77-85.
- Rahman, M.H., and Saiga, S. (2005).** Endophytic fungi (*Neotyphodium coenophialum*) affect the growth and mineral uptake, transport and efficiency ratios in tall fescue (*Festuca arundinacea*). *Plant and Soil* 272: 163-171.
- Rakshit, A. & Singh, H. B. (Eds.). (2018).** *Advances in seed priming* pp: 147-183. Singapore: Springer.
- Ramirez-Rodriguez, D., & Sánchez-Peña, S. R. (2016).** Endophytic *Beauveria bassiana* 1 in *Zea mays*: Pathogenicity against Larvae of Fall Armyworm, *Spodoptera frugiperda*. *Southwestern Entomologist*, 41(3): 875-878.
- Rasool S., Hameed A., Azooz M.M., Muneeb-u-Rehman, Siddiqi T.O., Ahmad P. (2013).** Salt Stress: Causes, Types and Responses of Plants. In: Ahmad P., Azooz M. and Prasad M. (eds) *Ecophysiology and Responses of Plants under Salt Stress*. Springer, New York, NY.
- REBAHI, A. (2007).** Etude du polymorphisme génétique et de la diversité des blés durs (*Triticum durum* Desf.) en Algérie par des marqueurs moléculaires de type RAPD et ISSR. Université d'Annaba.
- Rivera-Orduña, F. N., Suarez-Sanchez, R. A., Flores-Bustamante, Z. R., Gracida-Rodriguez, J. N. & Flores-Cotera, L. B. (2011).** Diversity of endophytic fungi of *Taxus globosa* (Mexican yew). *Fungal Diversity*, 47: 65-74.
- Rodriguez, R. J., White Jr, J. F., Arnold, A. E. & Redman, A. R. A. (2009).** Fungal endophytes: diversity and functional roles. *New phytologist*, 182(2): 314-330.

- Rodriguez, R. J., White, J. F., Jr., Arnold, A. E. & Redman, R. S. (2009).** Fungal endophytes: diversity and functional roles in plant ecosystems. *New Phytologist*, 182(4): 314-330.
- Sadouki, M., Bouaziz, A. & Haouas, M. (2018).** Diversité génétique du blé dur (*Triticum durum* Desf.) en Algérie. In Actes du Séminaire international sur la recherche scientifique et innovation technologique dans la filière céréales en Algérie pp. :143-150
- Saikkonen, K., Saari, S. & Helander, M. (2010).** Defensive mutualism between plants and endophytic fungi?. *Fungal Diversity*, 41 : 101-113.
- Sánchez Márquez, M., Bills, G. F. & Zabalgoitia, I. (2008).** Diversity and structure of the fungal endophytic assemblages from two sympatric coastal grasses.
- Schardl, C. L., Young, C. A., Hesse, U., Amyotte, S. G., Andreeva, K., Calie, P. J. & Fleetwood, D. J. (2013).** Plant-symbiotic fungi as chemical engineers: multi-genome analysis of the Clavicipitaceae reveals dynamics of alkaloid loci. *PLoS Genetics*, 9(2) :e1003323.
- Schulz, B., Boyle, C., Draeger, S., Römmert, A. K. & Krohn, K. (2002).** Endophytic fungi: a source of novel biologically active secondary metabolites. *Mycological research*, 106(9): 996-1004.
- Schulz, B., Boyle, C., Draeger, S., Römmert, A. K. & Krohn, K. (2002).** Endophytic fungi: a source of novel biologically active secondary metabolites. *Mycological research*, 106(9): 996-1004.
- Serge Malet et Jean, (2006) Processus et gestion de la salinité des sols**, in book: *Traité d'irrigation* Edition: Seconde édition Chapter: Processus et gestion de la salinité des sols Publisher: Tec & Doc Lavoisier.
- Siddiqui, M. A., Al-Kahtani, M. A. & Al-Dosari, H. M. (2022).** Salinity tolerance in plants: A comprehensive review. *Arabian Journal of Chemistry*, 15(4):103682.
- Siouda A, Benkhelifa M. (2016).** Analyse de la compétitivité de la filière blé dur en Algérie. In 1ères Journées Scientifiques du RREC pp : 1-10.
- Stone, J. K., Bacon, C. W. & White Jr, J. F. (2000).** An overview of endophytic microbes: endophytism defined. *Microbial endophytes*, 17-44.
- Strobel, G., Daisy, B., Castillo, U. & Harper, J. (2004).** Natural products from endophytic fungi. *Journal of Natural Products*, 67(2): 257-268.
- USDA (2024).** Foreign Agricultural Service, Grain and Feed Update. Février 2024.
- Vlad, F., Rubio, S., Rodrigues, A., Sirichandra, C., Belin, C., Robert, N., Merlot, S. (2009).** Protein phosphatases 2C regulate the activation of the Snf1-related kinase OST1 by abscisic acid in Arabidopsis. *The Plant Cell*, 21(10) : 3170-3184.

- Wagener, T., Boyle, D. P., Lees, M. J., Wheeler, H. S., Gupta, H. V. & Sorooshian, S. (2001).** A framework for development and application of hydrological models. *Hydrology and Earth System Sciences*, 5(1): 13-26.
- Wang F, Yang S, Wei Y, Shi Q, Ding J.** Characterizing Soil Salinity At Multiple Depth Using Electromagnetic Induction And Remote Sensing Data With Random Forests: A Case Study In Tarim River Basin Of Southern Xinjiang China. *Sci Total Environ.* (2021);754: Article 142030..
- Wang, Y., Li, X., Zhang, Y. & Liu, Y. (2023).** A novel endophytic fungus-derived compound exhibits broad-spectrum antifungal activity against plant pathogenic fungi. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 71(22) :5612-5620.
- Wang, Y., Li, Y., Song, X. & Zou, C. (2021).** Potential roles of endophytic fungi in soil remediation. In *Endophytic Microbes in Plant Health* pp: 209-234. Springer, Singapore
- White, J. F., and Torres, M. S. (2010).** Is plant endophyte-mediated defensive mutualism the result of oxidative stress protection? *Physiol. Plant.* 138:440–446. doi: 10.1111/j.1399-3054.2009.01332.x
- Wu, J., Zhao, Y., Qi, H., Zhao, X., Yang, T., Du, Y. & Wei, Z. (2017).** Identifying the key factors that affect the formation of humic substance during different materials composting. *Bioresourcetchnology*, 244:1193-1196.
- Wu, J., Zhao, Y., Qi, H., Zhao, X., Yang, T., Du, Y. & Wei, Z. (2017).** Identifying the key factors that affect the formation of humic substance during different materials composting. *Bioresource technology*, 244: 1193-1196.
- Wu, Y. & Cosgrove, D. J. (2000).** Adaptation of roots to low water potentials by changes in cell wall extensibility and cell wall proteins. *Journal of experimental botany*, 51(350): 1543-1553.
- Yallaoui-Yaici, N., Benamara, A. & Meddahi, M. (2006).** La variabilité spatio-temporelle de la production céréalière en Algérie. In *Actes du 8ème Congrès International sur le Développement Agricole Durable (ICDA 2022)* pp:105-112.
- Zerroumda M., (2012).** Approches physiologiques et métaboliques pour la sélection de variétés d'orge tolérantes vis-à-vis d'une contrainte saline. Thèse de doctorat. École Nationale Supérieure Agronomique -El Harrach –Alger Département d'Amélioration des Productions Végétales et Ressources Génétiques : 23-25.
- Zhu, J. K. (2003).** Regulation of ion homeostasis under salt stress. *Current opinion in plant biology*, 6(5) : 441-445.