

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de L'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Blida -1 SAAD DAHLEB

Faculté des Sciences de la nature et de la vie

Département de Biotechnologie et Agroécologie



**Mémoire de Fin D'études**

En vue de l'obtention du diplôme de Master académique dans le domaine  
des sciences de la nature et de la vie.

**Filière** : Biotechnologie Végétale

**Thème**

**Impact des Bactéries bénéfiques sur la croissance de certaines  
variétés de blé dur en condition de stress salin.**

**Présenté par:**

**Soutenu le :15/07/2025**

- BEN MOKHTAR SABRINA.
- DJOHLAF AMANDA.

**Devant le jury:**

Mme . Dr OUSRIR S .  
Mr . Dr ABBAD M .  
Mr . Dr HAMIDI Y.

**Grade / Lieu:**

M.C.B UNIV BLIDA -1  
M.C.A UNIV BLIDA -1  
M.C.A UNIV BLIDA -1

**Qualité:**

PROMOTRICE  
EXAMINATEUR  
PRESIDENT

**Année Universitaire : 2024 – 2025**

## REMERCIEMENT

Nous rendons grâce à Dieu, le Tout-Puissant, qui nous a accordé la santé, la persévérance et la force nécessaires pour mener à bien ce mémoire, malgré les défis rencontrés tout au long de ce parcours.

: قال الله تعالى  
"يَرْفَعِ اللَّهُ الَّذِينَ آمَنُوا مِنْكُمْ وَالَّذِينَ أُوتُوا الْعِلْمَ دَرَجَاتٍ"  
(سورة المجادلة، الآية 11)

Ce travail n'aurait jamais pu aboutir sans le soutien précieux et l'accompagnement de **Madame Ousrir Samira**, notre encadrante. Nous lui exprimons notre profonde reconnaissance pour son encadrement rigoureux, sa patience exemplaire, sa disponibilité constante et ses conseils avisés. Malgré ses nombreuses responsabilités, elle a su nous guider avec bienveillance et professionnalisme tout au long de ce projet.

**Un immense merci à vous, Madame, pour votre soutien indéfectible.**

Nous adressons également nos plus sincères remerciements à **Monsieur Abbad Mohamed** pour avoir accepté de superviser ce mémoire. Sa bienveillance, ses orientations pertinentes et sa compréhension ont grandement enrichi notre travail.

Nos remerciements vont également à **Monsieur Hamidi Youcef**, pour avoir accepté de faire partie du jury et d'évaluer ce travail. Qu'il trouve ici l'expression de toute notre considération et notre gratitude.

Nous n'oublions pas d'adresser un remerciement chaleureux à **Monsieur Walid**, pour son aide précieuse, sa patience et sa gentillesse tout au long de cette aventure. Nos remerciements s'étendent aussi à l'ensemble des membres du laboratoire, pour leur soutien direct ou indirect.

Enfin, nous tenons à remercier l'ensemble des enseignants et enseignantes qui, depuis nos premières années d'études jusqu'à aujourd'hui, ont contribué à notre formation et à notre évolution, tant sur le plan académique que personnel.

Nous clôturons ces remerciements en exprimant notre gratitude à toutes les personnes, proches ou lointaines, qui nous ont soutenues d'une manière ou d'une autre dans cette étape importante de notre parcours.

في الختام، نحمد الله تعالى على نعمة التوفيق والنجاح في هذا اليوم المبارك، ونسأله أن يجعل هذا التخرج فاتحة خير لمستقبل مزدهر، وأن يوفقنا جميعًا لما فيه الخير والصلاح، إن شاء الله.

## DÉDICACE

À chère maman **Samia**,

Toi qui as rêvé de ce jour... Ce diplôme, je te le dédie avec tout mon amour. Ton absence me pèse, mais ta présence en moi ne s'éteindra jamais. Qu'Allah t'accorde le paradis.

**Repose en paix, maman.**

À mon père **Mohamed**,

Merci pour ton amour discret, ta persévérance et tes sacrifices. Ce succès est le fruit de ta foi en moi.

À maman **Nassima**,

Ton courage et ton amour ont été ma force. Que Dieu te protège et te garde à nos côtés.

À mes grands-parents **Laroussi** et **Houria**,

Vous êtes ma fierté et ma source d'inspiration. Votre souvenir m'accompagne à chaque pas.

**Reposez en paix.**

À mon grand-père **Baba Sidou**,

À ton âme noble, j'offre cette réussite.

**Que Dieu t'accorde Sa miséricorde.**

À **Mima**,

Merci d'avoir cru en moi, envers et contre tout. Ton amour est mon refuge.

À **maman Faiza**,

Ma force silencieuse, mon pilier. Ce diplôme est le tien. Merci pour tout.

À **ma tante bien-aimée**,

Ta présence et ton soutien ont été inestimables. Merci à toi et à **Hadjer**, ma moitié de cœur.

Une pensée sincère pour **Samou**, **Sisi**, **Anfel**, **Malek** et **Tonton Mohamed**.

À toute ma famille **Benmokhtar**, **Dib**, **Boumaza**,

Merci du fond du cœur.

À mon amie fidèle **Dida**,

Ton amitié est un trésor. Merci d'avoir été là, toujours.

À mon binôme **Amanda**,

Merci pour ton professionnalisme, ta gentillesse et ton esprit d'équipe. Fièvre d'avoir partagé ce parcours avec toi.

## DÉDICACE

Avant tout, je rends grâce à Dieu pour la force qu'Il m'a donnée, les épreuves qu'Il m'a aidée à surmonter, et les bénédictions visibles et invisibles qui ont accompagné chaque étape de mon parcours.

Je dédie ce travail à toutes les âmes qui, d'une manière ou d'une autre, ont nourri ma force, apaisé mes silences et soutenu mes pas.

À ma mère **Amira**,

Mon pilier et ma première maison. Ton amour et ta patience ont guidé mes pas et allégé mes fardeaux. Chaque page de ce travail porte ton empreinte, car sans toi rien n'aurait eu la même lumière.

À mon père **Riad**,

Merci pour ta présence rassurante, ton amour discret et ton soutien sans faille. Je t'aime profondément Papa, tu es et tu resteras un exemple précieux dans ma vie.

À mes sœurs **Mélissa** et **Anaïs**,

Mes complices de toujours, vos rires, votre tendresse et votre affection sont ma plus belle force. Je vous aime au-delà des mots.

À ma binôme **Sabrina**,

Merci pour ton engagement, ta patience, ton humour et ta fidélité. Ce parcours partagé est une belle richesse.

À mes amis proches,

Merci pour votre présence, vos encouragements et votre affection sincère. Vous avez été essentiels.

À ma famille,

Pour son amour constant, sa chaleur et son soutien inconditionnel. Peu importe la distance, vous êtes toujours avec moi.

À mon cousin **Amine**,

Ta patience, ton aide précieuse et tes conseils ont été d'une grande valeur pour la réalisation de ce projet.

Merci pour tout.

## RÉSUMÉ

Le *Triticum durum* Desf., communément appelé blé dur, constitue l'une des principales cultures stratégiques en Algérie. Sa culture est principalement concentrée dans les régions arides et semi-arides, où la salinité des sols représente un facteur limitant majeur pour la croissance et le rendement des cultures. Face à cette contrainte, le recours aux rhizobactéries promotrices de la croissance des plantes (PGPR) apparaît comme une alternative prometteuse. Ces microorganismes offrent une stratégie efficace pour atténuer les effets du stress salin et améliorer la productivité agricole dans les sols affectés par la salinité.

Le présent travail vise à évaluer l'amélioration de la tolérance au stress salin chez les plantules de blé dur (*Triticum durum*), variété AMAR 06, induite par l'inoculation avec la souche *Bacillus subtilis* subsp. *spizizenii* ATCC 6633. Le stress salin a été simulé à l'aide de deux concentrations de chlorure de sodium (NaCl) : 75 mM/L et 100 mM/L. Parallèlement, deux doses de proline exogène (25 mM/L et 50 mM/L) ont été appliquées. Les effets phytobénéfiques de ce traitement combiné ont été étudiés en conditions contrôlées.

Les résultats obtenus indiquent que l'association de la proline exogène avec la souche PGPR *Bacillus subtilis* a significativement amélioré la croissance du blé dur soumis au stress salin. Cette combinaison s'est traduite par une augmentation notable de la longueur des feuilles (jusqu'à 16,28 cm), du poids frais foliaire (atteignant 0,5 g), ainsi que de la longueur et du poids des racines. Par ailleurs, une amélioration de la teneur en chlorophylle a été observée, atteignant 20,66 unités SPAD. En outre, cette synergie a favorisé à la fois le taux et la vitesse de germination, tout en augmentant l'indice de tolérance au stress salin grâce à l'atténuation des effets délétères induits par la salinité.

Ces résultats indiquent que cette approche représente une stratégie prometteuse pour atténuer les effets du stress salin et optimiser les performances agronomiques des cultures en conditions salines.

**Mots clés :** Blé dur, stress salin, PGPR, inoculation, *Bacillus subtilis*, proline exogène

## ملخص

يُعد القمح الصلب (*Triticum durum* Desf.) من المحاصيل الاستراتيجية الرئيسية في الجزائر. وتتركز زراعته بشكل أساسي في المناطق الجافة وشبه الجافة، حيث تُعد ملوحة التربة من أهم العوامل التي تحد من نمو النبات وإنتاجيته. وكمحاولَة للتغلب على هذه المعوقات، برز استخدام البكتيريا الجذرية المحفزة لنمو النبات (PGPR) كخيار واعد وفعال. إذ تقدم هذه الكائنات المجهرية استراتيجية ناجعة للتخفيف من آثار الإجهاد الملحي وتعزيز الإنتاج الزراعي في الأراضي المتأثرة بالملوحة.

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم تحسين تحمل الإجهاد الملحي عند بادرات القمح الصلب من الصنف AMAR 06، وذلك عن طريق التلقيح بالسلالة البكتيرية *Bacillus subtilis* subsp. *spizizenii* ATCC 6633 وقد تم محاكاة الإجهاد الملحي باستخدام تركيزين من كلوريد الصوديوم (NaCl): 75 ملليمول/لتر و100 ملليمول/لتر. وبالتوازي، تم تطبيق جرعتين من البرولين الخارجي بتركيزين: 25 ملليمول/لتر و50 ملليمول/لتر. وتمت دراسة التأثيرات المفيدة للنبات الناتجة عن هذا العلاج المركب في ظروف مضبوطة.

أظهرت النتائج أن الجمع بين البرولين الخارجي وسلالة PGPR *Bacillus subtilis* ساهم بشكل ملحوظ في تعزيز نمو القمح الصلب تحت ظروف الإجهاد الملحي. حيث أدى هذا التأزر إلى زيادة ملحوظة في طول الأوراق (بلغت حتى 16.28 سم)، والوزن الطازج للأوراق (حتى 0.5 غرام)، إلى جانب تحسين في طول الجذور ووزنها. كما لوحظ تحسن في محتوى الكلوروفيل وصل إلى 20.66 وحدة SPAD. علاوة على ذلك، ساهم هذا العلاج في تحسين معدل وسرعة الإنبات، كما رفع مؤشر تحمل الإجهاد الملحي من خلال تخفيف التأثيرات السلبية الناتجة عن الملوحة.

تشير هذه النتائج إلى أن هذا النهج يُمثل استراتيجية واعدة للتخفيف من آثار الملوحة وتحسين الأداء الزراعي للمحاصيل في البيئات المالحة.

**الكلمات المفتاحية:** القمح الصلب، الإجهاد الملحي، PGPR، التلقيح، *Bacillus subtilis*، البرولين الخارجي.

## ABSTRACT

*Triticum durum* Desf., commonly known as durum wheat, is one of the main strategic crops in Algeria. Its cultivation is predominantly concentrated in arid and semi-arid regions, where soil salinity constitutes a major limiting factor for plant growth and crop yield. In response to this constraint, the use of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) emerges as a promising alternative. These microorganisms offer an effective strategy to mitigate the effects of salt stress and enhance agricultural productivity in saline-affected soils.

The present study aims to evaluate the improvement of salt stress tolerance in seedlings of durum wheat (*Triticum durum*), cultivar AMAR 06, induced by inoculation with the bacterial strain *Bacillus subtilis* subsp. *spizizenii* ATCC 6633. Salt stress was simulated using two concentrations of sodium chloride (NaCl): 75 mM/L and 100 mM/L. In parallel, two doses of exogenous proline (25 mM/L and 50 mM/L) were applied. The phytobeneficial effects of this combined treatment were studied under controlled conditions.

The results indicate that the combination of exogenous proline with the PGPR strain *Bacillus subtilis* significantly enhanced the growth of durum wheat under salt stress. This synergy led to a notable increase in leaf length (up to 16.28 cm), leaf fresh weight (up to 0.5 g), as well as root length and weight. Furthermore, an improvement in chlorophyll content was observed, reaching 20.66 SPAD units. Additionally, this combination promoted both germination rate and speed, while increasing the salt stress tolerance index by alleviating the deleterious effects induced by salinity.

These findings suggest that this approach represents a promising strategy to mitigate the effects of salt stress and optimize the agronomic performance of crops under saline conditions.

**Keywords:** Durum wheat, salt stress, PGPR, inoculation, *Bacillus subtilis*, exogenous proline.

# TABLE DES MATIÈRES

## INTRODUCTION GENERALE ..... 13

### CHAPITRE I :. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

|                                                                                            |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>I.1. Aperçu général du blé dur (<i>Triticum durum</i>).....</b>                         | <b>5</b>  |
| I.1.1. Classification Botanique.....                                                       | 5         |
| I.1.2. Origine Génétique.....                                                              | 5         |
| I.1.3. Origine géographique .....                                                          | 6         |
| I.1.4. Culture et difficultés de production.....                                           | 6         |
| I.1.5. Importance économique et alimentaire :.....                                         | 8         |
| I.1.5.1. En Algérie .....                                                                  | 8         |
| I.1.5.2. Dans le monde.....                                                                | 8         |
| <b>I.2. Généralités sur le stress chez les plantes .....</b>                               | <b>9</b>  |
| I.2.1. Différents types de stress .....                                                    | 9         |
| I.2.1.1. Stress biotique .....                                                             | 9         |
| I.2.1.2. Stress abiotique .....                                                            | 10        |
| I.2.2. Différence entre la salinité et le stress salin.....                                | 10        |
| I.2.3. Salinité dans le monde et en Algérie .....                                          | 10        |
| I.2.4. Effets de la salinité sur les plantes.....                                          | 11        |
| I.2.5. Mécanismes d'adaptation des plantes au stress salin .....                           | 11        |
| <b>I.3. Généralité sur les PGPR.....</b>                                                   | <b>12</b> |
| I.3.1. Les mécanismes d'action directs et indirects des PGPR.....                          | 12        |
| I.3.2. Effet des PGPR sur la croissance du Blé dur .....                                   | 14        |
| <b>I.4. Généralité sur la Proline.....</b>                                                 | <b>14</b> |
| I.4.1. Rôle physiologique de la proline dans la réponse des plantes au stress.....         | 14        |
| I.4.2. Effet de la proline sur la croissance du blé dur en condition du stress salin ..... | 15        |

### CHAPITRE II :. MATERIEL ET METHODES

|                                                                                   |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>II.1. Matériel Biologique.....</b>                                             | <b>18</b> |
| II.1.1. Souche bactérienne .....                                                  | 18        |
| II.1.2. Matériel végétal .....                                                    | 18        |
| <b>II.2. Préparation de l'inoculum bactérien.....</b>                             | <b>21</b> |
| <b>II.3. Préparation de la solution saline et de la solution de proline .....</b> | <b>22</b> |
| <b>II.4. Différents traitements étudiés.....</b>                                  | <b>23</b> |
| <b>II.5. Paramètres étudiés .....</b>                                             | <b>24</b> |
| II.5.1. Longueur des parties aérienne et racinaire .....                          | 24        |

|                                                                          |           |
|--------------------------------------------------------------------------|-----------|
| II.5.2. Biomasse fraîche (poids frais) des racines et des feuilles ..... | 24        |
| II.5.3. Teneur en chlorophylle .....                                     | 24        |
| II.5.4. Taux de germination G% .....                                     | 25        |
| II.5.5. Vitesse de germination GP %.....                                 | 25        |
| II.5.6. Indice de tolérance de germination (DTI G %).....                | 25        |
| II.5.7. Indice de tolérance de la vitesse de germination (DTI GP %)..... | 26        |
| II.5.8. Réduction du pourcentage de germination (G %) .....              | 26        |
| II.5.9. Réduction de la vitesse de germination (GP %).....               | 26        |
| <b>II.6. Analyses statistiques.....</b>                                  | <b>26</b> |

## **CHAPITRE III : RÉSULTAT ET DISCUSSION**

|                                                                                                        |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>III.1. Longueur de la partie aérienne et racinaire.....</b>                                         | <b>28</b> |
| III.1.1. Partie aérienne .....                                                                         | 28        |
| III.1.2. Partie racinaire .....                                                                        | 29        |
| <b>III.2. Poids Frais de la partie aérienne et racinaire .....</b>                                     | <b>30</b> |
| III.2.1. Poids frais de la partie aérienne .....                                                       | 30        |
| III.2.2. Poids frais de la partie racinaire .....                                                      | 31        |
| <b>III.3. Teneur de Chlorophylle .....</b>                                                             | <b>32</b> |
| <b>III.4. Taux de Germination (G%) .....</b>                                                           | <b>33</b> |
| <b>III.5. La vitesse de germination (GP%).....</b>                                                     | <b>34</b> |
| <b>III.6. Indice de tolérance à la germination (DTI G%) et à la vitesse de germination (DTI GP%) .</b> | <b>35</b> |
| III.6.1. Indice de tolérance à la germination DTI G%.....                                              | 35        |
| III.6.2. Indice de tolérance à la vitesse de germination DTI GP% .....                                 | 36        |
| <b>III.7. Réduction de taux germination et de la vitesse de germination.....</b>                       | <b>37</b> |
| III.7.1. Réduction de taux de germination G% .....                                                     | 37        |
| III.7.2. Réduction de la vitesse de germination GP% .....                                              | 38        |
| <b>III.8. Discussion générale .....</b>                                                                | <b>39</b> |
| <b>CONCLUSION GENERALE.....</b>                                                                        | <b>42</b> |
| <b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>                                                                              | <b>44</b> |
| <b>ANNEXE.....</b>                                                                                     | <b>56</b> |

## LISTE DES NOTATIONS ET SIMBOLES

**PGPR:** Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (Rhizobactéries promotrices de la croissance des plantes)

**ABA:** Acide abscissique

**EPS:** Exopolysaccharides (Exopolysaccharides)

**RSA:** Résistance Systémique Acquise

**NaCl:** Chlorure de sodium (sel)

**FAO:** Food and Agriculture Organization (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture)

**ATCC:** American Type Culture Collection (Collection américaine de cultures types ; référence de souches microbiennes normalisées)

**ADN :** Acide désoxyribonucléique BNF : La fixation biologique de l'azote CFU : La concentration bactérienne

**DAPG :** Le diacétylphloroglucinol HCN : Le cyanure d'hydrogène ISR : Induction de la résistance Systémique

**LSD :** Acide Lysergique Diéthylamide

**NaCl :** Le chlorure de sodium

**PGPB :** Les bactéries promotrices de la croissance des plantes

**ROS :** espèce réactives de l'oxygène, Molécules dérivées d'un processus d'oxydo-réduction

**TSA :** La gélose tryptone soja

**CCLS :** Coopérative des Céréales et Légumes Secs. Il s'agit d'une coopérative qui opère dans le secteur agricole, plus précisément dans la production, la transformation et la commercialisation des céréales et des légumes secs.

**CNCC :** le Centre National de Contrôle et de Certification des semences et Plants (relevant du ministère de l'agriculture) et la Chambre Nationale des commissaires aux comptes (relevant du ministère des Finances).

**APG III :** La troisième version de la classification botanique phylogénétique des angiospermes établie par l'Angiosperme Phylogeny Group . C'est une révision et une mise à jour des familles de plantes à fleurs de la classification phylogénétique APG II

## LISTE DES FIGURES

|                                                                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure I-1: Origine génétique de blé dur .....                                                                                                                  | 6  |
| Figure I-2: Les différents mécanismes d'action des PGPR. ....                                                                                                   | 13 |
| Figure II-1: Désinfection des graines de blé dur .....                                                                                                          | 20 |
| Figure II-2. Mise en germination des graines de blé .....                                                                                                       | 20 |
| Figure II-3: Ensemencement bactérien . ....                                                                                                                     | 21 |
| Figure II-4: préparation de l'inoculum bactérien .....                                                                                                          | 22 |
| Figure II-5: préparation de la solution saline et de la solution de proline. ....                                                                               | 23 |
| Figure II-6: Poids et longueur des parties aériennes et racinaires .....                                                                                        | 24 |
| Figure II-7: Mesure de la chlorophylle . ....                                                                                                                   | 25 |
| Figure III-1: La variation de la longueur de la partie aérienne des plantules témoins et inoculées, sous l'effet de la proline exogène et du stress salin. .... | 28 |
| Figure III-2: La variation de la longueur racinaire des plantules témoins et inoculées, sous l'effet de la proline exogènes et du stress salin. ....            | 29 |
| Figure III-3: La variation du poids frais des plantules témoins et inoculées, sous l'effet de la proline exogène et du stress salin. ....                       | 30 |
| Figure III-4: La variation du poids frais racinaire des plantules témoins et inoculées, sous l'effet de la proline exogène et du stress salin. ....             | 31 |
| Figure III-5: La variation de la teneur en Chlorophylle des plantules témoins et Inoculées, sous l'effet de la proline exogène et du stress salin. ....         | 32 |
| Figure III-6: La variation de taux de germination des graines témoins et inoculées, sous l'effet de la proline exogène et du stress salin. ....                 | 33 |
| Figure III-7: La variation de la vitesse de germination des graines témoins et inoculées, sous l'effet de la proline exogène et du stress salin.....            | 34 |
| Figure III-8: La variation d'indice de tolérance à la germination des graines témoins et stressées.....                                                         | 35 |
| Figure III-9: La variation d'indice de tolérance à la vitesse de germination de graines témoins et stressées.....                                               | 36 |
| Figure III-10: La variation de réduction de taux de germination des graines témoins et stressées. ....                                                          | 37 |
| Figure III-11: La variation de réduction de la vitesse de germination des graines témoins et stressés..                                                         | 38 |

## LISTE DES TABLEAUX

|                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau I-1: Étendue de la salinité dans le monde.....                                         | 10 |
| Tableau I-2: Effets de l'application de la proline sur le blé dur soumis au stress salin. .... | 16 |
| Tableau II-1: Caractéristiques morphologiques et culturelles de la variété AMAR 06. ....       | 19 |
| Tableau II-2: Résistance de variété AMAR 06 aux facteurs environnementaux et maladies. ....    | 19 |

# INTRODUCTION GENERALE

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le blé dur (*Triticum durum* Desf.) est une céréale largement cultivée, particulièrement bien adaptée aux climats chauds et arides. Il constitue une culture essentielle dans la production de denrées alimentaires de haute qualité, telles que les pâtes alimentaires et le couscous. Le blé dur, au même titre que d'autres céréales, occupe une place centrale dans l'alimentation humaine et animale. Il figure parmi les espèces céréalières les plus consommées à l'échelle mondiale (Karakas et al., 2011).

En Algérie, le blé constitue une culture stratégique de premier plan, représentant un pilier fondamental de l'alimentation des populations. Le secteur céréalier revêt une importance majeure tant sur les plans socio-économique que politique. Toutefois, sur le plan international, l'Algérie demeure l'un des principaux importateurs de céréales, en particulier de blé, en raison des capacités limitées de la production nationale à satisfaire une demande intérieure en constante augmentation (Benseddik & Benabdelli, 2000 ; FAO, 2021).

En effet, le déficit hydrique ainsi que la salinité des sols constituent des facteurs limitants majeurs pour l'expansion et l'optimisation de la productivité du blé dur. Dans les zones arides et semi-arides, la salinisation des sols représente l'un des principaux obstacles au développement agricole, alors même que le blé dur y demeure une culture stratégique. Le stress salin altère les mécanismes d'absorption de l'eau et des éléments nutritifs par la plante, entraînant un déséquilibre ionique susceptible de compromettre sa croissance et son développement (Munns & Tester, 2008 ; Rengasamy, 2010).

Selon la FAO, la salinisation des sols se définit comme l'accumulation progressive de sels solubles, tels que le sodium, le potassium, le magnésium, le calcium et le chlore, dans la zone racinaire du sol. Un sol est considéré comme salin lorsque la concentration en sels atteint un seuil susceptible de compromettre le bon fonctionnement du sol ainsi que la croissance des végétaux (La Gestion d'un Sol Salinisé, 2022). La salinisation constitue une menace majeure pour les terres agricoles à l'échelle mondiale, en particulier dans les régions à climat aride ou semi-aride. La salinité représente ainsi un facteur limitant important pour la croissance et la productivité des cultures, notamment celle du blé dur, en altérant divers processus métaboliques et physiologiques, entraînant une diminution significative du rendement agricole (Munns & Tester, 2008).

Afin de pallier les effets délétères du stress salin sur le blé dur, les chercheurs se sont intéressés aux rhizobactéries promotrices de la croissance des plantes (PGPR), reconnues comme une alternative prometteuse. Ces micro-organismes, résidant dans la rhizosphère, zone étroitement associée aux racines, exercent leur action bénéfique à travers la production de métabolites secondaires et l'activation de voies métaboliques spécifiques, contribuant ainsi à une meilleure tolérance du blé dur au stress salin (Vacheron et al., 2013 ; Glick, 2014).

Les PGPR contribuent de manière significative à l'amélioration de la croissance des plantes et à leur tolérance au stress salin, notamment en favorisant l'assimilation de nutriments essentiels tels que le phosphore et l'azote, dont la disponibilité est généralement réduite en conditions salines (Upadhyay & Singh, 2015). Certaines souches spécifiques de PGPR produisent des sidérophores, de petites molécules capables de chélater le fer, le rendant ainsi accessible aux plantes malgré la salinité élevée du sol (Egamberdieva et al., 2017).

Par ailleurs, ces bactéries sont en mesure de moduler les niveaux d'hormones végétales telles que l'auxine, la cytokinine et l'acide abscissique (ABA), contribuant ainsi au développement racinaire, ce qui optimise l'absorption de l'eau et des nutriments (Egamberdieva et al., 2017 ; Vacheron et al., 2013). La régulation de l'ABA joue également un rôle clé dans la gestion du stress hydrique.

Les PGPR participent aussi à l'amélioration des propriétés physico-chimiques de la rhizosphère, en favorisant une meilleure aération et un drainage efficace du sol, ce qui est particulièrement bénéfique dans les sols salinisés et compactés. En outre, elles renforcent les systèmes de défense des plantes contre le stress oxydatif induit par la salinité, notamment par la production d'enzymes antioxydantes capables de neutraliser les espèces réactives de l'oxygène (Hashem et al., 2016).

Certaines PGPR synthétisent également des exopolysaccharides (EPS), formant une barrière protectrice autour des racines et limitant l'absorption excessive d'ions sodium nocifs. Enfin, ces microorganismes peuvent induire une résistance systémique acquise (RSA), un mécanisme comparable à un renforcement immunitaire, qui prépare la plante à affronter plus efficacement de futurs stress environnementaux (Glick, 2014).

L'utilisation de ces PGPR constitue une stratégie agroécologique prometteuse visant à atténuer les effets délétères du stress salin sur la croissance du blé dur. Ces microorganismes offrent des avantages indéniables par rapport aux pratiques agricoles conventionnelles, souvent onéreuses et susceptibles de porter atteinte à l'environnement. Les recherches scientifiques

poursuivent l'exploration des nouvelles souches de PGPR ainsi que de leurs mécanismes d'action, dans le but d'optimiser leur mise en œuvre sur le terrain (Vacheron et al., 2013). Cette démarche vise à assurer une production durable et stable de cette céréale stratégique, y compris dans les conditions climatiques arides fréquemment rencontrées en Algérie.

La proline constitue à la fois un marqueur biochimique pertinent et un agent protecteur majeur dans la réponse adaptative du blé dur (*Triticum durum*) au stress salin. Elle contribue significativement à la tolérance au sel en renforçant la capacité de la plante à préserver sa croissance et ses fonctions physiologiques malgré la contrainte environnementale (Szabados & Savouré, 2010). Agissant en tant qu'osmoprotecteur, la proline joue un rôle fondamental dans l'atténuation des effets délétères induits par la salinité (Ashraf & Foolad, 2007).

En conditions de stress salin, le blé dur présente généralement un ralentissement de la croissance, se manifestant notamment par une réduction de la longueur des feuilles et des racines, ainsi qu'une diminution du taux de germination. Toutefois, l'accumulation de proline observée dans ces conditions représente un mécanisme d'adaptation crucial, permettant d'atténuer ces effets négatifs (Kavi Kishor & Sreenivasulu, 2014).

Des études menées sur différentes variétés de blé dur ont mis en évidence une corrélation positive entre l'augmentation du taux de proline et une meilleure résistance au stress salin, traduite par une croissance plus soutenue chez les plantes tolérantes par rapport aux témoins sensibles ou non traités (Ashraf & Foolad, 2007).

Dans ce contexte, la présente étude vise à évaluer l'impact d'une souche bactérienne spécifique (*Bacillus subtilis* subsp. *spizizenii* ATCC 6633), en interaction avec un apport exogène de proline, sur la tolérance d'une variété de blé dur (*Triticum durum* variété AMAR 06) au stress salin, ainsi que sur la stimulation de sa croissance au stade de germination. Les effets morphologiques et physiologiques induits par cette souche bactérienne ont été analysés en conditions contrôlées au laboratoire, sous différentes concentrations de chlorure de sodium (NaCl) et de proline exogène.

# CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

## I.1. Aperçu général du blé dur (*Triticum durum*)

Le blé dur est une plante céréalière vivace appartenant à la famille des Poacées. Il est cultivées dans nombreux pays notamment ceux aux climats méditerranéens comme l'Afrique du Nord et les grandes plaines des Etats-Unis, c'est une plante herbacé annuelle a feuilles de hauteurs moyennes plates et larges et alternes, son odeur est intransférable, cet attribut provient de la présence d'une protéine particulière qui inclut du gluten particulier apte aux besoins alimentaires spécifiques.

### I.1.1. Classification Botanique

Selon APG III (2009), la classification botanique du blé dur est la suivante :

|                             |                                        |
|-----------------------------|----------------------------------------|
| <b><u>Règne</u></b>         | Plantae                                |
| <b><u>Sous –règne</u></b>   | Tracheobionta                          |
| <b><u>Division</u></b>      | Magnoliophyta                          |
| <b><u>Classe</u></b>        | Liliopsida                             |
| <b><u>Sous-classe</u></b>   | Commelinidae                           |
| <b><u>Ordre</u></b>         | Cyperales                              |
| <b><u>Famille</u></b>       | Graminae                               |
| <b><u>Tribu</u></b>         | Triticeae                              |
| <b><u>Genre</u></b>         | Triticum                               |
| <b><u>Espèce</u></b>        | Triticum Turgidum                      |
| <b><u>Sous – Espèce</u></b> | Triticum Turgidum Subsp Durum ( Desf ) |
| <b><u>Synonymes</u></b>     | Triticum Durum                         |
| <b><u>Ordre</u></b>         | Poales                                 |
| <b><u>Famille</u></b>       | Poaceae                                |

### I.1.2. Origine Génétique

Le blé dur (*Triticum turgidum* subsp. durum) trouve son origine dans le Croissant fertile. Il résulte d'une hybridation entre des espèces diploïdes, notamment *Triticum monococcum* (génome AA) et *Aegilops speltoides* (génome BB), comme le rapportent Croston et William (1981), (Figure 1).

### I.1.3. Origine géographique

Le blé dur est apparu au cours de la période néolithique, vers 5000 avant notre ère, dans la région du Croissant Fertile. Par la suite, sa culture s'est étendue au Moyen-Orient, à la Turquie, à l'Égypte, et à d'autres territoires limitrophes. Grâce à sa tolérance à la sécheresse, le blé dur s'est progressivement imposé comme une culture privilégiée dans les zones méditerranéennes. Les mouvements de population vers l'ouest ont favorisé son introduction et sa diffusion dans le sud de l'Europe, notamment dans le sud de la France.

Bien qu'il soit majoritairement cultivé dans les régions chaudes et arides, sa culture s'est récemment étendue à des zones plus tempérées telles que le Centre-Val de Loire et le Grand Est.

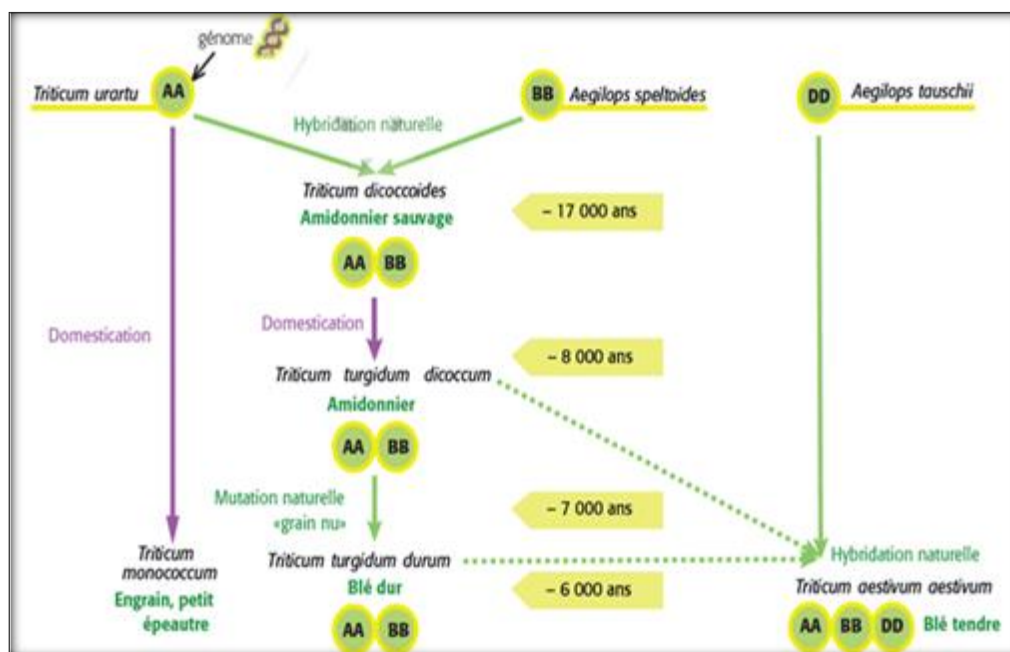


Figure I-1: Origine génétique de blé dur (*Triticum Durum*).

### I.1.4. Culture et difficultés de production

Le blé dur se distingue par une sensibilité accrue au froid par rapport au blé tendre, tout en affichant une meilleure tolérance à la sécheresse. Sa culture trouve son origine dans le bassin méditerranéen, s'étendant de l'Égypte à la Grèce, dès les débuts de l'agriculture. Il s'agit par ailleurs de la seule espèce de blé capable de se développer en conditions arides.

Les variétés de blé dur de printemps, adaptées aux climats continentaux, ont démontré une bonne aptitude à la culture dans des zones sèches, notamment au Canada, aux États-Unis et même dans certaines régions de la Communauté des États indépendants (CEI).

Malgré une demande croissante en blé dur sur les marchés, la production nationale reste insuffisante en Algérie. Cette situation s'explique principalement par les faibles rendements enregistrés, ainsi que par les contraintes climatiques et technologiques qui entravent le développement de cette filière.

➤ **Exigences pédoclimatiques sous conditions de stress salin :**

Le blé dur, cultivé principalement dans les régions arides et semi-arides telles que l'Algérie et le bassin méditerranéen, est particulièrement sensible au stress salin. Ce dernier résulte essentiellement de la salinisation des sols, causée par une évaporation intense et une gestion inadéquate de l'irrigation (Chaise et al., 2005 ; Belfakih et al., 2013). La salinité se traduit par une altération marquée de la croissance végétative, caractérisée par une diminution du nombre de feuilles, un raccourcissement des tiges, une réduction du diamètre des organes, ainsi qu'un ralentissement général du développement (Rush et al., 1981 ; Gillk, 1979). Elle induit également une baisse du poids frais et sec des plantes, compromettant ainsi leur rendement.

Sur le plan physiologique, la tolérance à la salinité résulte de mécanismes biochimiques et moléculaires complexes permettant aux plantes de maintenir leur croissance et leur développement malgré les conditions de stress (Hsissou, 1994 ; Mouellef, 2010). Le blé dur se distingue généralement par une sensibilité plus marquée à la salinité par rapport au blé tendre, bien que des différences notables existent entre les génotypes, reflétant une variabilité génétique considérable (Epstein et al., 1980 ; Slama, 1986 ; Roudani, 1996). Le stress salin affecte profondément le fonctionnement physiologique des plantes, en altérant notamment la photosynthèse, l'état hydrique, et en compromettant ainsi le rendement en grains (Alema et al., 2002).

Les exigences pédoclimatiques en condition de stress salin requièrent des sols bien drainés, faiblement salinisés, ainsi qu'une gestion rigoureuse de l'irrigation afin de prévenir l'accumulation excessive de sels (Belfakih et al, 2013). L'adaptation des variétés de blé à ces conditions repose en grande partie sur leur capacité à accumuler des osmolytes tels que la proline et les sucres solubles, qui jouent un rôle crucial dans la tolérance au stress osmotique (Mekliche et al., 2003 ; Hanana, 2008). Par ailleurs, la germination constitue une phase particulièrement vulnérable au stress salin, la diminution du taux de germination étant généralement proportionnelle à l'augmentation de la concentration en sels (Ben Kaddour, 2015; Lemekeddem Debbache, 2018).

En condition de stress salin, la culture du blé dur requiert un environnement pédoclimatique présentant une salinité modérée des sols et de l'eau d'irrigation, ainsi qu'une gestion optimisée des ressources hydriques et pédologiques, afin d'atténuer les effets néfastes sur la croissance, la physiologie et le rendement de la plante. Dans cette optique, la sélection de génotypes tolérants à la salinité, combinée à l'adoption de mécanismes d'adaptation physiologique, constitue une approche stratégique essentielle pour garantir la durabilité et la productivité de cette culture dans des conditions environnementales défavorables.

### **I.1.5. Importance économique et alimentaire :**

#### **I.1.5.1. En Algérie**

Le blé dur constitue un pilier fondamental de l'alimentation en Algérie. Principalement transformé en semoule, il entre dans la préparation du couscous, plat symbole du patrimoine culinaire national. Il est également utilisé dans la fabrication de nombreux pains traditionnels ainsi que de pâtes alimentaires. En raison de sa polyvalence et de sa valeur nutritionnelle, le blé dur joue un rôle essentiel dans l'apport alimentaire de la population (FAO, 2021).

En Algérie, la culture du blé dur occupe environ 65 % des superficies réservées aux céréales (Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural [MADR], 2022), ce qui en fait une composante essentielle de l'agriculture nationale. Cette culture constitue une source de revenu importante pour de nombreux agriculteurs et contribue de manière significative à l'économie du pays (FAO, 2021 ; OCDE/FAO, 2023). L'Algérie vise à atteindre l'autosuffisance en blé dur, un objectif stratégique destiné à réduire la dépendance aux importations et à renforcer la sécurité alimentaire nationale. Lorsque la production nationale est suffisante, elle génère également des recettes notables pour le Trésor public. Afin de promouvoir la production locale, les autorités mettent en œuvre plusieurs stratégies, notamment l'optimisation des techniques d'irrigation, l'usage de semences certifiées de haute qualité et le soutien direct aux producteurs (MADR, 2022 ; ONICL, 2021).

#### **I.1.5.2. Dans le monde**

Bien que sa production soit moins importante que celle du blé tendre, le blé dur revêt une grande importance pour la nutrition à l'échelle mondiale. Son usage principal au niveau mondial concerne la production de pâtes sèches de qualité supérieure, notamment en Italie et dans d'autres nations méditerranéennes (USDA, 2023). On l'utilise aussi pour la fabrication du couscous dans les zones de l'Afrique du Nord et du Moyen-Orient, ainsi que du boulgour et

d'autres aliments céréaliers traditionnels. On l'inclut dans la confection de divers pains et gourmandises, conférant une consistance et un goût particuliers (ICARDA, 2020) .

**Bien que représentant un volume inférieur à celui du blé tendre et du maïs, le blé dur joue un rôle stratégique dans l'agriculture mondiale.** Les principaux pays producteurs sont le Canada, l'Italie, les États-Unis et la Turquie (FAO, 2021). . Le commerce international du blé dur reste limité par rapport à celui du blé tendre, en raison de l'importante part de la production consommée localement dans les pays producteurs. Toutefois, une demande mondiale persistante existe, notamment pour du blé dur de haute qualité destiné à la fabrication de pâtes alimentaires (OECD-FAO, 2023) . La culture et la commercialisation du blé dur génèrent des retombées économiques significatives pour les agriculteurs, les coopératives agricoles ainsi que les industries de transformation, telles que les minoteries et les fabricants de pâtes. Les variations de l'offre et de la demande dans les principales régions de production influencent directement la dynamique du marché (CIRAD, 2021) .

## **I.2. Généralités sur le stress chez les plantes**

Les plantes sont constamment soumises à une multitude de stress environnementaux, qui peuvent être de nature biotique, impliquant des organismes vivants, ou abiotique, résultant de facteurs physiques ou chimiques. Ces contraintes altèrent les fonctions physiologiques essentielles des végétaux et compromettent leur croissance ainsi que leur productivité (Taiz et Zeiger, 2014).

### **I.2.1. Différents types de stress**

#### **I.2.1.1. Stress biotique**

Le stress biotique est provoqué par des agents vivants comme les champignons, les bactéries pathogènes, les virus, les insectes ou les nématodes. Ces stress engendrent des maladies, une compétition pour les ressources ou des dommages mécaniques aux tissus végétaux. Par exemple, la fusariose du blé est un stress biotique causé par un champignon du genre *Fusarium* (Dean et al., 2012 ; Glazebrook, 2005 ; Agrios, 2005).

### I.2.1.2. Stress abiotique

Le stress abiotique est induit par des facteurs environnementaux non vivants : salinité, sécheresse, froid, chaleur, inondation, rayonnements UV, métaux lourds, etc. Ce type de stress est responsable de plus de 50 % des pertes agricoles mondiales, avec une intensité accrue dans les zones arides et semi-aride (Boyer, 1982 ; Zhu, 2016 ; Mittler, 2006).

### I.2.2. Différence entre la salinité et le stress salin

La salinité désigne la concentration de sels solubles ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , etc.) dans le sol ou dans l'eau. Lorsque cette concentration dépasse un certain seuil, elle devient nuisible pour les plantes. On parle de stress salin lorsque cette présence de sels induit des perturbations physiologiques chez les végétaux, notamment par des effets osmotique, ionique et oxydatif (Munns et Tester, 2008).

### I.2.3. Salinité dans le monde et en Algérie

La salinité est un problème mondial majeur qui affecte environ 20 % des terres cultivées et jusqu'à 33 % des terres irriguées. Elle touche des régions entières en Asie du Sud, au Moyen-Orient, en Australie, en Afrique du Nord et en Amérique latine (FAO, 2020), (Tableau 1).

En Algérie, la salinité constitue une contrainte environnementale de plus en plus préoccupante pour le secteur agricole. Elle affecte particulièrement certaines régions telles que les Hauts Plateaux (notamment Sétif, M'Sila et Djelfa), le Bas-Chéliff, ainsi que le Sahara septentrional, incluant les wilayas de Biskra et

Ouargla. Selon les travaux de Bencherif et al. (2016), plus de 500 000 hectares de terres agricoles présentent des niveaux de salinité allant de modérés à élevés, compromettant de manière significative la productivité des cultures céréalières.

**Tableau I-1: Étendue de la salinité dans le monde (Qadir et al., 2014).**

| Région           | Surface affectée (Mha) | % des terres cultivées |
|------------------|------------------------|------------------------|
| Monde            | 831                    | ≈ 20 %                 |
| Terres irriguées | 76                     | ≈ 33 %                 |
| Asie du Sud      | > 10 par pays          | Zones critiques        |
| Afrique du Nord  | > 6                    | Zones arides à risque  |

#### **I.2.4. Effets de la salinité sur les plantes**

La salinité constitue un facteur abiotique majeur affectant la croissance du blé dur, principalement par l'induction d'un stress osmotique qui entrave l'absorption hydrique. Cette contrainte se traduit par une diminution significative du taux de germination, un ralentissement de la croissance des plantules ainsi qu'une réduction de la biomasse aérienne (Bendjebel & Benslama, 2021 ; Kaddour & Gouari, 2015). Elle engendre également une inhibition de l'expansion foliaire, un retard du développement phénologique, une diminution de la hauteur des tiges, du diamètre des organes et de la surface foliaire (Wang et Nil, 2000 ; Boukachabia, 1993 ; Bizid et Zid, 1988).

Sur le plan physiologique, la salinité induit des déséquilibres notables, notamment une baisse de la teneur en chlorophylle et une altération du processus photosynthétique (Levingneron et al., 1995 ; Albouchi et al., 2000). En réponse à ce stress, les plantes activent des mécanismes d'adaptation, notamment l'accumulation d'osmolytes compatibles tels que la proline et les sucres solubles, qui contribuent à la tolérance au stress salin (Bendjebel & Benslama, 2021 ; Kaddour & Gouari, 2015). Par ailleurs, la salinité agit à travers des voies de signalisation hormonale, impliquant notamment l'acide abscissique, régulant ainsi la croissance et les réponses adaptatives de la plante (Hubbard et al., 2010 ; Fujita et al., 2011).

En résumé, la salinité exerce un impact négatif global sur le développement du blé dur en compromettant l'absorption d'eau, en perturbant la physiologie photosynthétique, en retardant la croissance végétative, et en induisant des réponses biochimiques et hormonales complexes visant à atténuer ses effets délétères.

#### **I.2.5. Mécanismes d'adaptation des plantes au stress salin**

Pour faire face au stress salin, les plantes mettent en œuvre divers mécanismes d'adaptation intégrant des réponses anatomiques, physiologiques, biochimiques et moléculaires. Parmi les adaptations d'ordre anatomique, l'on observe notamment le développement de feuilles succulentes, d'un système racinaire étendu, ainsi que d'organes charnus favorisant le stockage de l'eau (Agrimag, 2020). Sur le plan métabolique, les plantes procèdent à un ajustement osmotique par la synthèse et l'accumulation de composés osmoprotecteurs tels que la proline, la glycine bêtaïne et les sucres solubles, permettant ainsi le maintien de la turgescence cellulaire en dépit de la forte salinité du sol (Bentrad, 2018 ; Denden et al., 2005).

La régulation des stomates contribue à réduire la déperdition d'eau par la fermeture partielle de ces derniers, alors que l'intervention hormonale, principalement grâce à l'acide abscissique (ABA), synchronise les réactions physiologiques au stress (Khan et Khan, 2013 ; Ashraf et al., 2010). Sur le plan cellulaire, les plantes se chargent de compartimenter les ions nuisibles ( $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$ ) dans leurs vacuoles ou de les expulser activement hors des cellules à l'aide de transporteurs membranaires dédiés tels que les canaux HKT, ce qui permet de contrôler la toxicité ionique (Institut Agro Montpellier, 2020).

De plus, le stress salin provoque un stress oxydatif en raison d'une production excessive de radicaux libres. Les plantes réagissent à cela en activant des systèmes antioxydants enzymatiques (comme la catalase et la superoxyde dismutase) et non enzymatiques (tels que les polyphénols et les flavonoïdes) afin de préserver l'intégrité de leurs membranes cellulaires. Ces processus sont orchestrés et supervisés par des chaînes de signalisation qui englobent des composants tels que le calcium, les MAP kinases, les protéines SOS et les phytohormones (Ragel de la Torre et al., 2021).

### I.3. Généralité sur les PGPR

Les rhizobactéries promotrices de la croissance des plantes (PGPR, pour *Plant Growth-Promoting Rhizobacteria*) constituent un groupe hétérogène de micro-organismes bénéfiques qui colonisent la rhizosphère et interagissent de manière positive avec les plantes. Ces bactéries sont reconnues pour leur capacité à stimuler la croissance végétale par divers mécanismes directs, tels que la fixation biologique de l'azote, la solubilisation des phosphates, ou la production de phytohormones, ainsi que par des mécanismes indirects, notamment la protection contre les agents pathogènes du sol. Leur utilisation dans l'agriculture durable suscite un intérêt croissant, en raison de leur rôle dans l'amélioration du rendement des cultures et la réduction de l'usage d'intrants chimiques (Vessey, 2003).

#### I.3.1. Les mécanismes d'action directs et indirects des PGPR

Les rhizobactéries promotrices de la croissance des plantes exercent leurs effets bénéfiques à travers une diversité de mécanismes, classés en deux grandes catégories : **directs** et **indirects** (figure 2).

Par le biais de mécanismes d'action directs, les PGPR favorisent la croissance végétale en agissant directement sur les besoins physiologiques des plantes. Ils incluent notamment : **la fixation biologique de l'azote**, permettant de convertir l'azote atmosphérique en formes assimilables par les plantes (Vessey, 2003) ; **la solubilisation du phosphore et d'autres nutriments minéraux**, facilitant leur disponibilité pour l'absorption racinaire (Rodríguez & Fraga, 1999) ; **la production de phytohormones** telles que l'auxine (IAA), la cytokinine et la gibbérelline, qui régulent la croissance et le développement des plantes (Glick, 2012) et **la stimulation du développement racinaire**, augmentant ainsi la surface d'absorption des nutriments.

Les mécanismes indirects consistent à **protéger les plantes contre divers stress biotiques et abiotiques**, favorisant leur croissance de manière indirecte par : **la production d'antibiotiques, de sidérophores et de composés antifongiques**, inhibant la croissance de pathogènes (Compant et al., 2005) ; **la compétition pour les niches écologiques et les nutriments dans la rhizosphère** (Beneduzi et al., 2012) ; **l'induction de la résistance systémique acquise (ISR)**, préparant les plantes à mieux se défendre contre les agents pathogènes (Pieterse et al., 2014) ; **La dégradation de l'éthylène de stress** par l'enzyme ACC désaminase, contribuant à une meilleure tolérance aux stress environnementaux (Glick, 2014).

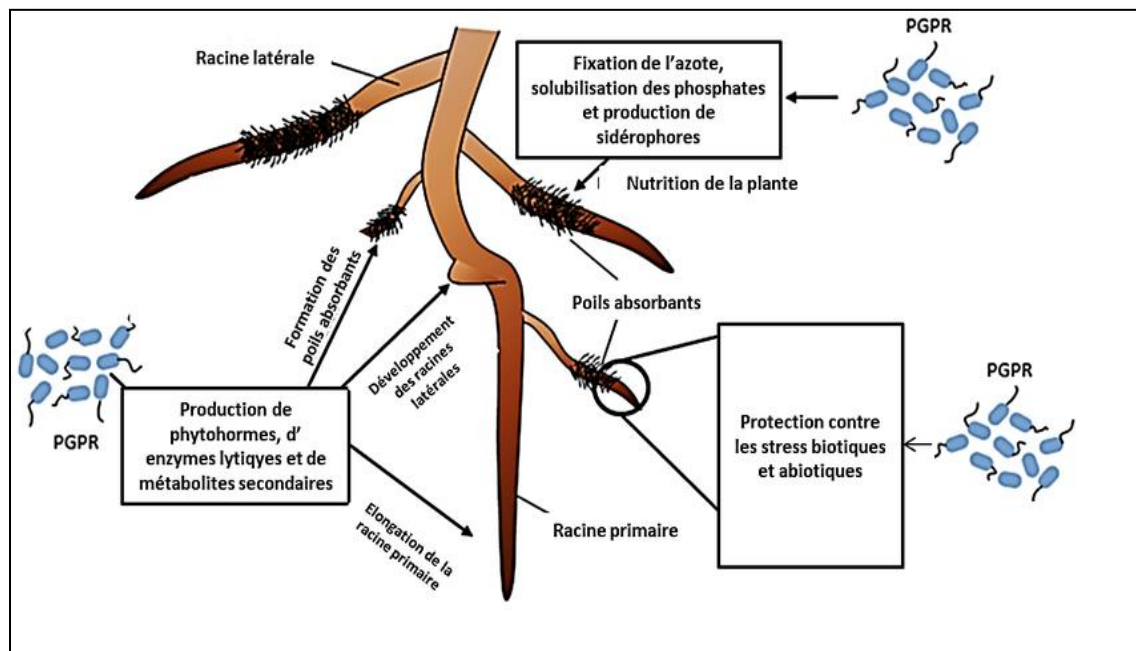


Figure I-2: Les différents mécanismes d'action des PGPR (BOURLES, 2019).

### **I.3.2. Effet des PGPR sur la croissance du Blé dur**

Les rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR) ont une influence positive marquée sur le développement du blé dur, surtout en présence de stress abiotiques tel que la salinité. L'inoculation de graines ou de plants de blé dur avec des souches PGPR comme *Bacillus subtilis* ou *Pantoea agglomerans* améliore considérablement les caractéristiques morphologiques, y compris la longueur des racines, la biomasse foliaire et racinaire, ainsi que le contenu en chlorophylle (Saadaoui et Silini, 2023). Ces bactéries contribuent également à une meilleure absorption des nutriments via la fixation biologique de l'azote, la solubilisation du phosphore et la génération d'hormones végétales telles que l'acide indole acétique (AIA), ce qui favorise le développement et la robustesse des jeunes plants (Fendi et al., 2019).

### **I.4. Généralité sur la Proline**

La proline est un acide aminé non essentiel, unique par sa structure cyclique, qui joue un rôle crucial dans la stabilité des protéines et les réponses physiologiques des plantes face aux stress abiotiques. Elle s'accumule de manière significative dans les tissus végétaux exposés à des conditions environnementales défavorables, telles que la salinité, la sécheresse ou le froid, agissant comme un osmoprotecteur, un stabilisateur des structures macromoléculaires et un piègeur de radicaux libres (Szabados & Saviouré, 2010).

#### **I.4.1. Rôle physiologique de la proline dans la réponse des plantes au stress**

Face à des stress abiotiques tels que le déficit hydrique et la salinité, une accumulation significative de proline est généralement observée dans les feuilles et les racines du blé dur. Cette accumulation peut atteindre un niveau 12 à 15 fois supérieur à celui initial, selon les variétés de blé et l'intensité du stress subi.

La proline occupe une place centrale dans la réaction des plantes face aux stress abiotiques, tels que le stress salin et hydrique. En tant que osmolyte compatible, elle participe à l'osmoprotection en conservant l'équilibre osmotique à l'échelle cellulaire, ce qui prévient la déshydratation des cellules et maintient leur turgescence (Ashraf & Foolad, 2007 ; Szabados & Saviouré, 2010). De plus, la proline contribue à la stabilisation des membranes cellulaires, atténuant les dégâts provoqués par la salinité ou le manque d'eau en préservant la structure des membranes lipidiques et protéiques (Verbruggen & Hermans, 2008). Elle fonctionne aussi comme une réserve d'azote disponible après l'épisode de stress, tout en intervenant dans la régulation du pH cytoplasmique et contribuant ainsi à l'équilibre cellulaire (Kavi Kishor et al.,

2005). Grâce à ses diverses fonctions, la proline est un élément essentiel pour l'adaptation des plantes aux conditions environnementales difficiles.

#### **I.4.2. Effet de la proline sur la croissance du blé dur en condition du stress salin**

La proline contribue à la stabilisation des structures cellulaires, à l'osmorégulation et à la neutralisation des espèces réactives de l'oxygène générées par le stress salin (Szabados & Savouré, 2010). Son implication dans le maintien de la croissance végétale sous des conditions défavorables en fait un marqueur physiologique pertinent pour l'évaluation de la tolérance au sel chez le blé dur.

Tableau I-2: Effets de l'application de la proline sur le blé dur soumis au stress salin.

| Paramètre                        | Effet du stress salin sur le blé dur                                                                                                  | Rôle de la proline                                                                                                                               | Observations spécifiques                                                                                                                                                  |
|----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Croissance végétative</b>     | Réduction de la vitesse d'expansion foliaire et de la croissance générale (longueur, diamètre, masse sèche) (Bouldroua Khalida, 2023) | La proline s'accumule dans les tissus pour protéger les cellules contre la déshydratation et le stress osmotique (M'barek Ben Naceur et al.2001) | L'accumulation de proline est plus marquée dans les variétés tolérantes, corrélée à une meilleure croissance relative sous stress Djerbi, 2017)                           |
| <b>Tolérance au stress salin</b> | Variabilité génétique : certaines variétés résistent mieux au stress salin (Bouldroua Khalida, 2023)                                  | La proline agit comme osmoprotecteur, stabilisant membranes et protéines, réduisant le stress oxydatif (ASJP, 2023)                              | Variétés comme « Waha », « Vitron », « Simito » montrent une accumulation de proline associée à une meilleure germination et croissance (M'barek Ben Naceur et al., 2001) |
| <b>Germination</b>               | Diminution du taux de germination avec augmentation de la salinité (Khoudour & Mebarek, 2023)                                         | La proline contribue à la protection des graines et à la viabilité lors de la germination sous stress (Bouldroua Khalida, 2023)                  | Le blé dur est plus sensible que le blé tendre, mais la proline est un marqueur clé de résistance au niveau germinatif (ASJP, 2023)                                       |
| <b>Biomasse et matière sèche</b> | Diminution progressive de la matière sèche avec l'augmentation de la salinité (Bouldroua Khalida, 2023)                               | L'accumulation de proline aide à limiter la perte de biomasse en maintenant l'équilibre hydrique (Khoudour & Mebarek, 2023)                      | Étude comparant deux cultivars montre que la variété plus tolérante accumule plus de proline et maintient une meilleure biomasse (Djerbi, 2017)                           |
| <b>Réponse biochimique</b>       | Augmentation de la proline et autres osmolytes (glycine bêtaïne, etc.) (Sétif 1, 2021)                                                | La proline joue un rôle central dans la réponse biochimique au stress salin (ASJP, 2023)                                                         | La teneur en proline est utilisée comme indice de tolérance au stress salin et hydrique (Bouldroua Khalida, 2023)                                                         |

# CHAPITRE II : MATÉRIEL ET MÉTHODES

## Objectif de l'étude :

L'objectif de cette étude est d'évaluer les effets d'une souche PGPR ainsi que de l'application exogène de proline sur la croissance d'une variété de blé dur soumise à un stress salin.

L'expérimentation a été conduite au sein des laboratoires de microbiologie et d'amélioration des plantes, département de Biotechnologie et Agro-Écologie de l'Université Blida 1.

### II.1. Matériel Biologique

#### II.1.1. Souche bactérienne

Une souche bactérienne a été utilisée dans le cadre de notre expérimentation : il s'agit de *Bacillus subtilis* subsp. *spizizenii* ATCC 6633. Cette souche, considérée comme souche type de référence, est largement employée dans de nombreux travaux de recherche et protocoles expérimentaux (Kushwaha 2013 ; kundan et Pant, 2015 ; Patil et Solanki , 2016h , Park et al ., 2017) . Cette souche est reconnue pour ses effets bénéfiques en matière de biocontrôle et de stimulation de la croissance végétale. Elle se distingue également par sa capacité à renforcer la tolérance des plantes aux stress abiotiques, notamment salin et hydrique (Arvis et al ., 2008). La pureté de la souche a été vérifiée sur le milieu TSA en réalisant plusieurs repiquages successifs. La souche purifiée a été conservée à la température de 4°C.

#### II.1.2. Matériel végétal

L'expérimentation est menée sur des graines du blé dur ( *Triticum durum* Desf . ) , variété AMAR 06 , dont les graines proviennent de CCLS Blida (El-Affroun), ayant une pureté spécifique et une faculté germinative de 98 % . Cette variété présente les caractéristiques mentionnées dans les tableaux ci-dessous (ITGC), (Tableau 2 et 3) :

Tableau II-1: Caractéristiques morphologiques et culturales de la variété AMAR 06.

|                                    |                                                |
|------------------------------------|------------------------------------------------|
| Nom scientifique                   | <i>Triticum durum</i> Desf                     |
| variété                            | AMAR 06                                        |
| Type de plante                     | Céréale annuelle, plante herbacée              |
| Cycle végétatif                    | Semi-précoce à moyen (environ 120-130 jours)   |
| Taille de la plante                | Moyenne à grande (environ 80-100 cm)           |
| Nombre de talles                   | Moyen à élevé                                  |
| Feuilles                           | Longues, étroites, de couleur vert clair       |
| Epi                                | Allongé, dense, port dressé                    |
| Couleur de l'épi                   | Noir                                           |
| Hauteur de la plante à la maturité | moyenne à grande, autour de <b>80 à 100 cm</b> |
| Alter nativité                     | Automne                                        |
| Compacité de l'épi                 | Moyenne à élevée                               |

Tableau II-2: Résistance de variété AMAR 06 aux facteurs environnementaux et maladies.

| Résistance de la variété AMAR 06 aux facteurs environnementaux |                                               |
|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Au Froids                                                      | Résistant                                     |
| A la verse                                                     | Plus sensible                                 |
| A la sécheresse                                                | Tolérance modéré à bonne                      |
| Egrenage                                                       | Sensibilité variables                         |
| Gelées                                                         | Sensibilité élevée                            |
| Résistance de la variété AMAR 06 aux maladies.                 |                                               |
| Rouille jaune                                                  | Résistance modérée.                           |
| Rouille brune                                                  | Sensibilité modérée à élevée.                 |
| Piétin verse                                                   | Résistance faible à modérée.                  |
| Piétin échaudage                                               | Sensible dans des zones à forte humidité      |
| Oïdium                                                         | Résistance modérée                            |
| Septoriose                                                     | Résistance faible à modérée                   |
| Fusariose                                                      | Sensible avec une faible résistance naturelle |

Les graines utilisées dans notre expérimentation, ont été désinfectées par une solution d'hypochlorite de sodium (2.5%), pendant 10min, puis rincées à trois reprises à l'eau distillée stérile (figure03).



**Figure II-1: Désinfection des graines de blé dur (photo original, 2025).**

Les graines de blé préalablement désinfectées sont mises à germer dans des boîtes de Pétri de 90 mm de diamètre, à raison de dix graines par boîte, sur un papier absorbant préalablement humidifié. Après application des différents traitements, les boîtes sont placées dans une étuve maintenue à une température constante de 25 °C, dans des conditions d'obscurité totale (Figure 4).



**Figure II-2. Mise en germination des graines de blé (photo original, 2025).**

## II.2. Préparation de l'inoculum bactérien

Cette partie de l'étude a été menée au sein du laboratoire de microbiologie. Dans le cadre de cette expérience, une souche de *Bacillus subtilis* subsp. *spizizenii* (ATCC 6633) a été utilisée.

La préparation de l'inoculum bactérien a été effectuée selon la manière suivant :

- Versez le milieu TSA (Tryptic Soy Agar), préalablement préparé et stérilisé, dans des boîtes de Pétri, en effectuant cette opération à proximité d'un bec Bunsen afin de limiter les risques de contamination.
- À l'aide d'une anse stérile, ensemencez les colonies bactériennes sur le milieu TSA contenu dans les boîtes de Pétri, puis incubez-les à 37 °C pendant une durée de 24 à 36 heures (Figure 5).



**Figure II-3: Ensemencement bactérien (photo original, 2025).**

- Après incubation, l'inoculum a été préparé à partir de colonies distinctes et fraîchement identifiées. Les suspensions bactériennes ont été élaborées dans des flacons contenant de l'eau distillée stérile.
- La concentration bactérienne a été ajustée à  $10^7$  UFC/mL à l'aide d'un spectrophotomètre (Shimadzu), réglé à une longueur d'onde de 600 nm (Figure 6).



**Figure II-4: préparation de l'inoculum bactérien (photo original, 2025).**

L'inoculation des graines avec la souche de *Bacillus subtilis* a été effectuée avant la mise en germination, à l'aide d'une seringue contenant entre 15 et 20 mL de la suspension bactérienne.

### **II.3. Préparation de la solution saline et de la solution de proline**

Afin d'évaluer la tolérance des graines de blé inoculées au stress salin en présence de proline exogène, deux concentrations distinctes de NaCl ainsi que deux doses de proline ont été utilisées (figure 7).

#### **Solution saline :**

- 75 mM/L : dissolution de 4.38g de NaCl dans 1L d'eau distillé.
- 100 mM/L : dissolution de 5.84g de NaCl dans 1L d'eau distillé.

#### **Solution de la proline :**

- 25 mM/L : dissolution de 28.78mg/L dans 1L d'eau distillée.
- 50 mM/L : dissolution de 57.56 mg/L dans 1L d'eau distillée.



**Figure II-5: préparation de la solution saline et de la solution de proline.**

#### **II.4. Différents traitements étudiés**

En fonction de l'inoculation bactérienne, de la concentration en NaCl appliquée et de la dose de proline testée, seize traitements expérimentaux ont été évalués :

- **T0** : graines témoins, non bactérisées, non stressées, sans proline.
- **T0'** : graines bactérisées, non stressées, sans proline.
- **T0''** : graines non bactérisées, non stressées, avec 25mM/l de proline.
- **T0'''** : graines non bactérisées, non stressées, avec 50mM/l de proline.
- **T1** : graines non bactérisées, sans proline, stressées avec 50mM/l de NaCl.
- **T2** : graines bactérisées, sans proline, stressées avec 50mM/l de NaCl.
- **T3** : graines non bactérisées, stressées avec 50mM/l de NaCl, avec 25mM/l de proline.
- **T4** : graines non bactérisées, stressées avec 50mM/l de NaCl, avec 50mM/l de proline.
- **T5** : graines bactérisées, stressées avec 50mM/l de NaCl, avec 25mM/l de proline.
- **T6** : graines bactérisées, stressées avec 50mM/l de NaCl, avec 50mM/l de proline.
- **T7** : graines non bactérisées, sans proline, stressées avec 100mM/l de NaCl.
- **T8** : graines bactérisées, sans proline, stressées avec 100mM/l de NaCl.
- **T9** : graines non bactérisées, stressées avec 100mM/l de NaCl, avec 25mM/l de proline.
- **T10** : graines non bactérisées, stressées avec 100mM/l de NaCl, avec 50mM/l de proline.
- **T11** : graines bactérisées, stressées avec 100mM/l de NaCl, avec 25mM/l de proline.
- **T12** : graines bactérisées, stressées avec 100mM/l de NaCl, avec 50mM/l de proline.

## II.5. Paramètres étudiés

Afin d'évaluer les effets de la bactérisation et de la Proline exogène sur la tolérance des plants de blé dur au stress salin, nous avons mesuré les paramètres morphologiques et physiologiques suivants après une semaine de l'application du stress salin et du traitement à la proline:

### II.5.1. Longueur des parties aérienne et racinaire

Les longueurs des parties aériennes et racinaires ont été estimées pour les plantules de chaque traitement étudié à la fin de l'expérimentation. Les mesures ont été effectuées en (cm) à l'aide d'une règle graduée (Figure 8).

### II.5.2. Biomasse fraîche (poids frais) des racines et des feuilles

Ce paramètre consiste à mesurer le poids (en gramme) des différentes parties fraîches (aériennes et racinaires) de chaque traitement et à la fin de l'expérimentation à l'aide d'une balance de précision (Figure 8).



Figure II-6: Poids et longueur des parties aériennes et racinaires (photo original, 2025).

### II.5.3. Teneur en chlorophylle

Dans nos tests expérimentaux, les taux de chlorophylle ont été déterminés en unité de SPAD à l'aide d'une chlorophylle mètre, modèle MINOLTA de type SPAD-502. Le "Chlorophyll Meter SPAD-502 Plus" est un instrument qui mesure la teneur en chlorophylle directement sur les feuilles des plantes et indique la valeur SPAD en analysant la lumière rouge et proche infrarouge transmise par les feuilles. SPAD est l'abréviation de « Soli And Plant

Analyse Développements » Le SPAD donne une mesure numérique comprise entre 0,0 et 99,9 (unités SPAD), qui est liée à la teneur en chlorophylle, elle-même liée à la teneur en azote. En forme de pince à épiler, l'appareil est facile à utiliser, il suffit de le fixer sur les tissus des feuilles pour lire la teneur en chlorophylle (Figure09).



**Figure II-7: Mesure de la chlorophylle (photo original, 2025).**

#### **II.5.4. Taux de germination G%**

Le taux de germination est exprimé comme suit (G%):

$$G\% = (n/N) \times 100$$

Où **n** représente le nombre de graines germées à la fin de l'expérience, et **N** le nombre total de graines semées.

#### **II.5.5. Vitesse de germination GP %**

$$GP = N / (\sum(n \times g)) \times 100$$

Où:

- **N** est le nombre total de graines germées à la fin de l'expérience,
- **n** est le nombre de nouvelles graines germées à un jour donné **g** (1, 2, 3, ...).

#### **II.5.6. Indice de tolérance de germination (DTI G %)**

Cet indice est calculé uniquement pour les traitements soumis au stress.

La formule utilisée est la suivante :

$$DTI\ G\ \% = [G\ \% \text{ (traitement stressé)}] / [G\ \% \text{ (témoin T0)}]$$

**II.5.7. Indice de tolérance de la vitesse de germination (DTI GP %)**

Seuls les traitements soumis au stress sont pris en compte.

L'indice de tolérance est calculé selon la formule suivante :

$$\text{DTI GP \%} = (\text{GP \% des traitements stressés}) / (\text{GP \% du témoin T0})$$

**II.5.8. Réduction du pourcentage de germination (G %)**

La réduction est calculée selon la formule suivante :

$$\text{Réduction} = \text{G \% (témoin)} / \text{G \% (traitement sous stress)}$$

**II.5.9. Réduction de la vitesse de germination (GP %)**

La réduction est calculée selon la formule suivante :

$$\text{Réduction} = \text{GP \% (témoin)} / \text{GP \% (traitement sous stress)}$$

**II.6. Analyses statistiques**

Les résultats obtenus ont été traités par analyse de la variance multifactorielle avec le logiciel STATGRAPHICS-Centurion XVI (version 16.1.18) et les moyennes significativement différentes ont été séparées par le test de Fisher (LSD) au seuil de probabilité de 5%.

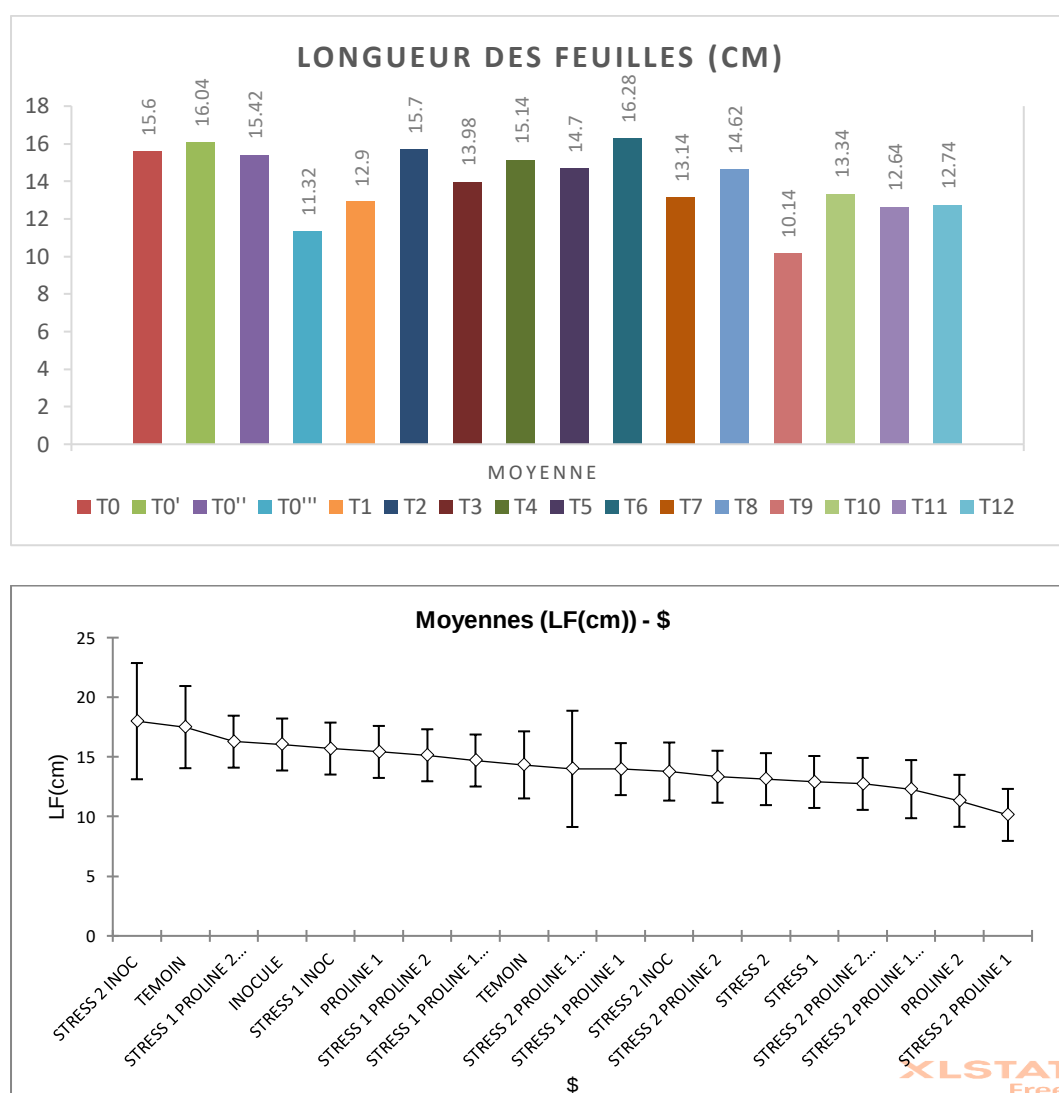
# CHAPITRE III : RÉSULTAT ET DISCUSSION

### III.1. Longueur de la partie aérienne et racinaire

#### III.1.1. Partie aérienne

Les résultats correspondants à la longueur des feuilles de blé dur sous l'effet de stress salin et de proline exogène pour les plantules témoins et inoculés sont représentés dans la figure 10. Les différentes mesures des longueurs des feuilles indiquent quelques variations entre les plantules inoculées, sous l'effet de proline exogène et NaCl et leurs témoins respectifs.

Les meilleures valeurs en longueur des feuilles ont été enregistrées chez les plantules bactériées, stressées avec 50mM/l de NaCl et avec un apport de 50mM/l de proline T6 (16,28cm) par rapport au témoin stressé non inoculé T1 (12.9cm).

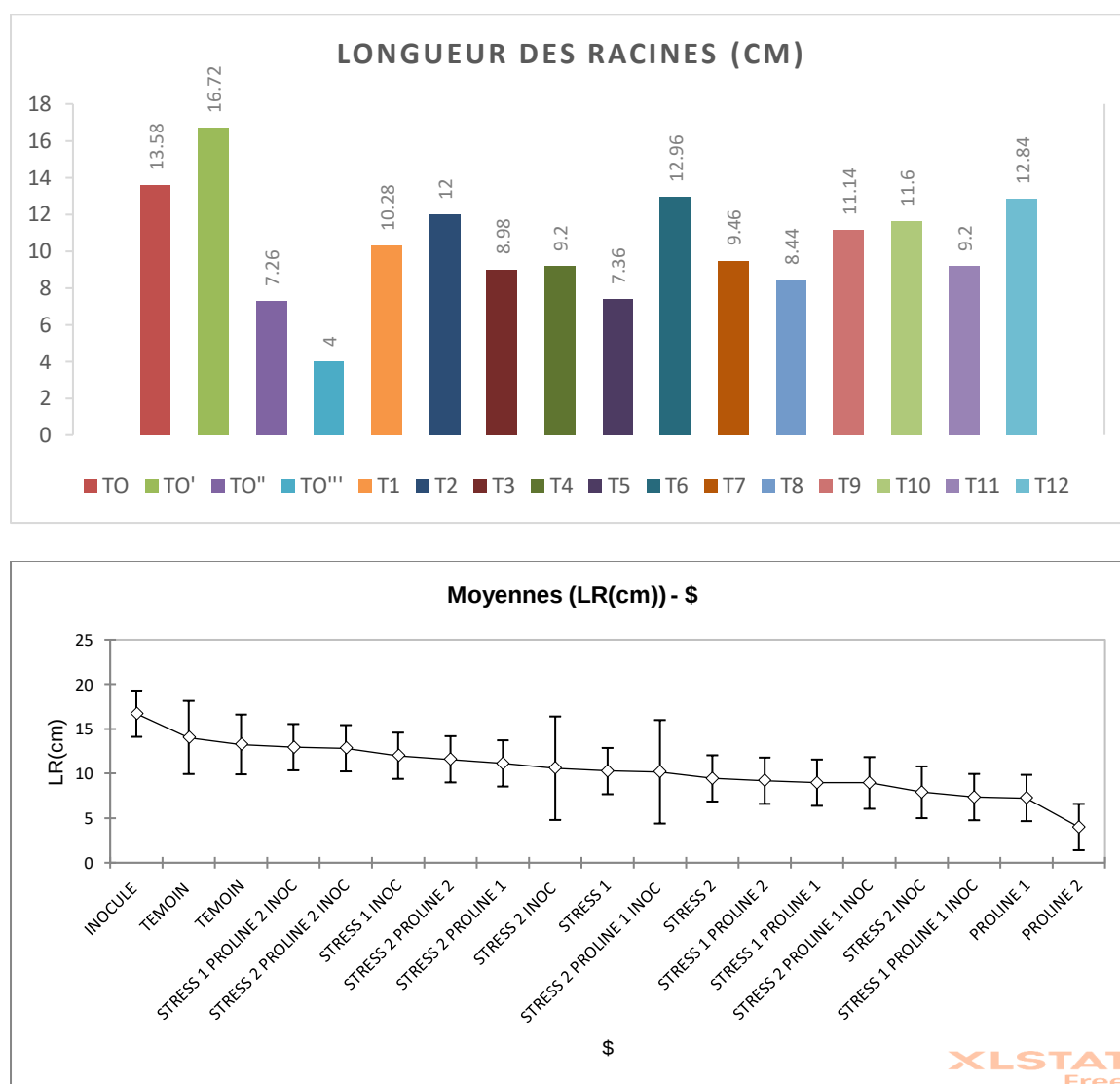


**Figure III-1: La variation de la longueur de la partie aérienne des plantules témoins et inoculées, sous l'effet de la proline exogène et du stress salin. .**

### III.1.2. Partie racinaire

La figure 11 illustre les variations de la longueur racinaire des plantules de blé dur soumises à un stress salin, avec ou sans application exogène de proline, inoculés ou non par la souche *Bacillus subtilis*. L'analyse de la variance montre un effet hautement significatif entre les différents traitements étudiés ( $p=0,0001$ ).

Les meilleures valeurs en longueur racinaire ont été obtenues par les plantules bactériées, non stressées et sans proline (T0') par rapport aux autres traitements, ainsi, les plantules soumises au stress, inoculées et traitées à la proline présentent les meilleures performances en termes de longueur racinaire, comparativement aux plantules inoculées et stressées sans application de proline, ainsi qu'à celles non inoculées, stressées mais traitées à la proline.



**Figure III-2: La variation de la longueur racinaire des plantules témoins et inoculées, sous l'effet de la proline exogènes et du stress salin.**

## III.2. Poids Frais de la partie aérienne et racinaire

### III.2.1. Poids frais de la partie aérienne

D'après les résultats obtenus représenté dans la figure 12 pour la variation du poids frais des feuilles (g) des plantules inoculés sous l'effet du stress salin et de la proline exogène. Une augmentation du poids a été observée chez les plantules inoculées avec la souche *Bacillus subtilis*, soumises à un stress salin et traitées à la proline, comparativement aux témoins inoculés recevant une quantité moindre de proline exogène.

L'analyse de la variance révèle un effet très hautement significatif ( $p = 0,0001$ ). Les meilleures performances en termes de poids frais des feuilles ont été observées chez les plantules bactérisées, stressées avec 50mM/l de NaCl et avec 25mM/l de proline (T5), comparativement aux témoins non inoculés et non stressés.

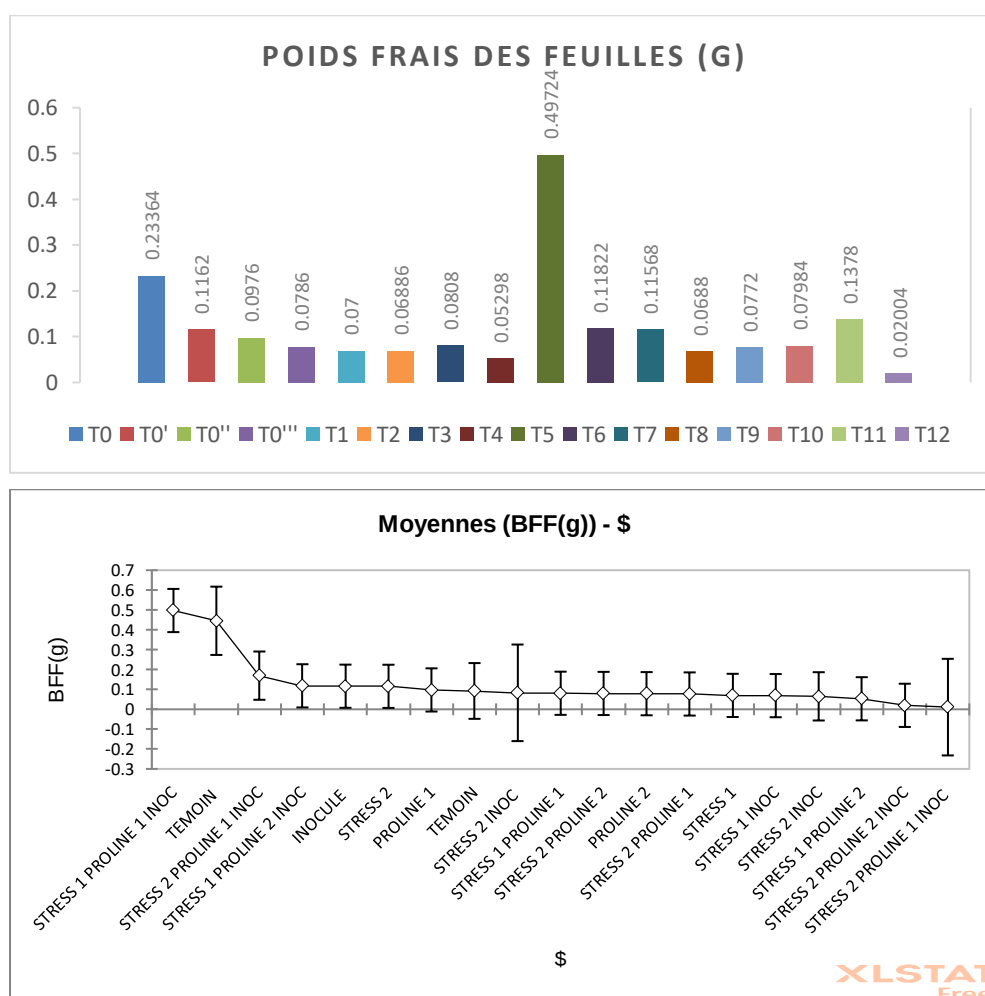


Figure III-3: La variation du poids frais des plantules témoins et inoculées, sous l'effet de la proline exogène et du stress salin.

### III.2.2. Poids frais de la partie racinaire

L'analyse des variations du poids frais des racines (en grammes) révèle un effet hautement significatif ( $p = 0,0001$ ) des différents traitements appliqués. Les performances racinaires les plus élevées en termes de poids frais ont été enregistrées chez les plantules bactérisées, stressées avec 100mM/l de NaCl et traitées avec 25mM/l de proline (T11), par rapport aux témoins et aux autres traitements (Figure 13).

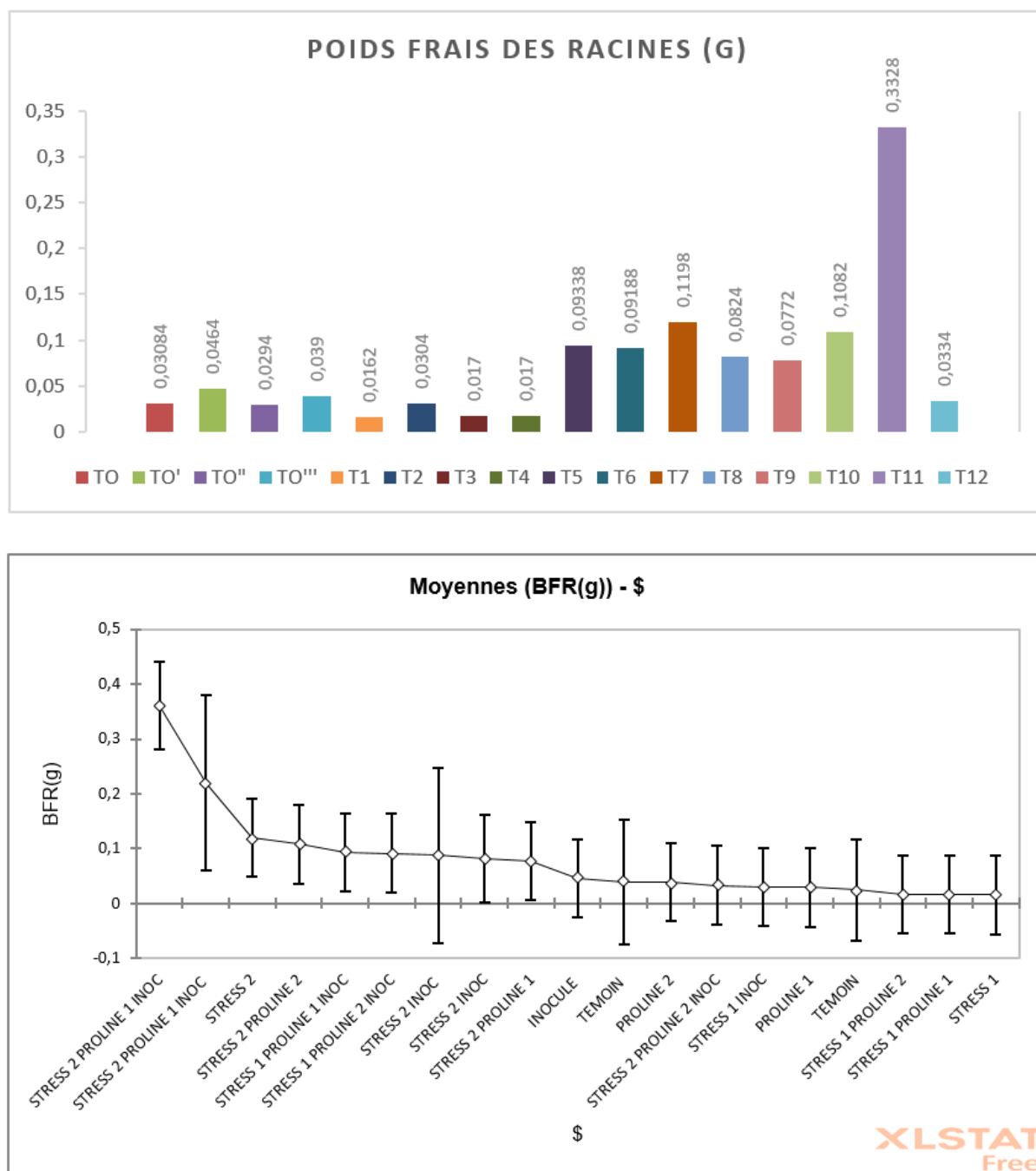


Figure III-4: La variation du poids frais racinaire des plantules témoins et inoculées, sous l'effet de la proline exogène et du stress salin.

### III.3. Teneur de Chlorophylle

La bactérisation des graines de blé avec la souche *Bacillus subtilis* a révélé des taux plus ou moins appréciables en chlorophylle mesuré en SPAD (Figure 14). Les résultats obtenus montrent une meilleure teneur en chlorophylle enregistrée chez les plantules bactérisées, stressées avec 50mM/l de NaCl et traitées avec 25mM/l de proline par rapports aux plantules autres traitements témoins et bacterisés.

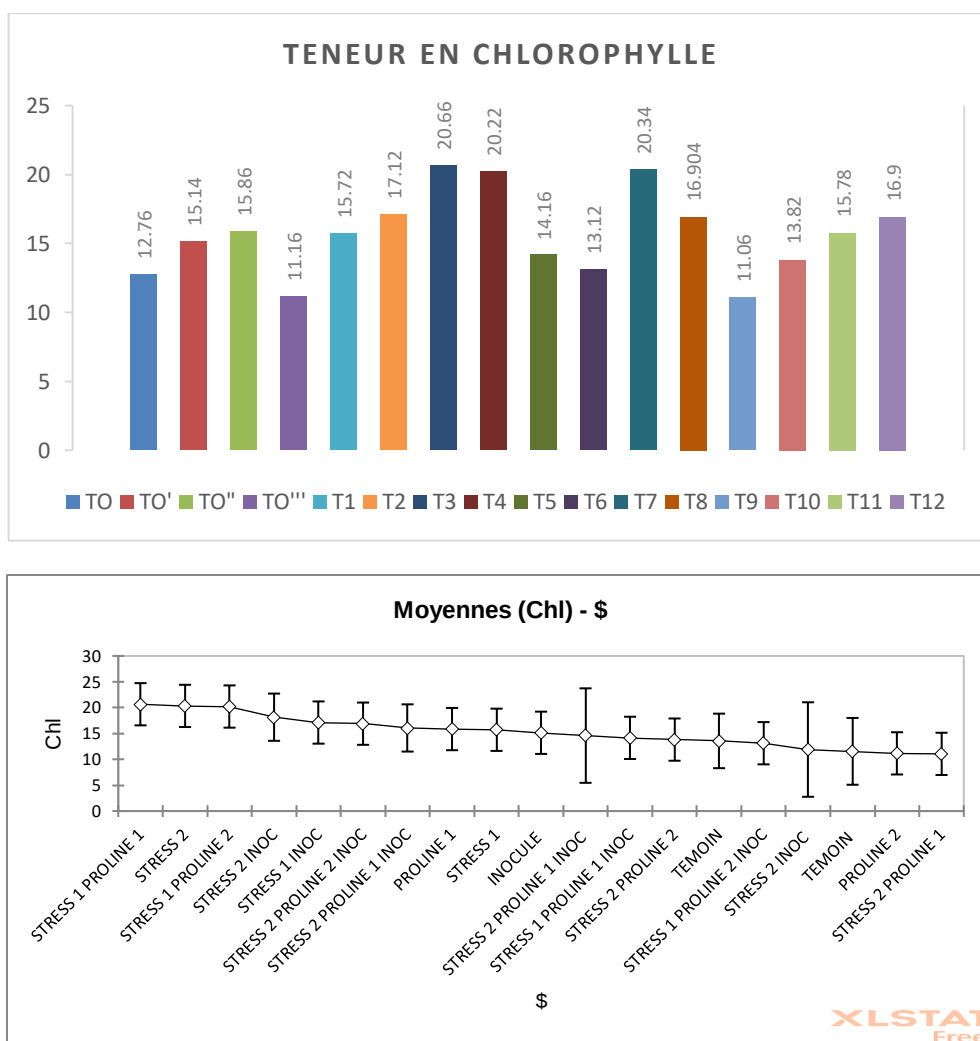
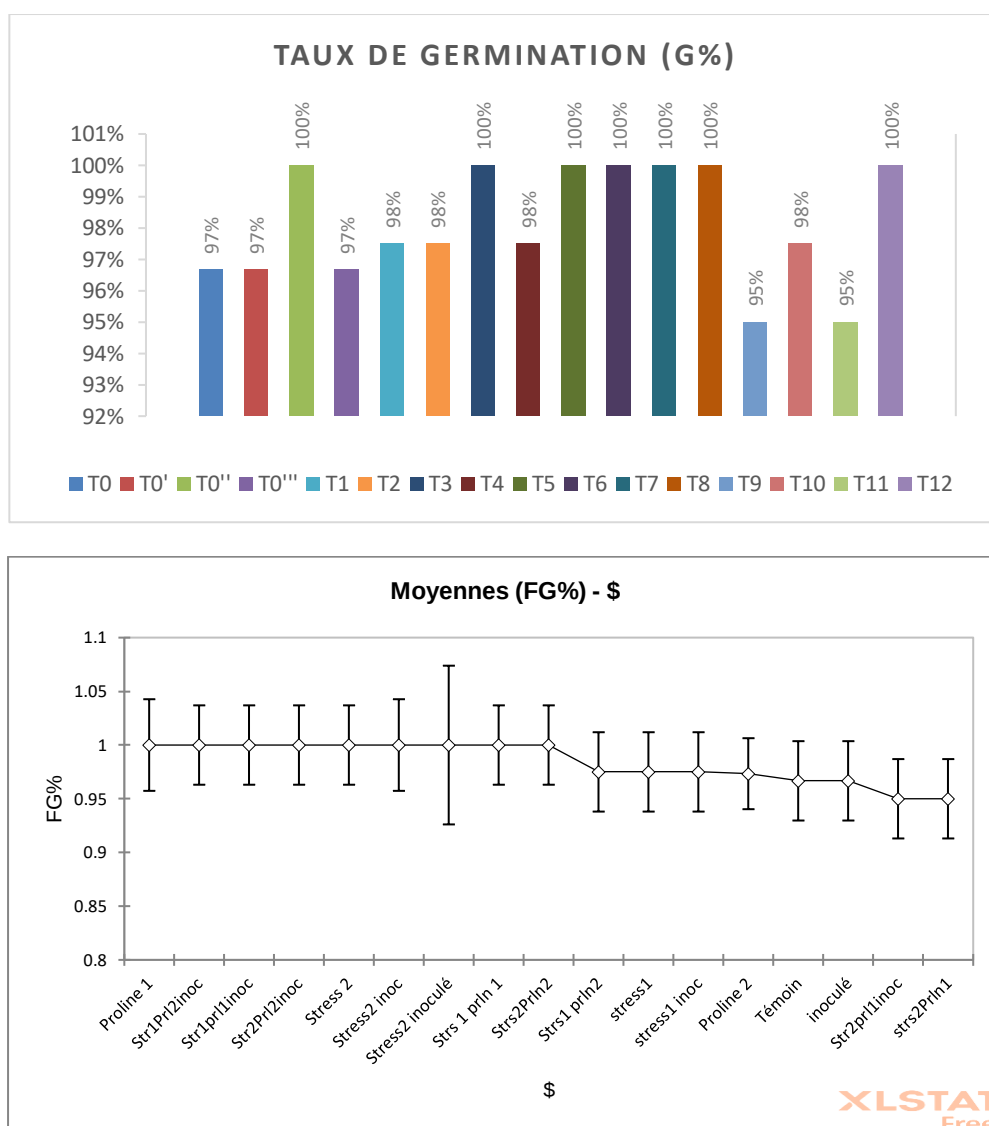


Figure III-5: La variation de la teneur en Chlorophylle des plantules témoins et Inoculées, sous l'effet de la proline exogène et du stress salin.

### III.4. Taux de Germination (G%)

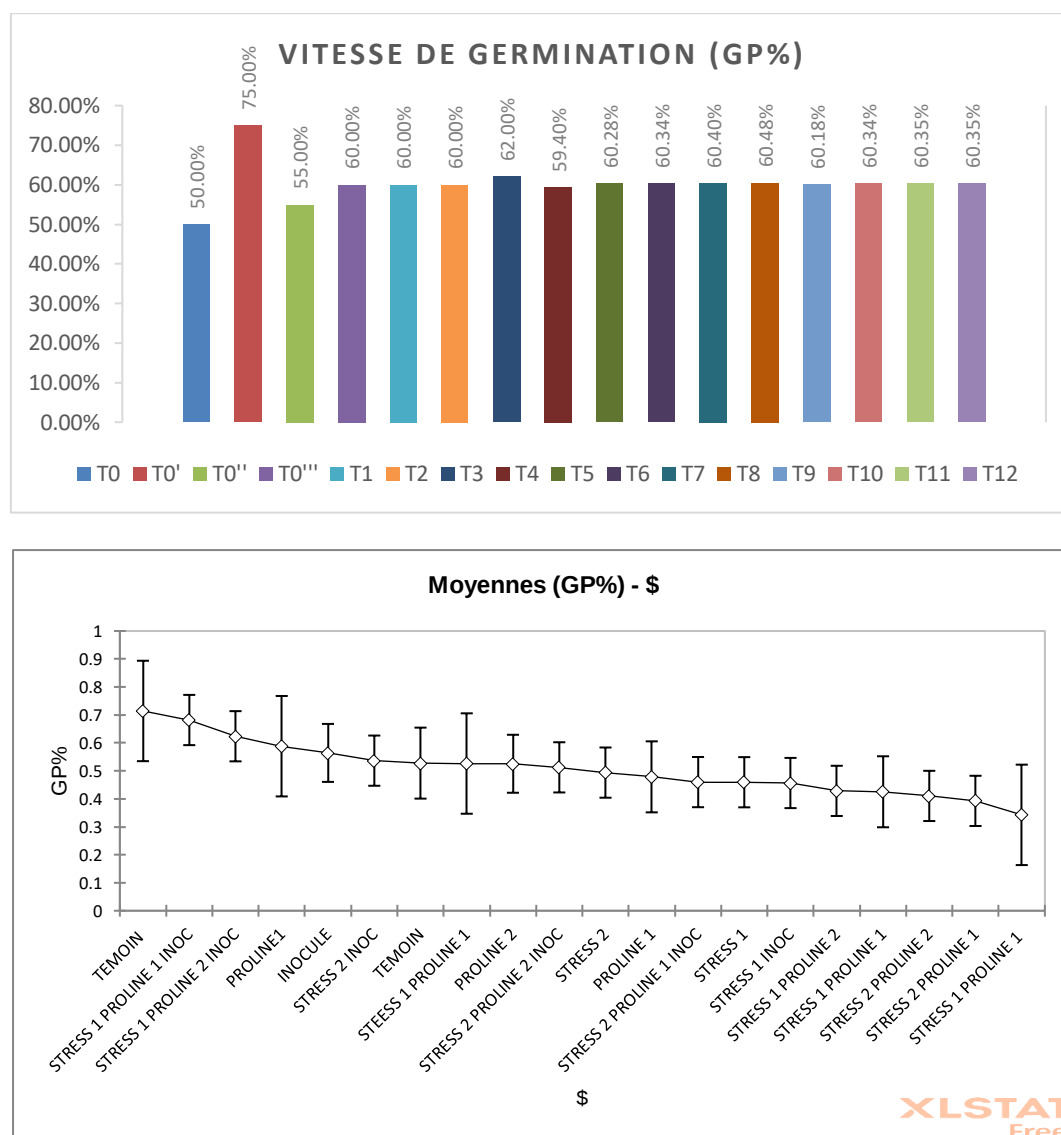
Les résultats relatifs au taux de germination du blé dur soumis au stress salin et au traitement par proline exogène, tant chez les graines témoins que chez les graines inoculées, sont présentés dans la figure 15. Les différentes valeurs enregistrées mettent en évidence une certaine variation du taux de germination entre les graines inoculées exposées à la proline et au stress salin, et leurs témoins respectifs. L'application de proline exogène à une concentration de 25 mL/L semble atténuer les effets délétères du stress salin sur la germination. L'ensemble des traitements combinant un stress salin (50 à 100 mM/l) avec une application de proline exogène (25 à 50 mL/L), chez des graines inoculées, a permis d'atteindre un taux de germination optimal de 100 %.



**Figure III-6: La variation de taux de germination des graines témoins et inoculées, sous l'effet de la proline exogène et du stress salin.**

### III.5. La vitesse de germination (GP%)

La figure 16 illustre la variation de la vitesse de germination des graines témoins et inoculées, soumises à l'effet combiné de la proline exogène et du stress salin. Les différents pourcentages de germination observés révèlent une certaine fluctuation selon les traitements appliqués. La vitesse de germination la plus élevée a été enregistrée chez les graines inoculées, non soumises au stress salin et non traitées à la proline.



**Figure III-7: La variation de la vitesse de germination des graines témoins et inoculées, sous l'effet de la proline exogène et du stress salin.**

### III.6. Indice de tolérance à la germination (DTI G%) et à la vitesse de germination (DTI GP%)

#### III.6.1. Indice de tolérance à la germination DTI G%

La variation de l'indice de tolérance à la germination des graines témoins et de celles inoculées par *Bacillus subtilis* sous l'effet du stress salin est illustrée dans la figure 17. L'analyse de la variance révèle l'absence de différence significative entre les traitements appliqués ( $p = 0,434$ ). Les traitements soumis au stress salin avec les deux concentrations de NaCl présentent une tolérance comparable à celle des témoins non stressés. Les graines les plus tolérantes au stress salin correspondent aux traitements T1, T2 et T4, tandis que les plus sensibles sont associées au traitement T10.

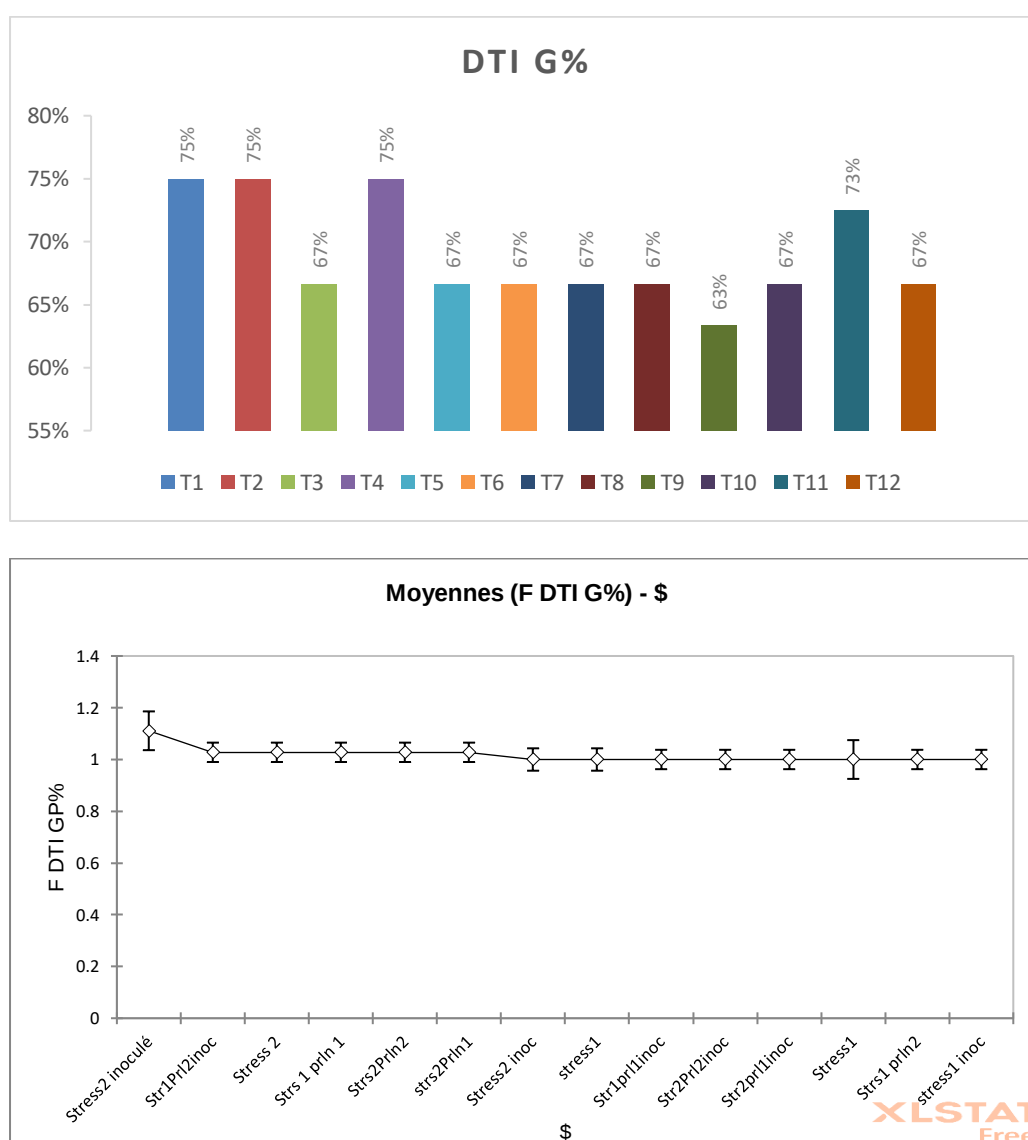
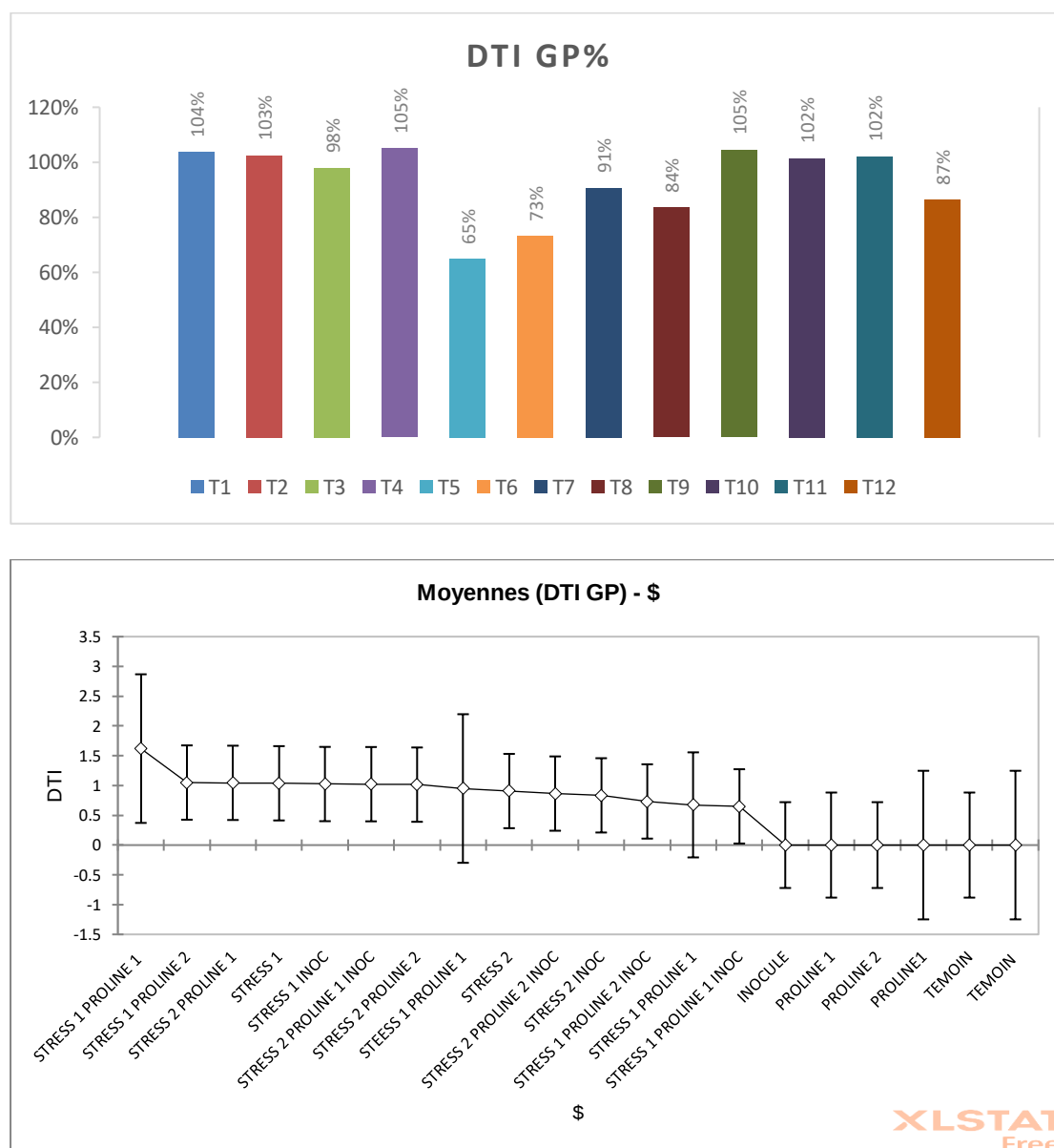


Figure III-8: La variation d'indice de tolérance à la germination des graines témoins et stressées.

### III.6.2. Indice de tolérance à la vitesse de germination DTI GP%

L'analyse de la variation de l'indice de tolérance à la vitesse de germination (DTI GP%) révèle l'absence de différence significative ( $p = 0,214$ ). Les résultats obtenus montrent une proximité des pourcentages de tolérance des graines de blé dur au stress salin en ce qui concerne leur vitesse de germination. Le pourcentage le plus élevé a été enregistré chez les traitements soumis au stress salin (100 mM/L) ainsi qu'à l'application de proline (50 mM/L).



**Figure III-9: La variation d'indice de tolérance à la vitesse de germination de graines témoins et stressées.**

### III.7. Réduction de taux germination et de la vitesse de germination

#### III.7.1. Réduction de taux de germination G%

L'analyse de la variation de la réduction du taux de germination (G%) révèle l'absence de différence significative ( $p = 0,599$ ). Les résultats obtenus montrent une amélioration de la germination dans l'ensemble des traitements, notamment pour les traitements T3, T5, T6, T7, T8 et T12, qui se distinguent favorablement par rapport aux autres.

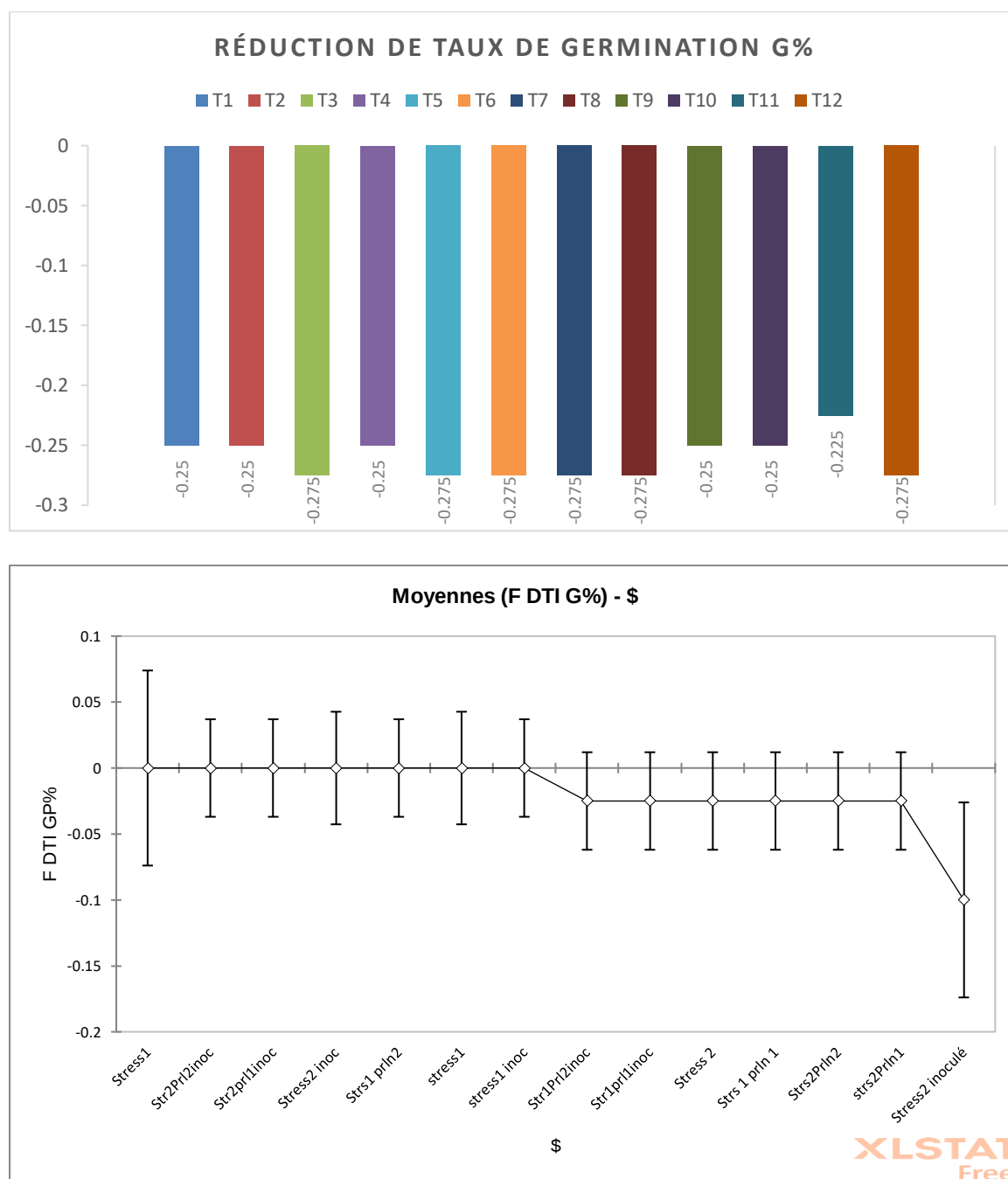


Figure III-10: La variation de réduction de taux de germination des graines témoins et stressées.

### III.7.2. Réduction de la vitesse de germination GP%

L'analyse de la variation de la réduction du pourcentage de la vitesse de germination (GP%) montre qu'il n'existe aucune différence significative ( $p = 1,000$ ), comme illustré à la figure 20. Quelle que soit la nature du traitement (témoin ou soumis au stress), une diminution de la vitesse de germination est observée dans l'ensemble des cas.

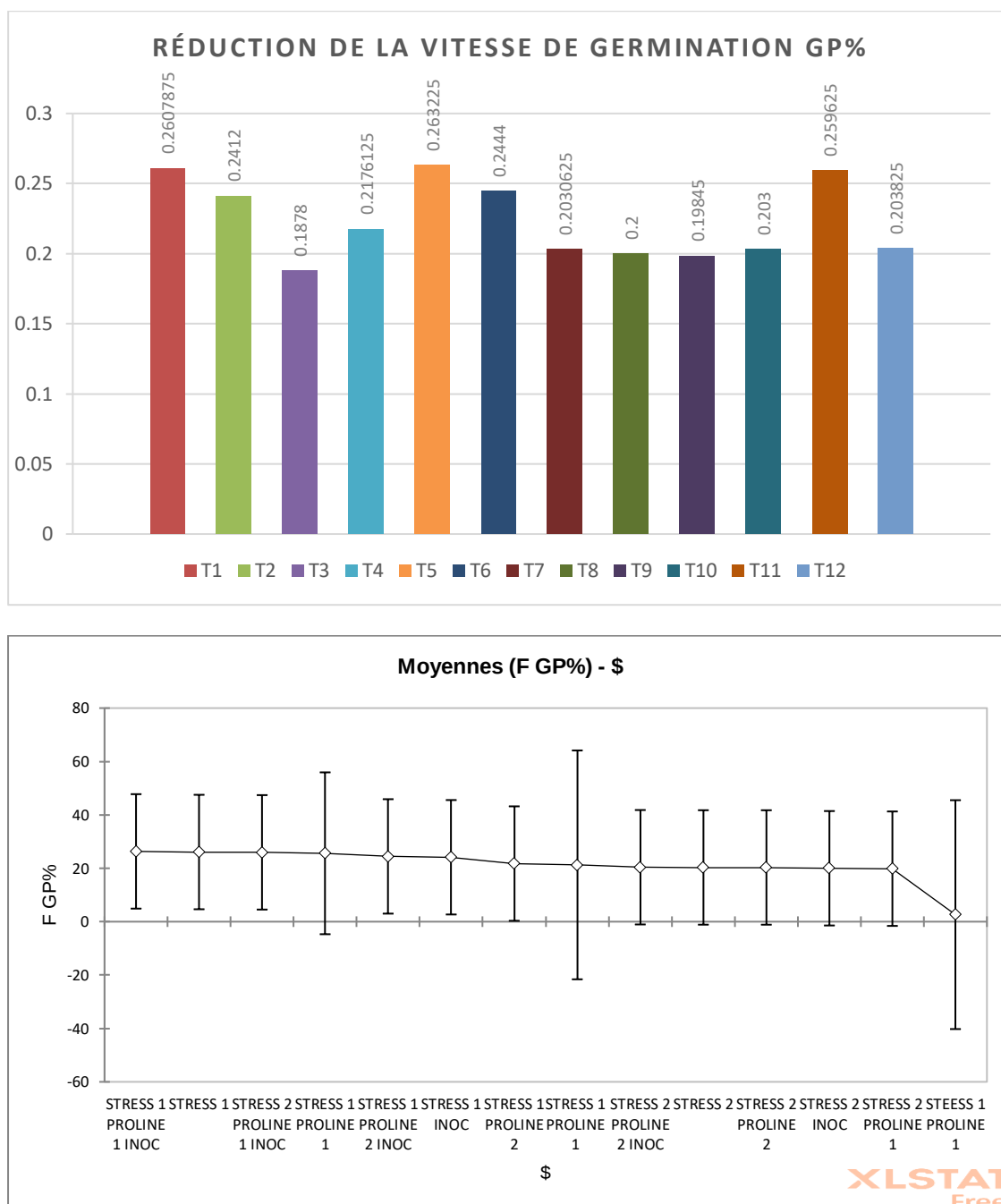


Figure III-11: La variation de réduction de la vitesse de germination des graines témoins et stressés.

### III.8. Discussion générale

La rhizosphère représente un milieu privilégié pour le développement d'une diversité de micro-organismes, en particulier les bactéries promotrices de la croissance des plantes (PGPR). Ces dernières interagissent étroitement avec les exsudats racinaires et établissent des relations bénéfiques avec les plantes, tant de manière directe qu'indirecte, contribuant ainsi à l'optimisation de leur croissance.

Cette étude vise à évaluer les effets bénéfiques potentiels de la souche bactérienne *Bacillus subtilis* subsp. *spizizenii* ATCC 6633 sur la croissance et la tolérance au stress salin d'une variété de blé dur (*Triticum durum*) dans des conditions expérimentales contrôlées. Les essais ont été menés en présence de différentes concentrations de sel (75 mM et 100 mM NaCl), ainsi que de proline appliquée également à des concentrations variables (25 mM et 50 mM).

La salinité constitue un facteur abiotique majeur limitant la croissance et la productivité des plantes. Elle engendre un stress osmotique initial, réduisant l'absorption de l'eau par les racines, suivi d'un stress ionique causé par l'accumulation excessive de sodium ( $\text{Na}^+$ ) et de chlorure ( $\text{Cl}^-$ ) dans les tissus, altérant les fonctions cellulaires et les processus métaboliques (Munns & Tester, 2008). Ce double stress perturbe la photosynthèse, diminue la conductance stomatique et provoque une accumulation de composés réactifs de l'oxygène (ROS), entraînant des dommages oxydatifs (Parida & Das, 2005). De plus, la salinité interfère avec l'absorption des éléments nutritifs essentiels, notamment le potassium ( $\text{K}^+$ ), compromettant ainsi la nutrition minérale de la plante. Ces déséquilibres physiologiques se traduisent par une réduction de la croissance, du développement racinaire, et de la biomasse totale (Zhu, 2001).

La proline agit en tant qu'osmolyte compatible, jouant un rôle essentiel dans le maintien de l'équilibre osmotique au niveau cellulaire. Elle contribue à la protection des membranes cellulaires et à la réduction des dommages oxydatifs induits par le stress salin. Par ailleurs, elle intervient dans la régulation des processus physiologiques des plantes, en facilitant notamment la conservation de l'humidité et en améliorant la viabilité des graines en conditions de stress (ASJP, 2023 ; Bekka Selma, 2022).

L'influence de la proline sur la croissance du blé dur, notamment au stade de la germination sous conditions de stress salin, a été largement étudiée. Il est établi que le stress salin entraîne une diminution significative du taux de germination, de la longueur des racines et des feuilles, ainsi que de la biomasse des plantules de blé dur (Aidaoui & Mouasse, 2013 ; Bouzegag-

Hamadou, 2021). En réaction à ce stress, une accumulation accrue de proline est généralement observée dans les tissus végétaux, en particulier chez les génotypes plus tolérants tels que Virton et Simeto. Cette accumulation est positivement corrélée à une amélioration de la capacité de germination et de croissance des plantules (Aidaoui & Mouasse, 2013 ; Djahra et al., 2015).

La présente étude a mis en évidence une amélioration significative de la croissance des plants de blé inoculés avec *Bacillus subtilis* et soumis à un stress salin. Ces résultats corroborent les travaux antérieurs ayant démontré les effets bénéfiques des PGPR (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria) sur le développement végétal en conditions de salinité (Akram et al., 2016 ; Barra et al., 2016 ; Abdellah et al., 2018). Ils suggèrent ainsi que ces micro-organismes peuvent contribuer à atténuer les effets délétères du sel sur la productivité agricole.

Les rhizobactéries promotrices de la croissance des plantes (PGPR) jouent un rôle clé dans l'atténuation des effets du stress salin chez les plantes. Elles améliorent la croissance végétale en stimulant la germination, la croissance racinaire, et l'absorption des nutriments, tout en réduisant l'accumulation de sodium dans les tissus végétaux. Ces bactéries exercent leurs effets bénéfiques par divers mécanismes, notamment la production de phytohormones, la solubilisation du phosphore, et la régulation de l'équilibre ionique. De plus, elles renforcent la tolérance au stress en induisant la production d'antioxydants et en modulant les réponses physiologiques des plantes (Egamberdieva et al., 2017).

Il est probable que la sécrétion d'auxine par ces souches bactériennes contribue à une croissance végétale accrue ainsi qu'à une meilleure tolérance au stress salin. L'acide indole-3-acétique (IAA), une hormone végétale également qualifiée de régulateur de croissance, est bien connu pour son rôle dans la promotion du développement des racines latérales à différents stades de croissance. Par ailleurs, il a été démontré que cette phytohormone peut pénétrer dans les cellules végétales et stimuler leur développement (Antoun et Prévost, 2005). En situation de stress, l'inoculation de PGPR (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria) au niveau des racines permettrait d'atténuer les effets néfastes de ces conditions grâce à la production de cytokinines (Mashkoor, 2018). Ces dernières jouent un rôle crucial dans la stimulation de l'élongation des poils absorbants (Osugi et Sakakibara, 2015).

Par ailleurs, les *Bacillus subtilis* possèdent la capacité de former des endospores, leur conférant une résistance aux conditions environnementales défavorables. Ces bactéries libèrent également des métabolites bénéfiques, contribuant à la croissance et à la santé des plantes. De

plus, elles représentent le genre bactérien le plus abondamment retrouvé dans la rhizosphère (Benlabiod et Belhadeb, 2022).

Dans le cadre de cette étude, les graines de blé traitées avec la souche *Bacillus subtilis* ainsi qu'avec la proline ont manifesté une tolérance notable au stress salin, se traduisant par une augmentation significative de la biomasse au niveau des racines et des parties aériennes, accompagnée d'une teneur accrue en chlorophylle.

L'association de *Bacillus subtilis* et de la proline constitue une stratégie synergique efficace pour atténuer les effets du stress salin chez les plantes. *B. subtilis* améliore la croissance végétale en stimulant l'absorption des nutriments et en modulant les réponses physiologiques au stress, tandis que la proline agit comme un osmoprotecteur, stabilisant les structures cellulaires et réduisant le stress oxydatif. Cette interaction combinée favorise une meilleure tolérance des plantes en conditions salines (Egamberdieva et al., 2017).

# CONCLUSION GENERALE

# CONCLUSION GÉNÉRALE

La salinité représente un phénomène complexe, engendrant le plus souvent un stress osmotique dû à la réduction de la disponibilité en eau au niveau de la rhizosphère. Dans ce cadre, l'identification et le développement de variétés de blé dur tolérantes et résilientes face aux contraintes abiotiques constituent des priorités majeures dans les programmes de recherche agronomique.

L'utilisation des PGPR représente une stratégie prometteuse pour atténuer les effets délétères du stress salin sur les cultures. Grâce à leurs mécanismes d'action variés, les PGPR constituent une alternative écologique et durable aux approches conventionnelles, favorisant la résilience des plantes en conditions salines.

Notre étude s'est intéressée à l'évaluation des effets bénéfiques de l'association entre la proline exogène et la souche *Bacillus subtilis* subsp. *Spizizenii* ATCC 6633, ainsi qu'à leur potentiel dans l'amélioration de la tolérance au stress salin chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.) variété AMAR 06, soumis à des concentrations croissantes en NaCl (75 mM/L et 100 mM/L).

Les résultats ont mis en évidence une amélioration significative des paramètres morphologiques et physiologiques chez les plantules ayant reçu le traitement combiné des deux facteurs. Une augmentation des longueurs et des biomasses aériennes et racinaires ont été observée, accompagnée d'une élévation du taux de chlorophylle totale, traduisant une activité photosynthétique accrue en dépit des conditions de salinité.

Au terme de l'étude menée, il a été conclu que la combinaison de la proline exogène avec la souche bactérienne *Bacillus subtilis* constitue une stratégie prometteuse pour améliorer la tolérance au stress salin ainsi que la germination des plantules de blé dur (*Triticum durum*).

À l'issue de ce travail, L'association synergique de *Bacillus subtilis* et de la proline exogène représente une approche prometteuse pour atténuer les effets néfastes du stress salin sur les plantes. Cette stratégie pourrait être approfondie dans le cadre de recherches futures en vue d'optimiser les conditions d'application (concentrations, modes et moments d'inoculation), de mieux comprendre les mécanismes physiologiques et moléculaires sous-jacents, ainsi que d'évaluer son efficacité sur différentes espèces végétales cultivées. Par ailleurs, l'intégration de cette approche dans des systèmes agricoles durables pourrait contribuer à améliorer la tolérance des cultures aux contraintes abiotiques, notamment dans les zones à forte salinité des sols.

# BIBLIOGRAPHIE

## BIBLIOGRAPHIE

- **Last, L., Keller, B., & Zurich, E. T. H.** Analyse du contexte de la sélection végétale suisse.
- **Abdat, L., & Hammache, D. (2020).** *Synthèse bibliographique sur l'effet de l'itinéraire technique sur le rendement du blé dur (Triticum durum)* (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).
- **Zaghdoudi Hala, B. H. (2018).** *Effet du stress salin sur les paramètres de croissance de quelques variétés de blé tendre (Triticum aestivum L.)* (Doctoral dissertation).
- **IKHLEF HANANE, C. R. (2019).** Contribution à l'étude du comportement du blé dur (*triticum durum Desf*) dans les conditions climatiques du Haut Chelif.
- **Kirouani, A., Kiar, R. O., Boukhalfoun, L., & Fellahi, Z. E. A. (2019).** Caractérisation de quelques variétés Algériennes de blé dur (*Triticum turgidum L. var. durum*) par le biais des marqueurs phénotypiques. *Journal of Applied Biosciences*, 142, 14464-14477.
- **Fatima, C., & Leila, D. B.** Etude de la variabilité agronomique et biochimique des quatre génotypes d'une variété de blé dur cultivé en Algérie (*Triticum durum Desf.*).
- **de la Biosécurité Végétale, B. (2006).** Agence canadienne d'inspection des aliments-Bureau de biotechnologie végétale-La biologie de *Triticum turgidum* sous-espèce *durum* (Blé dur).
- **Grignac, P. (1978).** Le blé dur: monographie succincte. *Algerian Annals of Agronomy*, 8(2), 84-97.
- **Malécot, V. (2017).** La botanique: de l'inventaire du 18ème siècle à la phylogénie du 21ème siècle. *Bulletin de l'Académie des Sciences et Lettres de Montpellier*, 48(Supplément 2), 95-108.
- **Fouré, J. (2022).** La Salsepareille d'Europe.
- **Touroult, J., Poncet, L., Keith, P., Boulet, V., Arnal, G., Brustel, H., & Siblet, J. P. (2015).** Inventaires et atlas nationaux de distribution: pour une approche plus itérative et un rééquilibrage taxinomique. *Revue d'écologie*, 70(2), 97-120.
- **Heywood, V. H., & Brunel, S. (2009).** *Code de conduite sur l'horticulture et les plantes exotiques envahissantes* (Vol. 155). Council of Europe.

- **Malécot, V. (2024).** *Botanique Historique: entre sauvage et cultivé; entre systématique, dénomination et transmission* (Doctoral dissertation, Université d'Angers (UA), Angers, FRA.).
- **Mebarki Siham, M. H. (2020).** *Etude de la stabilité du rendement de quelques variétés de blé dur (Triticum durum Desf) en milieu semi-aride* (Doctoral dissertation).
- **Douzery, E. J., Delsuc, F., & Philippe, H. (2006).** Les datations moléculaires à l'heure de la génomique. *médecine/sciences*, 22(4), 374-380.
- **Kishii, M. (2019).** An update of recent use of Aegilops species in wheat breeding. *Frontiers in Plant Science*, 10, 585.
- **Mestiri, I. (2010).** *Changements génétiques et épigénétiques en relation avec le comportement méiotique chez les allopolyploïdes de blé (genres Aegilops et Triticum)* (Doctoral dissertation, université d'Évry-Val d'Essonne).
- **Minaei, K., & Mound, L. (2014).** New synonymy in the wheat thrips, Haplothrips tritici (Thysanoptera: Phlaeothripidae). *Zootaxa*, 3802(4), 596-599.
- **Trimbur, D. (2009).** Klaus-Michael Mallmann, Martin Cüppers Halbmond und Hakenkreuz-Bas Dritte Reich, die Araber und Palastina Darmstadt, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 2006.[version française: Croissant fertile et Croix gammée-Le Troisième Reich, les Arabes et la Palestine Verdier, 2009]. *Diasporas. Histoire et sociétés*, 14(1), 201-204.
- **Pelletier, G. (2024).** *Génétique des domestications*. ISTE Group.
- **Laurent, A. (2009).** Blé tendre: 10 000 ans de culture. *Perspectives agricoles*, (362), 64-67.
- **Buisson, A. (2024).** Dominique Garcia, Marc Bouiron (dir.), Atlas archéologique de la France. *Géocarrefour*.
- **Lemoine, T. (2023).** *De l'ancêtre sauvage aux variétés modernes du blé dur: stratégies écologiques et réponse à la compétition* (Doctoral dissertation, Université de Montpellier).
- **ÉVOLUTIONS, E. G. E. L'ENSEIGNEMENT AGRICOLE, UN ATOUT POUR RÉUSSIR LES TRANSITIONS DE L'AGRICULTURE FRANÇAISE.**

- **Nachit, M., Picard, E., Monneveux, P., Labhilili, M., Baum, M., & Rivoal, R. (1998).** Présentation d'un programme international d'amélioration du blé dur pour le bassin méditerranéen. *Cahiers Agricultures*, 7(6), 510-515.
- **Benkrinah Khadija Hafiani Asya, S. S. (2018).** Etude de paramètres morphologiques, physiologiques et biochimique due aux stress hydrique chez trois variété du blé dur (*Triticum durum* Desf).
- **Dekkaki, M., Amssa, M., & Qariani, L. (2000).** Identification des critères agro-physiologiques d'adaptation du blé dur aux basses températures et à la sécheresse. *Options Méditerranéennes. Série A: Séminaires Méditerranéens (CIHEAM)*, (40).
- **Bajji, M., Lutts, S., & Kinet, J. M. (2000).** La résistance au stress hydrique chez le blé dur: Comparaison des comportements au niveau cellulaire et au niveau de la plante entière. *Options Méditerranéennes. Série A: Séminaires Méditerranéens (CIHEAM)*, (40).
- **LAMINE, V. D. P. M. N., & ALGER, Z. À. LE MAGHREB.**
- **Et-Touile, H. (2022).** ANALYSE ÉCONOMIQUE DES IMPACTS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LA SÉCURITE ALIMENTAIRE EN AFRIQUE DU NORD (MAROC, ALGERIE, TUNISIE, ÉGYPTÉ, MAURITANIE) (Doctoral dissertation, Université Cadi Ayyad. Faculté des sciences juridiques, économiques et sociales (Marrakech, Maroc)).
- **Ayed, S., Othmani, A., Beji, S., & Amara, H. (2016).** Criblage de quelques génotypes de blé dur (*Triticum Durum* Desf.) sous un stress salin en culture de pot. *European Scientific Journal*, 12(9).
- **Ouerghi, Z., Zid, E., Hajji, M., & Soltani, A. (2000).** Comportement physiologique du blé dur (*Triticum durum* L.) en milieu salé. *Durum Wheat Improvement in the Mediterranean Region: New Challenges*; Royo, C., Nachit, M., Di Fonzo, N., Araus, JL, Eds, 309-313.
- **Mekliche, A., Boukecha, D., & Hanifi-Mekliche, L. (2003).** ETUDE DE LA TOLERANCE A LA SECHERESSE DE QUELQUES VARIETES DE BLE DUR (*Triticum durum* Desf.). I. EFFET DE L'IRRIGATION DE COMPLEMENT SUR LES CARACTERES PHENOLOGIQUE, MORPHOLOGIQUES ET PHYSIOLOGIQUES. *Algerian Annals of Agronomy*, 24(1), 97-110.

- **Fiorini, M., Ballaro, C., Sala, G., Falcone, G., Alema, S., & Segatto, O. (2002).** Expression of RALT, a feedback inhibitor of ErbB receptors, is subjected to an integrated transcriptional and post-translational control. *Oncogene*, 21(42), 6530-6539.
- **Epstein, S. (1980).** The stability of behavior: II. Implications for psychological research. *American psychologist*, 35(9), 790.
- **Kovacs, M., Rush, A. J., Beck, A. T., & Hollon, S. D. (1981).** Depressed outpatients treated with cognitive therapy or pharmacotherapy: A one-year follow-up. *Archives of General Psychiatry*, 38(1), 33-39.
- **Belfakih, M., Ibriz, M., Zouahri, A., & Hilali, S. (2013).** Effet de la salinité sur la croissance des deux variétés de bananier «grande naine» et «petite naine» et leur nutrition minérale au Maroc. *Journal of applied Biosciences*, 63, 4689-4702.
- **Matilla, K. (2005).** L'industrie sur galet de La Chaise-de-Vouthon, Charente: synthèse des résultats. *L'Anthropologie*, 109(3), 481-498.
- **Bessaoud, O., Pellissier, J. P., Rolland, J. P., & Khechimi, W. (2019).** *Rapport de synthèse sur l'agriculture en Algérie* (Doctoral dissertation, CIHEAM-IAMM).
- **Bessaoud, O., Pellissier, J. P., Rolland, J. P., & Khechimi, W. (2019).** *Rapport de synthèse sur l'agriculture en Algérie* (Doctoral dissertation, CIHEAM-IAMM).
- **KHOUDOUR Chaimaa, K. A. R. A. (2024).** *Production des céréales en Algérie: Evolution en relation avec le climat* (Doctoral dissertation).
- **Embarech, M. (2023).** Une fête nationale en situation coloniale: l'exemple du 14 juillet 1936 à Alger. *Revue d'Histoire Méditerranéenne*.
- **HAMMACHE, S., & CHERROU, K. L'IMPORTANCE DU FINANCEMENT BANCAIRE POUR LE DEVELOPPEMENT DU SECTEUR AGRICOLE EN ALGERIE: APPROCHE PAR LE MODELE ARDL (1990-2021) THE IMPORTANCE OF BANK FINANCING FOR THE DEVELOPMENT OF THE AGRICULTURAL SECTOR IN ALGERIA: AN APPROACH USING.**
- **Soumeiya, B. E. K. K. I. S. (2023).** *Ecole Nationale Supérieure Agronomique* (Doctoral dissertation, Université de Biskra).
- **Abecassis, J. (2023).** Fabrication des pâtes alimentaires.

- **Hellio, E., & Mésini, B. (2022).** En" mission" dans l'agriculture européenne, les vulnérabilités systémiques des saisonniers étrangers détachés et cantonnés en Provence pendant la pandémie. *Face à la vulnérabilisation au travail*, 273-298.
- **Nourhane, Z. E. L. B. A. H., & BOUKESSISLA, S. (2023).** *Étude morphologique de la ramification (ou tallage) chez les céréales à paille comme le blé dur Triticum durum Desf* (Doctoral dissertation, University center of Abdalhafid Boussouf-MILA).
- **Agrios, G. N. (2005).** Plant Pathology. Academic Press.
- **Bencherif, K., Djili, K., & Ykhlef, N. (2016).** État de la salinisation des sols en Algérie. *Revue des Sciences de l'Environnement*.
- **FAO. (2020).** Global Map of Salt-Affected Soils.
- **Hasanuzzaman, M., Nahar, K., Alam, M. M., et al. (2013).** Plant Responses to Abiotic Stress. Springer.
- **Maas, E. V., & Hoffman, G. J. (1977).** Crop salt tolerance—current assessment. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*.
- **Munns, R., & Tester, M. (2008).** Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, 59, 651–681.
- **Slimani, M. (2018).** Salinisation des terres agricoles en Algérie. Mémoire de Master, INA El Harrach.
- **Taiz, L., & Zeiger, E. (2014).** Plant Physiology and Development. Sinauer Associates.
- **Zhu, J. K. (2001).** Plant salt tolerance. *Trends in Plant Science*, 6(2), 66–71.
- **Kloepper, J. W., Leong, J., Teintze, M., & Schroth, M. N. (1980).** Enhanced plant growth by siderophores produced by plant growth-promoting rhizobacteria. *Nature*, 286(5776), 885-886.
- **Glick, B. R. (1995).** The enhancement of plant growth by free-living bacteria. *Canadian journal of microbiology*, 41(2), 109-117.
- **Compant, S., Clément, C., & Sessitsch, A. (2010).** Plant growth-promoting bacteria in the rhizo- and endosphere of plants: their role, colonization, mechanisms involved and prospects for utilization. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(5), 669-678.

- **Bhattacharyya, P. N., & Jha, D. K. (2012).** Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): emergence in agriculture. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 28, 1327-1350.
- **Santoyo, G., Moreno-Hagelsieb, G., del Carmen Orozco-Mosqueda, M., & Glick, B. R. (2016).** Plant growth-promoting bacterial endophytes. *Microbiological research*, 183, 92-99.
- **Guilbert, L. (1973).** La spécificité du terme scientifique et technique. *Langue française*, (17), 5-17.
- **Glick, B. R. (1995).** The enhancement of plant growth by free-living bacteria. *Canadian journal of microbiology*, 41(2), 109-117.
- **Vessey, J. K. (2003).** Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant and soil*, 255, 571-586.
- **Kloepper, J. W. (1978).** Plant growth-promoting rhizobacteria on radishes. In *Proc. of the 4th Internet. Conf. on Plant Pathogenic Bacter, Station de Pathologie Vegetale et Phytobacteriologie, INRA, Angers, France, 1978* (Vol. 2, pp. 879-882).
- **Rodríguez, H., & Fraga, R. (1999).** Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion. *Biotechnology advances*, 17(4-5), 319-339.
- **Zaidi, A., Khan, M., Ahemad, M., & Oves, M. (2009).** Plant growth promotion by phosphate solubilizing bacteria. *Acta microbiologica et immunologica Hungarica*, 56(3), 263-284.
- **Bhattacharyya, P. N., & Jha, D. K. (2012).** Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): emergence in agriculture. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 28, 1327-1350.
- **Gyaneshwar, P., Naresh Kumar, G., Parekh, L. J., & Poole, P. S. (2002).** Role of soil microorganisms in improving P nutrition of plants. *Plant and soil*, 245, 83-93.
- **Compant, S., Clément, C., & Sessitsch, A. (2010).** Plant growth-promoting bacteria in the rhizo-and endosphere of plants: their role, colonization, mechanisms involved and prospects for utilization. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(5), 669-678.

- **DAHMOUNI Roula, Y. A. (2024).** *Utilisation des PGPR chez les espèces à intérêt agronomique* (Doctoral dissertation).
- **Glick, B. R. (2012).** Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications. *Scientifica*, 2012(1), 963401.
- **Bhattacharyya, P. N., & Jha, D. K. (2012).** Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): emergence in agriculture. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 28, 1327-1350.
- **Vacheron, J., Desbrosses, G., Bouffaud, M. L., Touraine, B., Moëgne-Loccoz, Y., Muller, D., ... & Prigent-Combaret, C. (2013).** Plant growth-promoting rhizobacteria and root system functioning. *Frontiers in plant science*, 4, 356.
- **Arkam, Y., & Baziz, M. (2024).** *Étude de l'huile de pépins et du vinaigre de figes de barbarie issues de culture biologique dans la région de Tizi-Ouzou* (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).
- **Kloepper, J. W., Ryu, C. M., & Zhang, S. (2004).** Induced systemic resistance and promotion of plant growth by *Bacillus* spp. *Phytopathology*, 94(11), 1259-1266.
- **Compant, S., Clément, C., & Sessitsch, A. (2010).** Plant growth-promoting bacteria in the rhizo- and endosphere of plants: their role, colonization, mechanisms involved and prospects for utilization. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(5), 669-678.
- **Glick, B. R. (2012).** Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications. *Scientifica*, 2012(1), 963401.
- **Vessey, J. K. (2003).** Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant and soil*, 255, 571-586.
- **Yang, J., Kloepper, J. W., & Ryu, C. M. (2009).** Rhizosphere bacteria help plants tolerate abiotic stress. *Trends in plant science*, 14(1), 1-4.
- **Verma, M., Mishra, J., & Arora, N. K. (2018).** Plant growth-promoting rhizobacteria: diversity and applications. In *Environmental biotechnology: for sustainable future* (pp. 129-173). Singapore: Springer Singapore.

- **Bashan, Y., & de-Bashan, L. E. (2010).** How the plant growth-promoting bacterium *Azospirillum* promotes plant growth—a critical assessment. *Advances in agronomy*, 108, 77-136.
- **Lugtenberg, B., & Kamilova, F. (2009).** Plant-growth-promoting rhizobacteria. *Annual review of microbiology*, 63(1), 541-556.
- **Fernando, W. D., Ramarathnam, R., Krishnamoorthy, A. S., & Savchuk, S. C. (2005).** Identification and use of potential bacterial organic antifungal volatiles in biocontrol. *Soil Biology and Biochemistry*, 37(5), 955-964.
- **Tyagi, A., Lama Tamang, T., Kashtoh, H., Mir, R. A., Mir, Z. A., Manzoor, S., ... & Ali, S. (2024).** A Review on biocontrol agents as sustainable approach for crop disease management: Applications, production, and future perspectives. *Horticulturae*, 10(8), 805.
- **Anith, K. N., Momol, M. T., & Kloepper, J. W. (2003, October).** Plant Growth Promotion and Biological Control of Bacterial Wilt of Tomato by Plant-Growth Promoting Rhizobacteria. In *6th International Workshop on Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR)* (pp. 5-10).
- **Saadaoui, N. (2023).** *Impact stimulateur des PGPR sur la croissance végétale et sur les communautés bactériennes bénéfiques cultivables du microbiote racinaire du blé dur* (Doctoral dissertation).
- **Bhattacharyya, P. N., & Jha, D. K. (2012).** Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): emergence in agriculture. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 28, 1327-1350.
- **Santoyo, G., Moreno-Hagelsieb, G., del Carmen Orozco-Mosqueda, M., & Glick, B. R. (2016).** Plant growth-promoting bacterial endophytes. *Microbiological research*, 183, 92-99.
- **SINGH, P., Devi, B., & Yadav, N.** Transgenerational Immune Priming by Pgpr Enhances Wheat Resistance to *Bipolaris Sorokiniana*. *Available at SSRN 5253524*.
- **Bhattacharyya, P. N., & Jha, D. K. (2012).** Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): emergence in agriculture. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 28, 1327-1350.

- **Santoyo, G., Moreno-Hagelsieb, G., del Carmen Orozco-Mosqueda, M., & Glick, B. R. (2016).** Plant growth-promoting bacterial endophytes. *Microbiological research*, 183, 92-99.
- **Lugtenberg, B., & Kamilova, F. (2009).** Plant-growth-promoting rhizobacteria. *Annual review of microbiology*, 63(1), 541-556.
- **Vessey, J. K. (2003).** Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant and soil*, 255, 571-586.
- **Jaiswal, D. K., Krishna, R., Macovei, A., & Prasad, V. (2023).** OPEN ACCESS EDITED BY. *Microbial Co-cultures: A New Era of Synthetic Biology and Metabolic Engineering*, 100.
- **Hasan, A., Tabassum, B., Hashim, M., & Khan, N. (2024).** Role of Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) as a Plant Growth Enhancer for Sustainable Agriculture: A Review. *Bacteria* 2024, 3, 59–75. *Interaction between Plants and PGPR for Sustainable Development*, 1.
- **Ashraf, M. F. M. R., & Foolad, M. R. (2007).** Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. *Environmental and experimental botany*, 59(2), 206-216.
- **Szabados, L., & Savouré, A. (2010).** Proline: a multifunctional amino acid. *Trends in plant science*, 15(2), 89-97.
- **Verbruggen, N., & Hermans, C. (2008).** Proline accumulation in plants: a review. *Amino acids*, 35, 753-759.
- **Kishor, P. K., Sangam, S., Amrutha, R. N., Laxmi, P. S., Naidu, K. R., Rao, K. S., ... & Sreenivasulu, N. (2005).** Regulation of proline biosynthesis, degradation, uptake and transport in higher plants: its implications in plant growth and abiotic stress tolerance. *Current science*, 424-438.
- **Hare, P. D., Cress, W. A., & Van Staden, J. (1998).** Dissecting the roles of osmolyte accumulation during stress. *Plant, cell & environment*, 21(6), 535-553.
- **Kavi Kishor, P. B., & Sreenivasulu, N. E. S. E. (2014).** Is proline accumulation per se correlated with stress tolerance or is proline homeostasis a more critical issue?. *Plant, cell & environment*, 37(2), 300-311.

- **Ashraf, M. F. M. R., & Foolad, M. R. (2007).** Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. *Environmental and experimental botany*, 59(2), 206-216.
- **Ahmad, M. A., Saleem, A., Tahir, M., Khilji, S. A., Sajid, Z. A., Rauf, M., ... & Landry, K. B. (2023).** Ameliorative role of ascorbic acid to drought stress in *Hordeum Vulgare* L. through modulation of the polyamines, osmolytes and antioxidant defense system.
- **Khan, M. I. R., Fatma, M., Per, T. S., Anjum, N. A., & Khan, N. A. (2015).** Salicylic acid-induced abiotic stress tolerance and underlying mechanisms in plants. *Frontiers in plant science*, 6, 462.
- **Szabados, L., & Savouré, A. (2010).** Proline: a multifunctional amino acid. *Trends in plant science*, 15(2), 89-97.
- **Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N. S. M. A., Fujita, D. B. S. M. A., & Basra, S. M. (2009).** Plant drought stress: effects, mechanisms and management. In *Sustainable agriculture* (pp. 153-188). Dordrecht: Springer Netherlands.
- **Ashraf, M. F. M. R., & Foolad, M. R. (2007).** Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. *Environmental and experimental botany*, 59(2), 206-216.
- **Szabados, L., & Savouré, A. (2010).** Proline: a multifunctional amino acid. *Trends in plant science*, 15(2), 89-97.
- **Khan, M. I. R., Fatma, M., Per, T. S., Anjum, N. A., & Khan, N. A. (2015).** Salicylic acid-induced abiotic stress tolerance and underlying mechanisms in plants. *Frontiers in plant science*, 6, 462.
- **Ahmad, M. A., Saleem, A., Tahir, M., Khilji, S. A., Sajid, Z. A., Rauf, M., ... & Landry, K. B. (2023).** Ameliorative role of ascorbic acid to drought stress in *Hordeum Vulgare* L. through modulation of the polyamines, osmolytes and antioxidant defense system.
- **Verbruggen, N., & Hermans, C. (2008).** Proline accumulation in plants: a review. *Amino acids*, 35, 753-759.
- **Szabados, L., & Savouré, A. (2010).** Proline: a multifunctional amino acid. *Trends in plant science*, 15(2), 89-97.

- **Munns, R., & Tester, M. (2008).** Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, 59, 651-681.
- **Parida, A. K., & Das, A. B. (2005).** Salt tolerance and salinity effects on plants: a review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 60(3), 324-349.
- **Zhu, J. K. (2001).** Plant salt tolerance. *Trends in Plant Science*, 6(2), 66-71.

# ANNEXE

### 1- Longueur des feuilles :

Tableau de l'ANOVA pour long F :

Analyse de la variance (LF(cm)) :

| Source        | DDL    | Somme des carrés | Moyenne des carrés | F     | Probabilité  |
|---------------|--------|------------------|--------------------|-------|--------------|
| Modèle        | 18,000 | 263,124          | 14,618             | 2,464 | <b>0,005</b> |
| Erreur        | 61,000 | 361,958          | 5,934              |       |              |
| Total corrigé | 79,000 | 625,082          |                    |       |              |

### 2- La longueur des racines :

Tableau de l'ANOVA de Long R :

Analyse de la variance (LR(cm)) :

| Source        | DDL    | Somme des carrés | Moyenne des carrés | F     | Probabilité       |
|---------------|--------|------------------|--------------------|-------|-------------------|
| Modèle        | 18,000 | 691,257          | 38,403             | 4,559 | <b>&lt;0,0001</b> |
| Erreur        | 61,000 | 513,818          | 8,423              |       |                   |
| Total corrigé | 79,000 | 1205,075         |                    |       |                   |

### 3- poids frais des feuilles (Biomasse) :

Tableau de l'ANOVA de biomasse fraîches des feuilles :

Analyse de la variance (BFF(g)) :

| Source        | DDL    | Somme des carrés | Moyenne des carrés | F     | Probabilité       |
|---------------|--------|------------------|--------------------|-------|-------------------|
| Modèle        | 18,000 | 1,095            | 0,061              | 4,118 | <b>&lt;0,0001</b> |
| Erreur        | 61,000 | 0,901            | 0,015              |       |                   |
| Total corrigé | 79,000 | 1,996            |                    |       |                   |

#### 4- Poids frais des racines :

Tableau de l'ANOVA de biomasse fraîche des racines :

Analyse de la variance (BFR(g)) :

| Source        | DDL    | Somme des carrés | Moyenne des carrés | F     | Probabilité |
|---------------|--------|------------------|--------------------|-------|-------------|
| Modèle        | 18,000 | 0,467            | 0,026              | 4,061 | <0,0001     |
| Erreur        | 61,000 | 0,390            | 0,006              |       |             |
| Total corrigé | 79,000 | 0,857            |                    |       |             |

#### 5- Dosage de chlorophylle par SPAD :

Tableau de l'ANOVA pour SPAD 1 par Traitement :

Analyse de la variance (Chl) :

| Source        | DDL    | Somme des carrés | Moyenne des carrés | F     | Probabilité |
|---------------|--------|------------------|--------------------|-------|-------------|
| Modèle        | 18,000 | 713,654          | 39,647             | 1,899 | 0,033       |
| Erreur        | 61,000 | 1273,571         | 20,878             |       |             |
| Total corrigé | 79,000 | 1987,226         |                    |       |             |

#### 6- Le pourcentage de germination G% :

Tableau de l'ANOVA pour G%

Analyse de la variance (FG%) :

| Source        | DDL    | Somme des carrés | Moyenne des carrés | F     | Probabilité |
|---------------|--------|------------------|--------------------|-------|-------------|
| Modèle        | 16,000 | 0,021            | 0,001              | 0,975 | 0,498       |
| Erreur        | 47,000 | 0,063            | 0,001              |       |             |
| Total corrigé | 63,000 | 0,084            |                    |       |             |

## 7- La vitesse de germination GP% :

Tableau de l'ANOVA pour FGP % :

Analyse de la variance (F GP%) :

| Source        | DDL    | Somme des carrés | Moyenne des carrés | F     | Probabilité  |
|---------------|--------|------------------|--------------------|-------|--------------|
| Modèle        | 13,000 | 709,817          | 54,601             | 0,123 | <b>1,000</b> |
| Erreur        | 34,000 | 15125,555        | 444,869            |       |              |
| Total corrigé | 47,000 | 15835,372        |                    |       |              |

## 8- Indice de tolérance de G% : (traitements stressés)

Tableau de l'ANOVA pour DTI GP % :

Analyse de la variance (F DTI GP%) :

| Source        | DDL    | Somme des carrés | Moyenne des carrés | F     | Pr > F | Codes de signification des p-valeurs |
|---------------|--------|------------------|--------------------|-------|--------|--------------------------------------|
| Modèle        | 13,000 | 0,018            | 0,001              | 1,046 | 0,434  | °                                    |
| Erreur        | 34,000 | 0,046            | 0,001              |       |        |                                      |
| Total corrigé | 47,000 | 0,065            |                    |       |        |                                      |

## 9- Indice de Tolérance GP % : (traitement stressé)

Tableau de l'ANOVA pour DTI GP % :

Analyse de la variance (F GP%) :

| Source | DDL    | Somme des carrés | Moyenne des carrés | F     | Probabilité  |
|--------|--------|------------------|--------------------|-------|--------------|
| Modèle | 13,000 | 709,817          | 54,601             | 0,123 | <b>1,000</b> |

|               |        |           |         |  |  |
|---------------|--------|-----------|---------|--|--|
| Erreur        | 34,000 | 15125,555 | 444,869 |  |  |
| Total corrigé | 47,000 | 15835,372 |         |  |  |

#### 10- La réduction de germination G% :

Tableau de l'ANOVA pour réduction de G% :

Analyse de la variance (Réduction G%)

| Source        | DDL    | Somme des carrés | Moyenne des carrés | F     | Probalité |
|---------------|--------|------------------|--------------------|-------|-----------|
| Modèle        | 13,000 | 0,015            | 0,001              | 0,860 | 0,599     |
| Erreur        | 34,000 | 0,045            | 0,001              |       |           |
| Total corrigé | 47,000 | 0,060            |                    |       |           |

#### 11- Réduction de vitesse de germination GP % :

Tableau de l'ANOVA pour mesurer la réduction de GP % :

Analyse de la variance (F GP%) :

| Source        | DDL    | Somme des carrés | Moyenne des carrés | F     | Probalité |
|---------------|--------|------------------|--------------------|-------|-----------|
| Modèle        | 13,000 | 709,817          | 54,601             | 0,123 | 1,000     |
| Erreur        | 34,000 | 15125,555        | 444,869            |       |           |
| Total corrigé | 47,000 | 15835,372        |                    |       |           |

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de L'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Blida -1 SAAD DAHLEB

Faculté des Sciences de la nature et de la vie

Département de Biotechnologie et Agroécologie



AP: Hamdi Goud  
Houd

### Mémoire de Fin D'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master académique dans le domaine  
des sciences de la nature et de la vie.

Filière : Biotechnologie Végétale

### Thème

**Impact des Bactéries bénéfiques sur la croissance de certaines  
variétés de blé dur en condition de stress salin.**

Présenté par:

Soutenu le :15/07/2025

- BEN MOKHTAR SABRINA.
- DJOHLAF AMANDA.

Devant le jury:

Grade / Lieu:

Qualité:

Mme . Dr OUSRIR S .

M.C.B UNIV BLIDA -1

PROMOTRICE

Mr . Dr ABBAD M .

M.C.A UNIV BLIDA -1

EXAMINATEUR

Mr . Dr HAMIDI Y.

M.C.A UNIV BLIDA -1

PRESIDENT

Année Universitaire : 2024 – 2025