



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

*République Algérienne Démocratique et Populaire*

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

*Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique*

المدرسة الوطنية العليا للفلاحة الحراش – الجزائر

*Ecole Nationale Supérieure Agronomique – El Harrach – Alger*

Département : Productions végétales

القسم : الإنتاج النباتي

Spécialité : Ressources Génétiques et Amélioration des Productions Végétales

التخصص : الموارد الوراثية وتحسين إنتاج النباتي

## Mémoire De Fin D'études

En vue de l'obtention du Diplôme de Master

### THÈME

**Impact des inoculants de PGPR sur la résilience de l'orge (*Hordeum vulgare* L.) face au stress salin**

Présenté par : **DIB Tarek**

Soutenu publiquement le 09/07/2025

Devant le jury composé de :

**Présidente : Mme ABIDI Lila**

**M.C. A (ENSA, Alger)**

**Promoteur : M. KADRI Adel**

**M.C. A (ENSA, Alger)**

**Examineurs : Mme MOUSSAOUI Sawsen**

**M.A. A (ENSA, Alger)**

**Invitée : Alioua Hadjer**

**(Doctorante, ENSA)**

Promotion 2020/2025

# Table des matières

Dédicaces.....	I
Remerciement.....	II
Résumé.....	III
Abstract.....	III
ملخص.....	IV
Table des matières.....	V
Liste des figures.....	XIII
Liste des tableaux.....	XVIII
Liste des annexes.....	XIX
Liste des abréviations.....	XX
Introduction.....	1
Synthèse bibliographique.....	4
Chapitre 1 : L'orge ( <i>Hordeum vulgare</i> L.).....	5
1. Origine et répartition géographique de l'orge ( <i>Hordeum vulgare</i> L.) :.....	5
1.1. Expansion et adaptation :.....	6
2. Taxonomie :.....	7
3. Classification des espèces du genre <i>Hordeum</i> en fonction de leur niveau de ploïdie et de leur nombre de chromosomes :.....	8
4. Situation de l'orge.....	9
4.1. Dans le monde.....	9
4.2. L'orge en Algérie : Importance et Enjeux :.....	10
5. Utilisations de l'orge :.....	12
5.1. Alimentation humaine.....	13
5.2. L'orge comme culture fourragère :.....	13

6. Classification de l'orge selon le nombre de rangs de grains :.....	14
7. Description morphologique : .....	15
7.1. Appareil végétatif : .....	15
8. Cycle de développement de l'orge :.....	20
8.1. Période végétative de l'orge .....	20
8.2. Phase reproductive.....	22
9. Conditions de croissance de l'orge .....	25
9.1. Température optimale .....	25
9.2. Influence de la photopériode.....	26
9.3. Exigences édaphiques .....	26
9.4. Exigences hydriques .....	26
9.5. Exigences culturales .....	26
10. Altérations physiologiques affectant l'orge.....	27
11. Impact du stress thermique.....	28
Chapitre 2 : salinité .....	29
1. Définition de la salinité des sols .....	29
2. Origine et Types de Salinité des Sols.....	30
2.1. La salinisation naturelle (primaire).....	30
2.2. La salinisation causée par l'activité humaine (secondaire) .....	30
2.3. Les principaux sels solubles : .....	31
2.4. Répartition des sols salés dans le monde .....	31
3. Définition du stress salin.....	32
4. Mécanismes d'action du stress salin.....	32
5. Effets de stress salin.....	34
5.1. Effets du stress salin sur la croissance et le développement des céréales.....	34
5.2. Effets du stress salin sur le statut hydrique des céréales.....	34

5.3. Effets du stress salin sur la photosynthèse.....	34
5.4. Effets du stress salin sur la nutrition minérale des céréales.....	35
5.5. Effets du stress salin sur le rendement des céréales.....	35
6. Mécanismes d'adaptation des plantes au stress salin .....	36
6.1. Mécanismes d'adaptation morphologiques .....	36
6.2. Mécanismes d'adaptation physiologiques et biochimiques .....	36
Chapitre 3 : PGPR.....	38
1. Rhizosphère .....	38
2. Définition des PGPR.....	39
2.1. PGPR symbiotiques .....	40
2.2. PGPR non symbiotiques .....	41
3. La biodiversité des PGPR dans la rhizosphère : .....	42
4. Mécanismes d'action des PGPR.....	46
4.1. Mécanismes d'action direct des PGPR.....	46
4.2. Mécanismes d'action indirects des PGPR .....	57
5. Enjeux liés à l'utilisation .....	60
6. Formulations des PGPR.....	61
Matériel et méthodes .....	62
1. Objectif de l'étude .....	63
2. Site expérimental .....	63
2.1. Localisation de l'essai.....	63
2.2. Conditions environnementales de l'essai.....	64
3. Matériel végétal .....	65
3.1. Origine et développement de la variété Rihane .....	67
4. Matériel bactérien .....	67
5. Dispositif expérimental : .....	69

6. Conduite de l'essai.....	70
6.1. Préparation et désinfection du substrat .....	70
6.2. Test de germination.....	71
6.3. Préparation des inoculums .....	72
6.4. Inoculation des graines .....	77
6.5. Mise en place du semis .....	78
6.6. Application des inoculums au sol .....	79
6.7. Entretien et suivi .....	80
6.8. Gestion de l'irrigation.....	80
6.9. Récolte .....	81
7. Évaluation initiale des propriétés physico-chimiques du substrat.....	82
7.1. Caractérisation granulométrique du substrat .....	82
7.2. Évaluation du pH du substrat.....	82
7.3. Dosage de l'azote total du substrat.....	83
7.4. Dosage du carbone.....	84
7.5. Analyse du calcaire total .....	85
7.6. Conductivité Électrique (CE) : Mesure de la Salinité .....	86
7.7. Analyse du phosphore assimilable ( $P_2O_5$ ).....	87
8. Paramètres étudiés .....	87
8.1. Paramètres biochimiques et physiologiques.....	88
8.2. Paramètres édaphiques.....	93
8.3. Paramètres morphologiques.....	94
8.4. Paramètres agronomiques .....	96
9. Analyses statistiques .....	97
Résultats et discussion.....	99
Chapitre 1 : Résultats et interprétations .....	100

1. Analyses physico-chimiques du substrat .....	100
1.1. Granulométrie .....	100
1.2. Calcaire Total CaCO <sub>3</sub> et pH .....	100
1.3. Conductivité Électrique (CE) .....	100
1.4. Carbone (C), matière organique (MO) et azote total (N) du sol.....	101
1.5. Phosphore .....	101
2. Paramètres biochimiques et physiologiques .....	103
2.5. Teneur relative en eau (TRE).....	103
2.2. Stabilité membranaire (SM) .....	105
2.3. Teneur en proline PRO .....	107
2.4. Teneur en sucres solubles SS .....	108
2.5. Teneur en chlorophylle a (CHLa) .....	110
2.6. Teneur en chlorophylle b (CHLb).....	111
2.7. Teneur en chlorophylle totale (CHLab).....	112
2.8. Teneur en azote total dans les tissus végétaux (NV) .....	113
3. Paramètres édaphiques.....	115
3.1. Teneur en phosphore assimilable du sol (P) .....	115
3.2. Teneur en azote total du sol (N).....	116
4. Paramètres morphologiques.....	118
4.1. Surface foliaire (SF) .....	118
4.2. Longueur de la tige (LT) .....	119
4.3. Hauteur de la plante (HP) .....	121
4.4. Longueur du col de l'épi (LCE).....	122
4.5. Longueur de l'épi (LEP) .....	123
4.6. Longueur des barbes (LB) .....	124
4.7. Longueur des racines (LR) .....	126

4.8. Biomasse aérienne (BIOA).....	127
4.9. Poids sec de la tige (PST) .....	128
4.10. Biomasse des épis (BIOE).....	129
4.11. Poids sec racinaire (PSR) .....	131
4.12. Poids frais des racinaire (PFR).....	132
4.13. Le rapport Poids frais / Poids sec de la partie racinaire (PFR.PSR) .....	133
5. Paramètres agronomiques .....	135
5.1. Nombre de talles (NTL).....	135
5.2. Nombre d'épis par plant (NEP) .....	137
5.3. Nombre de grains par épi (NGE).....	138
5.4. Poids de mille grains (PMG) .....	140
5.5. Rendement réel (Rdt).....	141
5.6. Indice de récolte (IR) .....	142
6. Résultats de l'analyse en composantes principales (ACP) .....	144
6.1. ACP en condition de stress .....	144
6.1.1. Qualité de représentation des variables étudiées .....	145
6.1.2. Description des axes .....	146
6.2. ACP en condition saline non stressée .....	148
6.2.1. Qualité de représentation des variables étudiées .....	148
6.2.2. Description des axes .....	149
7. Matrice de corrélation .....	151
7.1. Matrice de corrélation en condition de stress salin.....	151
7.2. Matrice de corrélation en condition salin contrôlée .....	154
8. Résultats de l'Analyse hiérarchique ascendante .....	155
8.1. Classification hiérarchique ascendante (AHC) en condition de stress salin.....	156
8.2. Classification hiérarchique ascendante (AHC) en condition saline contrôlée.....	157

9. Test de Student-Newman-Keuls .....	159
Discussion .....	160
Chapitre 2 : discussion .....	161
1. Effet des PGPR sur les paramètres biochimiques et physiologiques sous stress salin .	161
1.1. Teneur relative en eau (TRE).....	162
1.2. La stabilité membranaire (SM).....	163
1.3. Teneur en proline (PRO).....	164
1.4. Teneur en sucres solubles (SS) .....	165
1.5. La teneur en chlorophylle a (CHLa).....	166
1.6. Teneur en chlorophylle b (CHLb).....	167
1.7. Teneur en chlorophylle ab (CHLab) .....	168
1.8. Teneur en azote total du tissus végétaux :.....	169
2. Effet des PGPR sur les paramètres édaphiques .....	170
2.4. Teneur en phosphore assimilable (P).....	170
2.2. Teneur en azote totale du sol (N).....	171
3. Effet des PGPR sur les paramètres morphologiques .....	172
3.1. Surface foliaire (SF) .....	173
3.2. Longueur de tige (LT).....	173
3.3. Hauteur de plante (HP) .....	174
3.4. La longueur du col de l'épi (LCE).....	175
3.5. La longueur de l'épi (LEP) .....	175
3.6. Longueuer des barbes (LB) .....	176
3.7. Longueur racinaire (LR).....	176
3.8. La biomasse aérienne (BIOA) .....	177
3.9. La biomasse des épis (BIOE) .....	178
3.10. Le poids sec de la tige (PST).....	178

3.11. Poids frais racinaire (PFR) .....	179
3.12. Poids sec racinaire (PSR) .....	180
3.13. Rapport Poids Frais / Poids Sec des Racines (PFR.PSR).....	180
4. Effet des PGPR sur les paramètres agronomiques.....	181
4.1. Nombre de talles (NTL).....	181
4.2. Rendement réel (Rdt).....	182
4.3. Nombre d'épis par plante (NEP) .....	183
4.4. Nombre de grains par épi (NGE).....	184
4.5. Poids de mille grains (PMG) .....	185
4.6. L'indice de récolte (IR).....	186
CONCLUSION .....	188
Références .....	192
Bibliographiques .....	192
Annexes .....	232

## **Résumé**

La salinité des sols représente une contrainte majeure pour la production de l'orge, culture stratégique à l'échelle mondiale. Pour faire face à cette problématique, cette étude explore l'utilisation de bactéries promotrices de croissance (PGPR) comme solution biologique permettant de renforcer la tolérance de l'orge au stress salin. Quatre souches bactériennes (H1, H3, H9 et H13), sélectionnées pour leurs propriétés bénéfiques, ont été combinées en 11 consortiums (T1 à T11) et testées en conditions contrôlées. L'expérimentation a été menée en serre selon un plan en blocs aléatoires complets, croisant deux facteurs : la salinité et les traitements bactériens. L'exposition à une contrainte saline a entraîné une réduction significative de nombreux paramètres liés à la croissance, au métabolisme et au rendement des plants. Cependant, les effets des différentes combinaisons bactériennes se sont révélés variables, dont certaines de ces bactéries permettent d'atténuer les impacts du stress salin de manière significative. Des améliorations ont notamment été observées au niveau de la longueur racinaire, de la morphologie de l'épi, du nombre d'épis et de grains par plant, ainsi que sur l'indice de récolte. Les analyses statistiques ont mis en évidence des interactions notables entre les consortiums bactériens et le niveau de salinité, solignant le rôle déterminant de certaines associations microbiennes dans l'adaptation de l'orge à un environnement salin. Ces résultats confirment l'intérêt des PGPR en tant que biostimulants naturels, susceptibles de soutenir la productivité agricole dans des contextes de salinité croissante.

**Mots clés :** Orge, Stress salin, Biostimulant, PGPR, Inoculation, Rendement, Résilience.

## **Abstract**

Soil salinity is a major constraint for barley production, a strategic crop worldwide. To address this issue, this study explores the use of growth-promoting bacteria (PGPR) as a biological solution to enhance barley's tolerance to salt stress. Four bacterial strains (H1, H3, H9 and H13), selected for their beneficial properties, were combined in 11 consortia (T1 to T11) and tested under controlled conditions. Experimentation was carried out in the greenhouse using a randomized complete block design, crossing two factors : salinity and bacterial treatments. Exposure to saline stress led to a significant reduction in many parameters linked to plant growth, metabolism and yield. However, the effects of the different bacterial combinations proved variable, with some significantly mitigating the impacts of salt stress. In particular,

improvements were observed in root length, ear morphology, number of ears and grains per plant, as well as in harvest index. Statistical analyses revealed significant interactions between bacterial consortia and salinity level, underlining the decisive role of certain microbial associations in barley's adaptation to a saline environment. These results confirm the interest of PGPRs as natural biostimulants, likely to support agricultural productivity in contexts of increasing salinity.

**Keywords :** Barley, Salt stress, Biostimulation, PGPR, Inoculation, Yield, Resilience.

## ملخص

تشكل ملوحة التربة عائقاً رئيسياً أمام إنتاج الشعير، وهو محصول استراتيجي على نطاق عالمي. ولمعالجة هذه المشكلة، تستكشف هذه الدراسة استخدام البكتيريا المعززة للنمو (PGPR) كحل بيولوجي لتحسين قدرة الشعير على تحمل الإجهاد الملحي. تم الجمع بين أربع سلالات بكتيرية، تم اختيارها لخصائصها المفيدة، في 11 اتحاداً واختبارها في ظل ظروف خاضعة للرقابة. أُجريت التجربة في الدفيئة باستخدام تصميم كتلة عشوائية، حيث تم الجمع بين عاملين: الملوحة والمعالجات البكتيرية. أدى التعرض للإجهاد الملحي إلى انخفاض كبير في عدد من المعايير المرتبطة بنمو النبات والتمثيل الغذائي والإنتاجية. ومع ذلك، كانت تأثيرات التركيبات البكتيرية المختلفة متباينة، حيث قلل بعضها من تأثير الإجهاد الملحي بشكل كبير. على وجه الخصوص، لوحظ تحسن في طول الجذور، وطول عنق السنبل، وطول السنبل، وطول الشعيرات، وعدد السنابل لكل نبتة، وعدد الحبوب في السنبل، ومؤشر الحصاد. كشفت التحليلات الإحصائية عن تفاعلات مهمة بين الاتحادات البكتيرية ومستوى الملوحة، مما يؤكد الدور الحاسم لبعض الارتباطات الميكروبية في تكيف الشعير مع البيئة المالحة. تؤكد هذه النتائج أهمية التركيبات البكتيرية PGPR كمحفزات حيوية طبيعية، من المرجح أن تدعم الإنتاجية الزراعية في سياقات زيادة الملوحة.

**الكلمات المفتاحية:** الشعير، إجهاد الملح، التنشيط الحيوي، البكتيريا المحفزة للنمو النباتي، التلقيح، المحصول، المرونة.