



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Ecole Nationale Agronomique

المدرسة الوطنية العليا للفلاحة

Département : Productions végétales

القسم : الإنتاج النباتي

Spécialité : Ressources génétiques et amélioration
des productions végétales

التخصص : الموارد الوراثية و تحسين الإنتاج النباتي

Mémoire De Fin D'études

Pour l'obtention du Diplôme de Master en sciences Agronomiques

THEME

Effet des inoculants de PGPR sur la résilience de l'orge (*Hordeum
vulgare* L.) en conditions de stress hydrique

Présenté par : Mme BOUGHAZI Hanine

Soutenu publiquement le : 20/10/2025

Devant le jury composé de :

Président : M.MEFTI Mohammed

Professeur (ENSA, Alger)

Promoteur : M.KADRI Adel

M.C.A (ENSA, Alger)

Examinatrice : Mme.BELOUHRANI Amel Souhila

M.C.A (ENSA, Alger)

Promotion : 2020-2025

Table des matières

Dédicace.....	I
Remerciement	II
Résumé	III
Abstract	III
ملخص.....	IV
Table des matières	V
Liste des figures :.....	XI
Liste des abréviations.....	XVI
INTRODUCTION.....	1
Partie 1: synthèse bibliographique	4
Chapitre 1: L'orge (<i>Hordeum vulgare</i> L.)	5
1.Origine et domestication de l'orge	5
1.1Adaptation de l'orge	6
2.Biologie de l'orge	6
3.Taxonomie et classification.....	7
4.Description morphologique	9
4.1Le grain	10
4.2Appareil végétatif	13
4.3Appareil reproducteur	14
5.Cycle biologique de l'orge.....	16
5.1 Le stade végétatif.....	17
5.2 Le stade de reproduction	18
6.Exigences de l'orge	21
6.1 Exigences thermiques.....	21
6.2 Exigences hydriques	22
6.3 Exigences en photopériode	22
6.4 Exigences édaphiques.....	22
6.5 Exigences culturelles	23
7. Production d'orge dans le monde	24
8. Situation de l'orge en Algérie	26
8.1 Besoins actuels d'orge en Algérie	27
8.2 Aires de production en Algérie	27
8.3 Production nationale de l'orge	28

8.4 Principales variétés d'orge cultivées en Algérie	29
9.Utilisation de l'orge	32
9.1 Chez les animaux	32
9.2 Chez les humains	32
10. Les principaux dégâts affectant l'Orge	33
10.1. Les ravageurs.....	33
10.2 Les maladies cryptogamiques	33
10.3 Les maladies virales	34
10.4 les dégâts physiologiques	34
Chapitre 2 : Le stress hydrique.....	36
1.Importance de l'eau chez les végétaux	36
2.Généralités sur le stress	36
2.1Définition de stress	37
3.Effets du stress hydrique sur les céréales.....	38
3.1 Effet du stress hydrique sur la photosynthèse.....	38
3.2 Effet du stress sur la conduction stomatique	38
3.3 effet du stress hydrique sur le développement racinaire	39
3.4 Effet du stress hydrique sur la croissance et le développement.....	39
3.5 Effet du stress hydrique sur le rendement et ses composantes	41
4.Mécanismes d'adaptation des plantes au stress hydrique.....	41
4.1 Adaptation phénologique.....	41
4.2 Adaptation morphologique.....	42
4.3 Adaptation physiologique et biochimique	42
5.1Synthèse des protéines liées à la tolérance au stress hydrique	46
Chapitre 3 : les rhizobacteries promotrices de croissance des plantes (PGPR).....	48
1. Diversité microbienne dans le sol.....	48
2.la rhizosphère.....	49
3.Définition des PGPR	50
4.Principaux genres de PGPR	51
4.1 <i>Azospirillum</i>.....	51
4.2<i>Bacillus</i>	52
4.3 <i>Pseudomonas</i>.....	52
4.4 <i>Rhizobium (Rhizobias)</i>	53
4.5 <i>Frankia</i>	53
5. Mécanismes d'action des PGPR.....	54

5.1 Mécanisme d'action direct	54
5.2 Mécanisme d'action indirect	63
6.Caractéristiques d'une PGPR idéal	68
7.Utilisation des PGPR dans l'agriculture	69
7.1Biofertilisation	69
7.2Phytoremédiation	69
7.3Bioprotection ou phytostimulation	70
8.Consortium bactérien	70
9.Impact des PGPR sur la Tolérance des Plantes à la Sécheresse	71
Partie 2: matériels et méthodes	73
1.Rappel de l'objectif de travail	74
1.1Site expérimental	74
1.2Lieu de conduite de l'essai	74
1.3Conditions techniques de l'essai	75
1.4Conditions environnementales de l'essai	77
2.Matériel végétale	78
3.Matériel bactérien	78
4.Dispositif expérimental	80
5.Conduite de l'essai	81
5.1.Préparation et désinfection du substrat	81
5.2.Test de germination	82
5.3.Préparation des inoculums	82
5.4.Ensemencement bactérien des graines	89
5.5 Réalisation du semis	90
5.6. Inoculation du substrat	91
5.7. Entretien et suivie	92
5.8. Gestion de l'irrigation	92
5.9. Récolte	94
6.Caractérisation initiale des propriétés physico-chimiques du substrat	95
6.1.Analyse granulométrique	95
6.2. Mesure du pH du substrat	96
6.4. Dosage du carbone	98
6.5.Analyse du calcaire total	99
6.6. Conductivité Électrique (CE) : Mesure de la salinité	100
6.7 Analyse du phosphore assimilable (P₂O₅)	100

7.Paramètres étudiés	101
7.1 Paramètres biochimiques et physiologiques	101
7.2. Paramètres édaphiques	107
7.3. Paramètres morphologiques	108
7.4. Paramètres agronomiques	112
8.Analyses statistiques	113
Partie 3: résultats et discussion	114
Chapitre 1 : Résultats et interprétations	115
1.Analyses physico-chimiques du substrat	115
2.Paramètres biochimiques et physiologiques	118
2.1.Teneur relative en eau (TRE)	118
2.2.Stabilité membranaire (SM)	120
2.3.Teneur en proline (PRO)	122
2.4.Teneur en sucres solubles (SS)	123
2.5.Teneur en chlorophylle a (CHLa)	125
2.6.Teneur en chlorophylle b (CHLb)	126
2.7.Teneur en chlorophylle totale (CHLab)	127
2.8 Teneur en azote total dans les tissus végétaux (NV)	129
3.Paramètres édaphiques	131
3.1.Teneur en phosphore assimilable du substrat (P₂O₅)	131
3.2.Teneur en azote total du substrat (N)	133
4.Paramètres morphologiques	135
4.1.Surface foliaire (SF)	135
4.2.Longueur de la tige (LT)	136
4.3.Hauteur de la plante (HP)	138
4.4.Longueur du col de l'épi (LCE)	140
4.5.Longueur de l'épi (LEP)	141
4.6.Longueur des barbes (LB)	143
4.7.Longueur des racines (LR)	144
4.8.Biomasse aérienne (BIOA)	147
4.9.Poids sec de la tige (PST)	148
4.10. Biomasse des épis (BIOE)	149
4.11. Poids sec racinaire (PSR)	151
4.12. Poids frais racinaire (PFR)	152
4.13. Le rapport Poids sec / Poids frais de la partie racinaire (PSR/PFR)	153

5. Paramètres de rendement	156
5.1. Nombre de talles par plant (NTL)	156
5.2. Nombre d'épis par plant (NEP)	157
5.3. Nombre de grains par épi (NGE)	158
5.4. Poids de mille grains (PMG)	159
5.5. Rendement réel (Rdt)	160
5.6. Indice de récolte (IR)	162
6. Résultats de l'analyse en composantes principales (ACP)	164
6.1. ACP en condition de stress hydrique	164
6.2. ACP en condition hydrique non stressée	167
7. Matrice de corrélation	170
7.1. Matrice de corrélation en condition de stress hydrique	170
7.2. Matrice de corrélation en condition hydrique contrôlée	172
8. Résultats de l'Analyse hiérarchique ascendante	175
8.1. Classification hiérarchique ascendante (AHC) en condition de stress hydrique	175
8.2. Classification hiérarchique ascendante (AHC) en condition hydrique contrôlée ...	177
Discussion	180
1.Effet des PGPR sur les paramètres biochimiques et physiologiques	181
1.1.Teneur relative en eau (TRE)	181
1.2.La stabilité membranaire (SM)	182
1.3.Les pigments chlorophylliens	183
1.4.Teneurs en sucres solubles (SS)	184
1.5 Teneurs en proline (PRO)	185
2. Effet des PGPR sur les paramètres édaphiques	187
2.1.Azote total du substrat (N) et le phosphore assimilable du substrat	187
3. Effet des PGPR sur les paramètres morphologiques	188
3.1. Hauteur de la plante (HP) et longueur de la tige (LT)	189
3.2 La longueur racinaire (LR)	190
3.3 Surface foliaire (SF)	191
3.4 Poids sec racinaire	192
3.5 Poids frais racinaire	193
3.6 Le rapport Poids sec / Poids frais de la partie racinaire (PSR/PFR)	193
3.7 Longueur de l'épi (LEP)	194
3.8 Longueur du col de l'épi (LCE)	195
3.9 Longueur des barbes (LB)	195

3.10 Biomasse des épis	196
4. Effet des PGPR sur les paramètres agronomiques	197
4.1. Nombre de talles (NTL)	197
4.2 Nombre d'épis par plante (NEP)	198
4.3 Poids de mille grains (PMG)	199
4.4 Rendement réel (Rdt)	200
4.5 Indice de récolte (IR)	200
Conclusion	202
Références bibliographiques	206
Annexes	238

Résumé

L'orge, culture stratégique à l'échelle mondiale et nationale, est fortement affectée par le stress hydrique, qui constitue l'une des principales contraintes limitant sa production. Afin d'atténuer les effets de ce stress, la présente étude explore l'utilisation de bactéries promotrices de croissance des plantes (PGPR) comme solution biologique visant à renforcer la tolérance de l'orge au déficit hydrique. Quatre souches bactériennes (H1, H3, H9 et H13), sélectionnées pour leurs propriétés bénéfiques, ont été combinées en 11 consortiums (T1 à T11) et testées sous deux régimes hydriques (stressé et non stressé). L'expérimentation a été menée sous serre selon un plan en blocs aléatoires complets, croisant deux facteurs : le régime hydrique et les traitements bactériens. L'exposition à un déficit hydrique a entraîné une réduction significative de nombreux paramètres liés à la croissance et au rendement des plants. Les effets des différentes combinaisons bactériennes se sont révélés variables, et certaines ont permis d'atténuer de manière significative l'impact du stress hydrique sur l'orge. Des améliorations importantes ont été observées sur la biomasse aérienne, la biomasse racinaire, la morphologie de l'épi, le nombre de grains par épi ainsi que sur l'indice de récolte et le rendement. Des interactions intéressantes ont été trouvées entre les consortiums bactériens et les niveaux de régime hydrique, soulignant le rôle déterminant de certaines associations microbiennes dans l'adaptation de l'orge à la sécheresse. Ces résultats confirment l'intérêt des PGPR en tant que biostimulants naturels, susceptibles de soutenir la productivité agricole dans un contexte de raréfaction des ressources en eau.

Mots-clés : Orge, Stress hydrique, PGPR , Consortium bactérien , Biostimulants, Tolérance au stress

Abstract

Barley, a strategic crop on a global and national scale, is severely affected by water stress, which is one of the main constraints limiting its production. In order to mitigate the effects of this stress, this study explores the use of plant growth-promoting bacteria (PGPR) as a biological solution to enhance barley's tolerance to water deficit. Four bacterial strains (H1, H3, H9, and H13), selected for their beneficial properties, were combined into 11 consortia (T1 to T11) and tested under two water regimes (stressed and non-stressed). The experiment

was conducted in a greenhouse using a completely randomized block design, crossing two factors: water regime and bacterial treatments. Exposure to water deficit led to a significant reduction in many parameters related to plant growth and yield. The effects of the different bacterial combinations varied, with some significantly mitigating the impact of water stress on barley. Significant improvements were observed in above-ground biomass, root biomass, ear morphology, number of grains per ear, harvest index, and yield. Interesting interactions were found between bacterial consortia and water regime levels, highlighting the decisive role of certain microbial associations in barley's adaptation to drought. These results confirm the value of PGPR as natural biostimulants, capable of supporting agricultural productivity in a context of water scarcity.

Keywords : Barley, Drought stress, PGPR (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria), Bacterial consortium, Biostimulants, Stress tolerance.

ملخص

الشعير، وهو محصول استراتيجي على الصعيد العالمي و الوطني، يتأثر بشدة بالجفاف، الذي يشكل أحد العوائق الرئيسية التي تحد من إنتاجه. من أجل التخفيف من آثار هذا الجفاف، تستكشف هذه الدراسة استخدام البكتيريا المساعدة على نمو النباتات كحل بيولوجي يهدف إلى تعزيز تحمل الشعير لنقص المياه. تم اختيار أربع سلالات بكتيرية لخصائصها المفيدة، وتم دمجها في 11 مجموعة واختبارها في ظل نظامين مائيين (إجهاد وعدم إجهاد). أجريت التجربة في بيت بلاستيكي وفقاً لخطة كتل عشوائية كاملة، حيث تمت مزج عاملين: النظام المائي والمعالجات البكتيرية. أدى التعرض لنقص المياه إلى انخفاض كبير في العديد من المعلمات المتعلقة بنمو النباتات ومحصولها. تباينت آثار التركيبات البكتيرية المختلفة، حيث ساهمت بعضها في التخفيف بشكل كبير من تأثير الإجهاد المائي على الشعير. لوحظت تحسينات كبيرة في الكتلة الحيوية الهوائية والكتلة الحيوية الجذرية وشكل السنابل وعدد الحبوب في كل سنابل، وكذلك في مؤشر المحصول والغلة. وقد لوحظت تفاعلات ملحوظة بين التجمعات البكتيرية ومستويات النظام المائي، مما يؤكد الدور الحاسم لبعض التجمعات الميكروبية في تكيف الشعير مع الجفاف. وتؤكد هذه النتائج أهمية البكتيريا المحفزة للنمو كمنشطات حيوية طبيعية، قادرة على دعم الإنتاجية الزراعية في سياق ندرة الموارد المائية.

الكلمات المفتاحية : الشعير، الإجهاد المائي، البكتيريا المساعدة على نمو النبات ، التجمعات البكتيرية ، المحفزات الحيوية ، تحمل الاجهاد