

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou



Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques
Département de Biochimie et Microbiologie

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master Académique

Filière : Biotechnologie

Spécialité : Biotechnologie Microbienne

Thème :

Amélioration de la croissance de blé dur (*Triticum durum*) en milieu salin par inoculation avec les PGPR

Présenté par :

BEREDIAFE BOURAHLA FATIMA

MEDJEKANE MANEL

MEHALLA ASMA

Devant le jury composé de :

Président : Mr. OUELHADJ A.

Professeur à l'UMMTO.

Promotrice : Mme BENZAOUZ K.

Maitre de conférences B à l'UMMTO.

Examinatrice : Mme BACHIR K.

Maitre de conférences B à l'UMMTO.

Année universitaire : 2022/2023

Remerciements

En premier, nous tenons à remercier le Dieu le tout puissant de nous avoir donné la force et la persévérance pour faire aboutir ce travail.

Nous exprimons nos vifs remerciements et toute notre profonde reconnaissance à notre promotrice Madame BENAZZOUZ K. pour son suivi, son aide, ses orientations, sa patience, ses conseils et sa grande gentillesse, et qui nous a fait l'honneur en nous encadrant dans ce travail.

Nous adressons aussi nos vifs remerciements à Monsieur OUELHADJ A. et à Madame BACHIR K. Pour avoir bien voulu examiner et juger ce travail.

Nous remercions également les ingénieurs du Laboratoire d'analyse microbiologique et pour leur disponibilité ainsi que leurs conseils inestimables.

On voudrait également remercier Monsieur Houali K. le directeur du laboratoire LABAB pour son accueil, pour les moyens nécessaires pour le bon déroulement de notre travail.

Nous tenons à exprimer nos profondes reconnaissances et chaleureux remerciements à nos très chers parents pour leurs soutiens et leurs encouragements durant tout notre cycle d'étude.

Ainsi que toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail, pour leur confiance et leurs conseils.



Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à **ma chère grand-mère « Ayyi »**, que son âme repose en paix. Ton départ le 4 janvier 2023 a laissé un vide immense dans nos vies, mais chaque mot de ce mémoire est un hommage à ton amour, à la sagesse de tes conseils et à la douceur de ton sourire. Tu n'étais pas la maman qui m'a mis au monde, mais celle qui m'a élevée avec tant d'amour et de dévouement. Ton esprit vit en moi à chaque instant, et je t'honore avec tout mon amour et ma reconnaissance éternelle pour tout ce que tu as apporté à ma vie.*

*À **mon cher petit frère**, mon compagnon de vie, ton existence seule est la plus précieuse des bénédictions. Ta présence dans ma vie est le plus beau des cadeaux. Je t'aime plus que les mots ne peuvent le dire.*

*À **mes parents**, qui m'ont inculqué des valeurs inestimables, je dédie ce mémoire avec une profonde reconnaissance.*

*Enfin, à **mes meilleurs amis, Adel, Amine, Patrick et Robert**, je vous rends hommage ici avec une gratitude débordante. Vous avez été mes épaules sur lesquelles pleurer, mes rires dans les moments sombres, et mes complices dans cette aventure qu'est la vie. Ce mémoire est le reflet de notre amitié indéfectible, et je vous remercie du fond du cœur d'avoir toujours été là pour moi.*

Fatima





Dédicaces

Je dédie ce travail :

A ma mère Zahra, pour ses encouragements et ses sacrifices.

A mon père Brahim, pour son soutien, son affection et la confiance qu'il m'a accordé.

A mes frères et sœur : Sidi Ali, Younes, Mouhamad et Bouchra.

A mes chères tantes, mes cousines et cousins a toutes la famille Mehalla.

A mes chères amies Dihya, Assia, Nawel et Nesrine.

A tous ceux que j'ai connu et je n'ai pas pu citer.

Asma .M



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

Avec grand sentiment et une joie immense

A mes chères parents pour leurs encouragements et leurs sacrifices tout au long de mes études et j'espère qu'un jour je serais capable de leur donner au moins le minimum car quoique je fasse ou je dise je n'arriverai jamais à leurs rendre tout.

A mes chères et adorables sœurs :

Lamia** et son époux **Smail

*Et ses petits-enfants **Rania, Marwa, Islam et Amine***

Rachida** et son époux **Samir** et son enfant **Sid Ali Sonia

*et son époux **Farid** et son enfant **Mohamed Amine Lydia***

*et **Kenza***

*A mes chères frères : **Abdelghani** et **Massinissa***

Je vous dis merci pour votre indéfectible soutien. Que dieu vous accorde une longue vie.

A toute ma famille maternelle et paternelle,

*A ma très chère amie **Kamilia** qui m'a toujours soutenu et encouragé au cours de la réalisation de ce mémoire.*

A tous mes camarades de la promotion Master 2 Biotechnologie Microbienne

Manel



Liste d'abréviations

ACC : Acetyl-CoA carboxylase

AG : Gibbérellines

ARN : L'acide ribonucléique

CE : conductivité électrique

CNRA : Centre National de Recherches Agronomiques

EPS : Exopolysaccharides

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

IAA : L'acide indol-3-acétique

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique

INRAA : Institut National de la Recherche Agronomique d'Algérie

INSID : Institut National des Sols, de l'Irrigation et du Drainage

Kcl - Chlorure de potassium

MgSO₄ : Sulfate de magnésium

PGPR : Rhizobactéries Favorisant la Croissance des Plantes (en anglais : Plant Growth-Promoting Rhizobacteria)

ROS : Espèces réactives de l'oxygène (en anglais : Reactive oxygen species)

RCP : Les régulateurs de la croissance et du développement des plantes

RGA : Recensement Général de l'Agriculture

SAU : Superficie Agricole Utile

USDA : Département de l'Agriculture des États-Unis (en anglais : United States Department of Agriculture)

Liste des figures

Figure 01 : Origine et diffusion de blé (Bonjean, 2001).	5
Figure 02 : Morphologie du blé (Sadouki, 2018).	7
Figure 03 : Signalisation cellulaire du stress salin (Zhu, 2003).	10
Figure 04 : Distribution mondiale des sols salins et sodiques (Anonyme, 2015).	13
Figure 05 : Effet de la salinité sur le développement des plantes (Egamberdieva et <i>al.</i> , 2019).	15
Figure 06 : Représentation schématique des trois zones de la rhizosphère (Lynch, 1983)..	17
Figure 07 : Mécanisme phytobénéfiques des PGPR dans la rhizosphère (Khan et <i>al.</i> , 2009).	22
Figure 08 : Mécanisme impliqués par les PGPR dans la tolérance des plantes vis- à- vis le stress salin (Ashraf et <i>al.</i> , 2008).	26
Figure 09 : Localisation géographique de la région de prélèvement.....	28
Figure 10 : Echantillon du sol utilisé.....	29
Figure 11 : Inoculation des graines.	34
Figure 12 : Mise en germination des graines après bactérisation.....	34
Figure 13: Semis des graines du blé dur (<i>Triticum durum</i>) dans les pots..	36
Figure 14 : Solutions salines (Na Cl).	36
Figure 15 : Application du stress salin.	37
Figure 16 : Aspect des colonies des souches bactériennes formées sur une gélose nutritive.	42
Figure 17 : Aspect microscopique des souches bactériennes avec le grossissement 100X.	43
Figure 18 : Effets de la bacterisation par les différentes souches sur le taux de germination des graines du blé dur.....	44
Figure 19 : Résultats du test de germination.	44
Figure 20 : Effet de la bacterisation par différentes souches bactériennes sur le temps moyen de germination des graines de blé dur.	45
Figure 21 : Effet de l'inoculation par <i>Bacillus</i> sp.3, <i>Bacillus</i> sp.4 et leur combinaison	45

(conditions d'asepsie, conditions naturelles) sur la croissance du blé dur sous différentes concentrations de NaCl (50,100et 150 Mm).....	45
Figure 22 : Effet de l'inoculation bactérienne sur la hauteur de la partie aérienne du blé dur sous différentes concentrations de Na Cl (50,100et 150 mM).....	46
Figure 23 : Effet de l'inoculation bactérienne sur la longueur du système racinaire du blé dur sous différentes concentrations de NaCl (50, 100 et 150 mM).....	47
Figure 24 : Effet de l'inoculation bactérienne sur le poids frais des racines du blé dur sous différentes concentrations de NaCl (50, 100 et 150 mM).....	49
Figure 25 : Effet de l'inoculation bactérienne sur le poids sec des racines du blé dur sous différentes concentrations de Na Cl (50, 100 et 150mM).....	50
Figure 26 : Effet de l'inoculation bactérienne sur le poids frais des tiges et feuilles de Blé dur sous différentes concentrations de NaCl (50, 100 et 150 mM).....	51
Figure 27 : Effet de l'inoculation bactérienne sur le poids sec des tiges et feuilles du blé dur sous différentes concentrations de NaCl (50, 100 et 150 mM).....	51
Figure 28 : Effet de la bacterisation sur le taux de chlorophylle a,b et totale (mg/g de matière fraîche) dans les feuilles du blé dur sous différentes concentrations de Na Cl (50,100 et 150mM).....	53
Figure 29 : effet de la bacterisation sur la teneur en cendres % dans les racines du blé dur sous différentes concentrations de NaCl (50mM,100mMet 150mM).....	54

Liste des tableaux

Tableau I : Classification taxonomique du blé dur (Feillet, 2000).	3
Tableau II : Effets de quelques souches des PGPR sur l'amélioration de la croissance des cultures et des plantes en présence du stress salin.	23
Tableau III : Echelle du pH du sol (Gaucher, In : Soltser, 1981).....	23
Tableau V : Echelle de la texture (Soltser, 1981).....	31
Tableau VI : Détermination des paramètres physico-chimiques du sol étudié.	41
Tableau VII : Résultats de l'examen microscopique des souches bactériennes étudiées.....	42

Sommaire

Liste des abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction	1
I.1. Généralités sur le blé.....	3
I.2. Importance du blé.....	4
I.3. Origine	5
I.4. Production de blé en Algérie.....	5
I.5. Morphologie du blé.....	6
I.6. Croissance et développement de blé	8
I.6.1. Période végétative	8
I.6.1.1. Germination-levée.....	8
I.6.1.2. Début de tallage	8
I.6.1.3. Fin de tallage.....	8
I.6.2. Période reproductive	9
I.6.2.1. Montaison et épiaison	9
I.6.2.2. Floraison et maturation	9
I.7. Contraintes de la culture du blé en Algérie.....	9
I.7.1. Effet de la salinité sur le blé.....	9
I.7.2. Effet de la température sur le blé	10
I.7.3. Effet de la sécheresse sur le blé.....	10
II.1. Salinité	11
II .1.1. Salinisation primaire.....	11
II .1.2. Salinisation secondaire	12
II.2. Salinité dans le monde et en Algérie	12
II.3. Effet de la salinité sur les plantes	13

II.4. Stratégies d'adaptations des plantes aux stress salin	15
II .4.1. Activation des voies de signalisation du stress	15
II .4.2. Exclusion du sodium.....	16
II .4.3. Accumulation de solutés compatibles	16
II.5. Rhizosphère	16
II .5.1. Communautés microbiennes de la rhizosphère	18
II .5.2. Bactéries promotrice de la croissance des plantes (PGPR)	18
II .5.2.1. Différents genres de PGPR	19
II .5.2.1.1. <i>Bacillus</i>	19
II .5.2.1.2. <i>Pseudomonas</i>	19
II .5.2.1.3. <i>Rhizobia</i>	20
II .5.2.1.4. <i>Frankia</i>	20
II .6. Effets bénéfiques des PGPR sur les plantes.....	20
II .6.1. Production d'hormones de croissance	20
II .6.1.1. Acide indole-3-acétique (IAA)	21
II .6.1.2. Gibbérellines (AG)	21
II .6.1.3. Cytokinines	21
II .6.2. Fixation biologique de l'azote	21
II .6.3. Solubilisation de phosphate	22
II .7. Tolérance des PGPR vis-à-vis le stress salin	22
II.7.1. Production des protéines.....	24
II .7.2. Production des exopolysaccharides (EPS)	25
II.7.3. Production des enzymes (ACC) désaminase	25
II .7.4. Production des enzymes antioxydants	26
I.1. Cadre de l'étude	27
I.2. Objectif de l'étude.....	27
I.3. Matériel utilisé	27

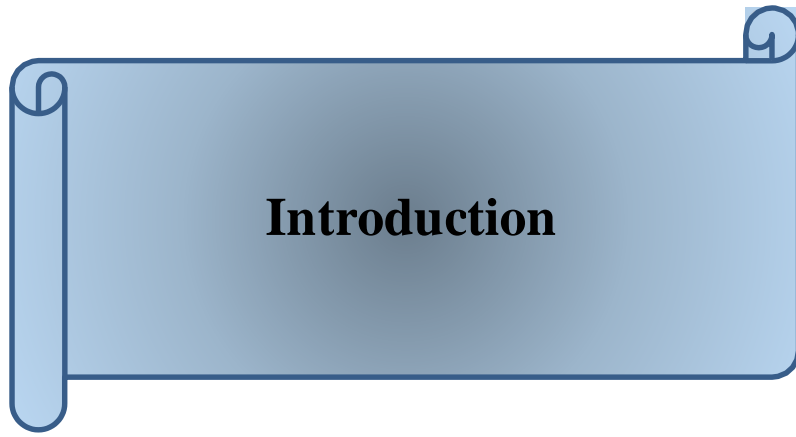
I.3.1. Souches bactériennes	27
I.3.2. Graines du blé	27
I.3.3. Produits chimiques	27
I.3.4. Appareillage et outillage	27
I.4. Méthodes	28
I.4.1. Prélèvement du sol	28
I.4.2. Détermination des paramètres physico-chimiques du sol	29
I.4.2.1. Mesure du pH	29
I.4.2.2. Conductivité électrique (C_E)	30
I.4.2.3. Texture	31
I.4.3.1. Caractérisation morphologique des souches bactériennes	32
I.4.4. Inoculation bactérienne des graines de blé dur	33
I.4.4.1. Désinfection superficielle des graines	33
I.4.4.2. Préparation de l'inoculum	33
I.4.4.3. Inoculation des graines et mise en germination	33
I.4.4.4. Paramètres étudiés	35
I.4.4.4.1. Taux de germination	35
I.4.4.4.2. Temps moyen de germination (TMG)	35
I.4.5. Evaluation de l'activité stimulatrice de la croissance des souches rhizobactériennes en présence du stress salin	35
I.4.5.1. Semis	35
I.4.5.2. Arrosage	36
I.4.5.3. Préparation des solutions de NaCl	36
I.4.5.4. Application du stress salin et rappel bactérien	37
I.4.5.5. Analyse des paramètres morpho-biochimiques	38
I.4.5.5.1. Paramètres morphologiques	38
I.4.5.5.2. Paramètres biochimiques	38

I.4.5.5.2.1. Dosage de chlorophylles	38
I.4.5.5.2.2. Teneur en cendres	39
II.1. Paramètres physico-chimiques du sol.....	41
II .2. Caractérisation morphologique des souches.....	41
II.3. Effet de l'inoculation bactérienne sur la germination des graines de blé dur.....	43
II .3.1. Taux de germination (TG).....	43
II .3.2. Vitesse moyenne de germination.....	44
II.4. Effets de l'inoculation bactérienne sur la croissance et sur les paramètres morpho- biochimiques du blé dur sous stress salin.....	45
II.4.1. Paramètres morphologiques.....	45
II.4.1.1. Hauteur des tiges et longueur du système racinaire.....	46
II.4.1.2. Poids frais et sec des racines.....	48
II.4.1.3. Poids frais et sec des tiges	50
II.4.2. Paramètres biochimiques	52
II.4.2.1. Taux de la chlorophylle	52
II.4.2.2. Teneur en cendres	54
Conclusion.....	56

Références bibliographiques

Annexes

Résumé



Introduction

Introduction

Les céréales occupent une place importante à l'échelle mondiale dans les programmes de recherches agricole. Elles sont considérées comme une principale source de la nutrition humaine et animale dans tous les pays du monde, et surtout les pays africains.

Parmi les céréales cultivées en Algérie, il se trouve que la culture du blé est d'une importance primordiale parce qu'elle représente la matière première pour les produits d'alimentation de base (pain, pâtes alimentaires, couscous...). Toutefois, les cultures céréalières notamment celle du blé dur se trouvent exposées à de nombreux facteurs environnementaux qui limitent la production agricole, dont la salinité du sol est l'un des principaux stress abiotiques qui affectent fortement la croissance végétale, en particulier dans les régions arides et semi arides. (Djerroudi et *al.*, 2010).

La salinité du sol constitue l'une des principales contraintes responsables de la perte de rendement des cultures et la détérioration du couvert végétal. Si des solutions efficaces ne sont pas appliquées dans l'avenir, tel que le développement de cultures résistantes au sel, l'adoption de pratiques agricoles durables, et la mise en œuvre de techniques de gestion de l'eau, il y'aura augmentation de la salinisation des terres agricoles car selon l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (ONU), environ 900 millions d'hectares entre 20% des terres irriguées et 6% de la masse terrestre mondiale sont affectés par la salinité (Kumar et *al.*, 2020).

Diverses recherches, visant à développer les approches technologiques tel que la bioremédiation, la gestion de l'eau, la sélection des cultures résistantes au sel, consistant à modifier le sol salé par des mesures de remise en état ou à l'adoption des approches biotiques par l'utilisation des cultures végétales tolérantes au sel, ne sont pas une démarche facile et économique pour une agriculture durable.

L'utilisation des technologies microbiennes dans l'agriculture s'étend très rapidement par l'identification de nouvelles souches bactériennes, efficaces pour améliorer la

croissance des plantes dans les sols salins. Ces bactéries portent l'appellation de " Plant Growth Promoting Rhizobacteria" (PGPR).

De nombreuses études ont démontré que l'utilisation des PGPR comme inoculum dans l'agriculture peut améliorer la production et le rendement dans les régions touchées par la salinité. Ainsi, l'inoculation des plantes stressées par des souches PGPR atténue le stress salin (Ashraf et *al.*, 2008 ; Sahran et Nehra, 2011). La croissance des microorganismes halotolérants, associés aux racines des plantes peuvent conduire à une meilleure fertilité des sols salin (Halman et *al.*, 1997).

Dans ce contexte, l'objectif de notre travail est l'évaluation de l'effet des PGPR dans l'amélioration de la croissance du blé dur dans les conditions de stress salin.

Notre travail est subdivisé en plusieurs parties :

-Une introduction générale.

-Une étude bibliographique qui rassemble des données sur le blé, la salinité ainsi que les rhizobactéries promotrices de la croissance des plantes (PGPR).


-Une description du matériel et des méthodes utilisées dans l'essai.

-Présentation des résultats obtenus et leur discussion.

-Ce travail s'achève par une conclusion générale.



Première partie
Synthèse bibliographique



**Chapitre I : Généralités sur
les céréales**

I.1. Généralités sur le blé

Le blé est une plante monocotylédone de l'ordre des poales, de la famille des Poaceae appartenant au genre *Triticum*. C'est une céréale dont le fruit sec et indéhiscent, est appelé caryopse. Les deux espèces les plus cultivées et les plus importantes sont le blé tendre (*Triticum aestivum*) et le blé dur (*Triticum durum* Desf) (Feillet, 2000), mais il existe de nombreuses autres espèces qui se différencient par leur degré de ploïdie (diploïde, tétraploïde et hexaploïde) ainsi que par leur nombre de chromosomes (14, 28 et 42 respectivement) (Bendradji, 2013).

Une classification détaillée est illustrée dans le tableau ci-dessous (tableau I).

Tableau I : Classification taxonomique du blé dur (Feillet, 2000).

règne	Plantae
embranchement	Spermatophyta
Sous-embranchement	Angiospermae
Classe	Monocotylédones
Ordre	Poales
Famille	Poaceae
Genre	<i>Triticum</i>
Espèces	<i>Triticum durum</i> (blé dur)

Le blé, avec le maïs et le riz, fait partie des trois principales céréales (Borrelli et al., 2017). En termes de production mondiale, le blé est la troisième espèce la plus cultivée et est la plus consommée par l'Homme (FAO, 2021). En Algérie, le blé est une culture de grande envergure et occupe une superficie importante de 2 381 741 km². (USDA, 2021).

Le blé dur est principalement utilisé pour la production de semoule, qui est utilisée dans la fabrication de pâtes alimentaires et de couscous. Il est également utilisé pour la production de farine destinée à la panification, en particulier pour la fabrication du pain.

Le blé dur se distingue par sa teneur élevée en gluten, une protéine qui confère l'élasticité à la pâte et permet d'obtenir des produits de boulangerie de qualité (Feillet, 2000).

I.2. Importance du blé

Le blé, en particulier le blé dur (*Triticum durum* Desf.), est une céréale d'une grande importance économique, culturelle et alimentaire. Depuis des millénaires, le blé a constitué l'aliment de base dans de nombreuses civilisations et fait partie intégrante de l'alimentation humaine (Feillet, 2000).

Le blé tendre est la variété la plus couramment cultivée dans le monde. Il est utilisé pour produire une large gamme de produits alimentaires, tels que le pain, les pâtes, les biscuits et les céréales. Il est également utilisé dans l'industrie brassicole pour la fabrication de la bière. Il possède une teneur en gluten modérée, ce qui donne des produits finis avec une texture plus tendre (Feillet, 2000).

Selon la FAO (2017), le blé dur est également considéré comme une source majeure de protéines. En tant que céréale complète, le blé est riche en éléments nutritifs essentiels tels que les glucides, les protéines, les vitamines du groupe B, les minéraux et les oligoéléments. Il fournit une importante source d'amidon, de protéines à composition variable en acides aminés et de nombreux autres nutriments nécessaires à l'organisme.

Outre son importance alimentaire, le blé dur trouve également des applications dans l'alimentation animale ainsi que dans divers secteurs industriels. Par exemple, la paille de blé dur peut être utilisée pour l'alimentation des animaux, comme litière, ou même pour la couverture de toits. Dans les pays du Maghreb, le blé dur est privilégié dans la fabrication du couscous, un plat traditionnel emblématique de la région.

I.3. Origine

La découverte du blé remonte à 15000 ans avant Jésus-Christ au Proche –Orient, espace connu sous le nom du Croissant fertile.

Le blé dur provient des territoires de la Turquie, de la Syrie, de l’Iraq et de l’Iran. La culture du blé s’est diffusée vers le Nord-Ouest par les plaines côtières du bassin méditerranéen et arrivée jusqu’au Balkans (URSS), la vallée du Danube (Allemagne) et aussi la vallée du Rhin (France) (Feldman, 2001) (Figure 01).

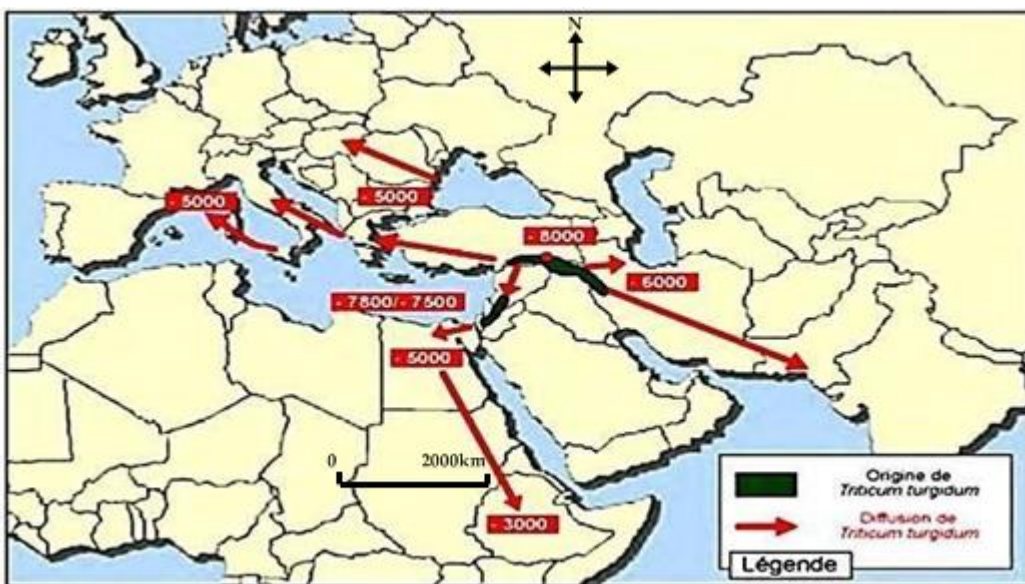


Figure 01 : Origine et diffusion de blé (Bonjean, 2001).

I.4. Production de blé en Algérie

La production céréalière en Algérie présente une caractéristique fondamentale depuis l’indépendance à travers l’extrême variabilité du volume des récoltes. Cette particularité témoigne d’une maîtrise insuffisante de cette culture et de l’indice des aléas climatiques. Cette production est conduite en extensif, elle constitue la principale activité, notamment dans les zones arides et semi-arides.

La campagne agricole du blé dur 2017/2018 a été marquée par une importante production évaluée à 31,8 millions de quintaux, contre 19,9 millions de quintaux marqués durant la

compagne précédente, soit une hausse de 60%, et le blé tendre avec 8 millions de quintaux contre 4,4 millions de quintaux lors de la compagne agricole antérieure, soit une augmentation de 80 %.

Cependant, en Algérie en 2021 on a enregistré une production de blé dur et tendre qui s'élève à 13 millions de quintaux au niveau de l'OAIC, soit une grande baisse par rapport à la saison précédente.

Durant la saison 2019-2020 L'Algérie avait enregistré une récolte de blé tendre et de blé dur de près de 40 millions de quintaux, malgré une météo toujours aussi peu généreuse.

La production du blé en Algérie est encore faible et instable d'une année à l'autre, elle ne couvre que 20 à 25 % des besoins du pays, le reste étant importé. La cause principale de cette faiblesse est due à des contraintes abiotiques, biotiques et humaines. Ce qui classe l'Algérie comme l'un des plus importateurs de céréales.

I.5. Morphologie du blé

Selon Khan et Shewry (2009), le blé commun (*Triticum aestivum*), présente une morphologie complexe et bien définie. La plante de blé se compose de différentes parties, chacune ayant un rôle spécifique dans son développement et sa reproduction (Figure 02) :

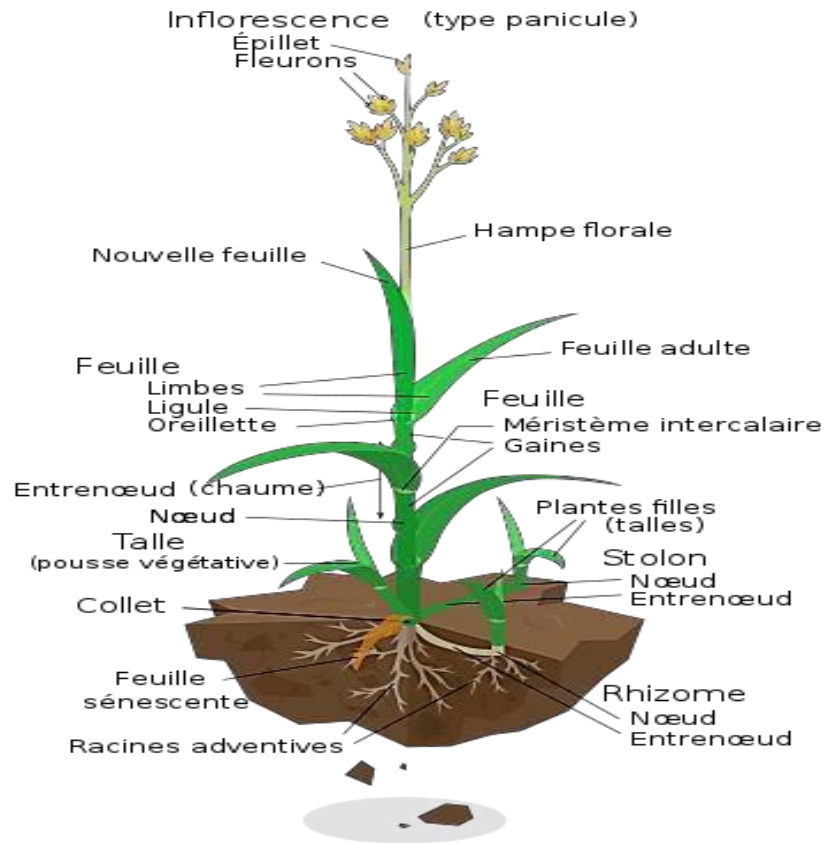


Figure 02 : Morphologie du blé (Sadouki, 2018).

- La tige aérienne porte le nom de chaume ; elle est creuse et cylindrique ; sa cavité est interrompue régulièrement, au niveau des nœuds, par des diaphragmes. La partie végétative du chaume se ramifie fréquemment à la base. Au niveau des nœuds, au contact du sol, apparaissent des bourgeons et des racines engendrant un nouvel axe feuillé (Dupont., Guignard, 2012.).
- Les racines du blé sont pourvues de nombreuses racines, dites fasciculées vu leur forme en faisceaux, qui prennent naissance à la base de la tige. Elles sont de type fasciculé dont ; 55 % du poids total des racines se trouve entre 0 et 25 cm de profondeur (Clement et Prat, 1970).
- Les feuilles sont alternées, ligulées et engainantes. Elles ont des nervures parallèles et sont terminées en pointe (Clement et Prat, 1970).
- L'inflorescence est toujours en épillets associés en inflorescence épis, se recouvrant étroitement les uns aux autres (Bonjean et Picard, 1990).

- Le grain de blé dur est un fruit, appelé caryopse, c'est-à-dire un akène dont l'enveloppe est intimement soudée au tégument de la graine (Dupont et Guignard, 2012).

I.6. Croissance et développement de blé

Le cycle de développement du blé est constitué d'une série d'étapes séparées par des stades repérés, permettant de diviser en deux périodes la vie des céréales. Une période végétative qui s'étend de la germination au tallage et une période reproductrice qui comporte les phases montaison, épiaison, floraison et maturation (Feillet, 2000).

I.6.1. Période végétative

I.6.1.1. Germination-levée

La germination est caractérisée par l'imbibition de la semence, la réactivation des enzymes et la dégradation des réserves assimilables par l'embryon, la radicule se dégage des enveloppes séminales (Boufenar *et al.*, 2006).

La levée est le passage à une vie autotrophe grâce à la chlorophylle contenue dans la première feuille, elle est notée lorsque 50% des plantes sont sorties de la terre (Hamadache, 2001).

I.6.1.2. Début de tallage

Le tallage est une phase s'amorce à partir de la 4^{ème} feuille, la formation de la première talle se fait au stade 3 feuilles, la première talle primaire (mètre-brin) apparaît à l'aisselle de la première feuille du blé, la 2^{ème} et la 3^{ème} talle apparaissent à l'aisselle de la 2^{ème} et la 3^{ème} feuille (Hamadache, 2013).

I.6.1.3. Fin de tallage

La fin de tallage correspond à la fin de la période végétative et le début de la phase reproductrice, conditionnée par photopériode et la vernalisation qui autorisent l'élongation des entre-nœuds (Hamadache, 2001).

I.6.2. Période reproductive**I.6.2.1. Montaison et épiaison**

La montaison débute à la fin du tallage, elle est caractérisée par l'allongement des entre-nœuds et la différenciation des pièces florales.

L'épiaison c'est la sortie de l'épi de la graine de la dernière feuille, l'épillet terminal apparaît au-dessus de la graine de la dernière feuille (Giban et *al.*, 2003).

I.6.2.2. Floraison et maturation

La floraison est marquée par la sortie des étamines lors des épillets et se termine dès que toutes les étamines sont extériorisées. Le blé commence à changer de couleur il perd sa couleur verte pour tourner plus jaune, doré ou bronze (Soltner, 2005).

Durant la maturation, la graine va perdre progressivement son humidité. Elle débute à la fin du palier hydrique marqué par la stabilité de la teneur en eau des grains pendant 10 à 15 jours. Au-delà de cette période, le grain ne perdra que l'excès d'eau qu'il contient et passera progressivement au stade « rayable à l'angle » (20% d'humidité) puis, « cassant sous la dent » (15 à 16% d'humidité) (Giban et *al.*, 2003).

I.7. Contraintes de la culture du blé en Algérie**I.7.1. Effet de la salinité sur le blé**

La salinité du sol, due à une concentration élevée en sels solubles, peut avoir un impact significatif sur la croissance et le rendement du blé. Des études réalisées par Munns et Tester (2008), ont montré que l'excès de sel peut entraîner une diminution de la germination des graines, une réduction de la croissance des plantes, des perturbations dans l'absorption des nutriments et une diminution de la productivité. La salinité affecte également la physiologie de la plante en perturbant l'équilibre hydrique, en provoquant un stress osmotique et en affectant le métabolisme des plantes (Figure 03).

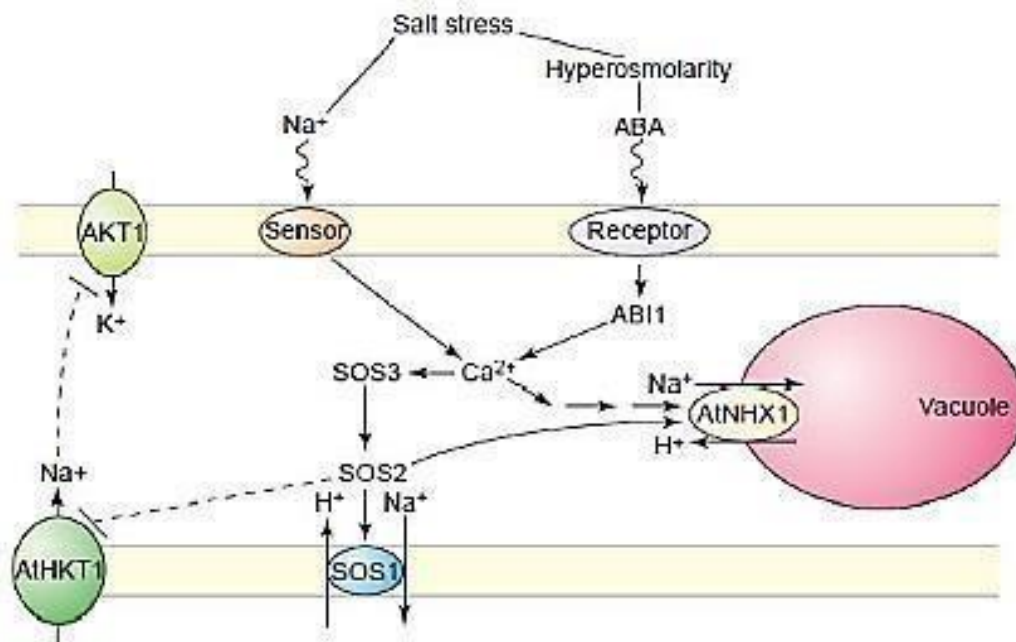


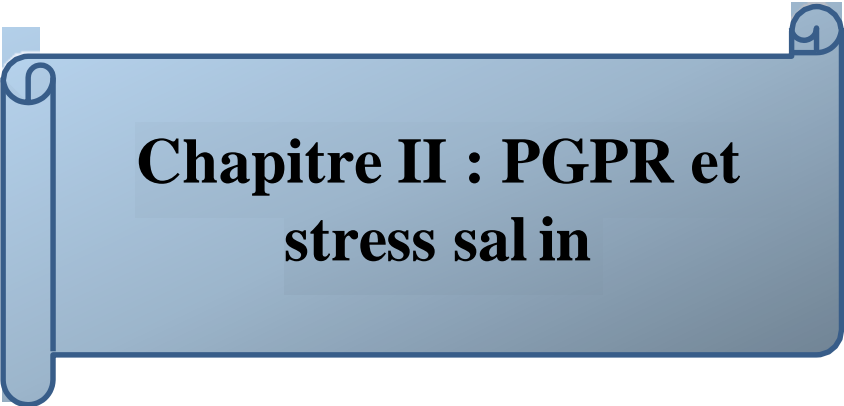
Figure 03 : Signalisation cellulaire du stress salin (Zhu, 2003).

I.7.2. Effet de la température sur le blé

La température joue un rôle crucial dans la croissance et le développement du blé. Des conditions de température optimales favorisent la germination, la croissance végétative, la floraison et la formation des grains. Cependant, des températures extrêmes, à la fois basses et élevées, peuvent entraîner des dommages importants aux cultures de blé. Prasad *et al.* (2006) ont constaté que le stress thermique peut provoquer des perturbations physiologiques, comme la dénaturation des protéines, des altérations de la membrane cellulaire, une réduction de la photosynthèse et une diminution de la production de grains.

I.7.3. Effet de la sécheresse sur le blé

La sécheresse est l'un des facteurs environnementaux les plus préjudiciables pour la culture du blé. Elle peut entraîner une réduction de la disponibilité en eau pour les plantes, entraînant un stress hydrique affectant la croissance racinaire, la photosynthèse, la transpiration et d'autres processus physiologiques du blé. Cela peut entraîner une diminution de la croissance, une diminution de la production de grains, une augmentation de la sensibilité aux maladies et une réduction de la qualité des grains (Flexas *et al.*, 2004).



Chapitre II : PGPR et stress salin

II.1. Salinité

La salinité constitue un problème majeur qui restreint la croissance et la productivité des plantes (Rekik et *al.*, 2017 ;Cherif et *al.*, 2019), nuisant ainsi à l'économie agricole et provoquant une dégradation sévère des terres dans de nombreux pays(Rekik et *al.*,2017 ;Cherif et *al.*,2019 ;Slama et *al.*, 2019).Dans le monde, 20 % des terres irriguées sont gravement endommagées par l'accumulation de sel (Selvakumar et *al.*, 2014).Par ailleurs, la production agricole doit augmenter pour répondre aux besoins d'une population mondiale en rapide croissance, estimée à atteindre 9,6 milliards d'habitants d'ici 2050 (Fischer et *al.*, 2009; Arzani et Ashraf, 2016; Fischer et *al.*, 2017; Zafar et *al.*, 2017; Hickey et *al.*, 2019). Cependant, cette expansion agricole entraîne une détérioration des terres, et il est prévu que cette dégradation atteindra jusqu'à 50 % d'ici 2050 (Hossain, 2019).

Un impact préoccupant de cette dégradation est la perte de rendement signalée, atteignant près de 70 % parmi les cultures céréalières telles que le blé, le riz, le maïs et l'orge, en raison de la contamination des sols par la salinité et la sodicité (Rajendran et *al.*, 2009 ; Hussain et *al.*, 2019).

La salinisation est un processus qui entraîne une augmentation de la concentration totale en sels dissous tels que le sodium, le potassium, le magnésium, le calcium, le chlorure, le sulfate et le carbonate dans l'eau et le sol et dans la zone racinaire qui occasionne des effets nocifs sur les végétaux et le sol, il s'en suit une diminution des rendements (Soukeina, 2010). Un sol est considéré comme salin lorsqu'il contient un excès de sels solubles. Généralement, la salinité des sols est classée en trois types différents : faible salinité (CE 2–4 dS/m), salinité modérée (CE 4–8 dS/m) et salinité élevée (CE > 8 dS/m) (Rogers et *al.*, 2005). La salinisation peut résulter de deux processus distincts, salinisation primaire et salinisation anthropique (secondaire).

II .1.1. Salinisation primaire

La salinisation primaire est due à l'accumulation de sels sur de longues périodes, soit dans le sol, soit dans les eaux souterraines. Elle est causée par deux processus naturels. Le premier processus provient de l'altération des matériaux d'origine contenant des sels solubles. L'altération des roches libère divers types de sels solubles, principalement des chlorures de sodium, de calcium et de magnésium, ainsi que dans une moindre mesure des

sulfates et des carbonates. Le chlorure de sodium est le sel le plus soluble. Le deuxième processus est le dépôt de sel océanique transporté par le vent et la pluie (Rangasamy, 2002).

II .1.2. Salinisation secondaire

La salinisation secondaire, également appelée anthropique, est causée par des activités humaines qui perturbent l'équilibre hydrologique du sol. Cela peut être dû au défrichage et au remplacement de la végétation vivace par des cultures annuelles, ainsi qu'à l'utilisation de systèmes d'irrigation avec de l'eau contenant des sels ou à un drainage insuffisant (Munns, 2009).

II.2. Salinité dans le monde et en Algérie

Les sols salins couvrent actuellement une surface importante du globe terrestre. On estime à plus de 900 millions d'ha la superficie des terres affectées par le sel dans le monde (figure 04), ce qui représente environ 6 % de la surface terrestre mondiale totale, soit environ 20 % de la superficie cultivée (Flowers, 2004). Sur les 230 millions d'ha de terres irriguées actuellement, 45 millions d'ha sont affectés par le sel (19,5%) et sur les 1500 millions d'ha de terres arides, 32 millions sont affectés par le sel à des degrés divers (2,1%) (FAO, 2008).

Les sols salés sont très répondeu en Algérie (3,2 millions d'hectares subissent à des degrés de sévérité variable) (Cherief et Bouhalili, 2018), le phénomène de salinisation dont une bonne partie se trouve localisée dans les régions steppiques où le processus de salinisation est plus marqué du fait des températures élevées durant presque toute l'année, du manque d'exutoire et de l'absence de drainage efficient. Ce phénomène est observé dans les plaines et vallées de l'ouest du pays (Mila, Cheliff, HabraSig, Maghnia) dans les hautes plaines de l'est (Constantine, Sétif, Bordj Bou Arreridj, Oum El Bouagui), aux abords des chotts et de Sebkhas (Chott Chergui, Chott Gharbi, Chott Hodna, Chott Melghir, Sebkha d'Oran, de Benziane, Zemmoul, Zazher Gharbi et Chergui, etc...) et dans le grand sud (dans les Oasis, le long des oueds, etc.). (INSID, 2008).

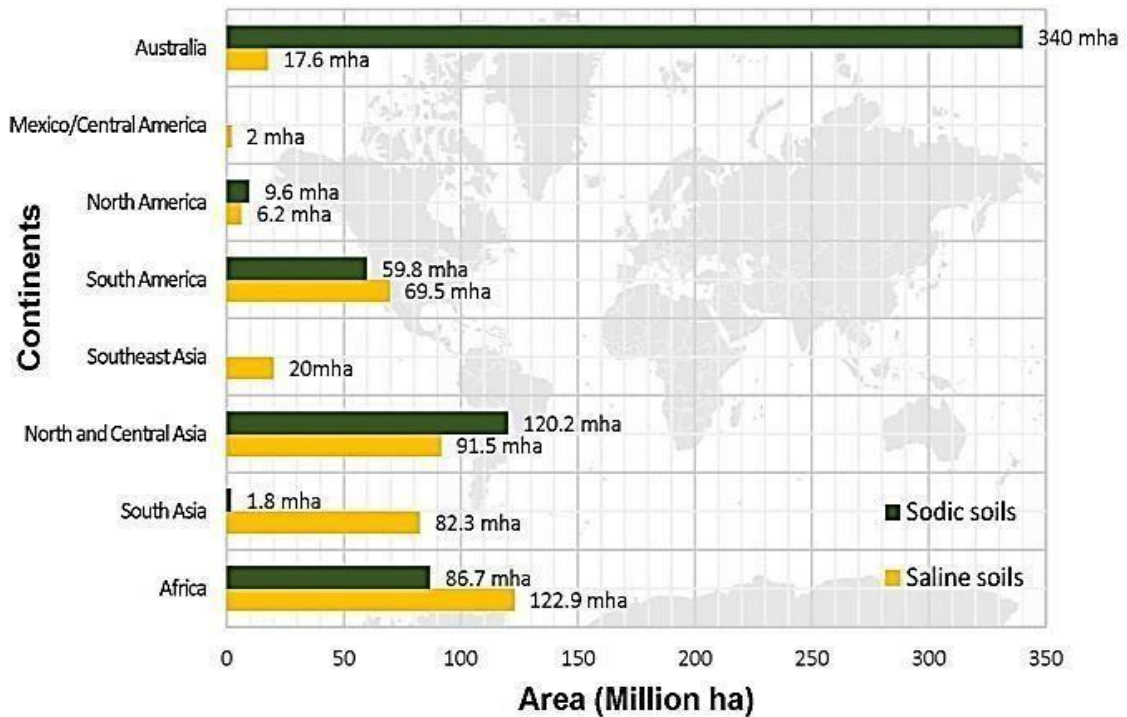


Figure 04 : Distribution mondiale des sols salins et sodiques (Anonyme, 2015).

II.3. Effet de la salinité sur les plantes

La croissance et le développement des plantes sont affectés par le stress salin à différents stades de croissance tels que la germination, la croissance végétative et le développement reproducteur (Shrivastava et Kumar, 2015). Ces effets néfastes sont principalement attribués aux modifications de l'eau cellulaire et du statut ionique des plantes en croissance (Munns et Tester, 2008). Les plantes sont généralement divisées en quatre catégories selon leur tolérance au sel : sensible, moyennement sensible, moyennement tolérante au sel et tolérante au sel. De nombreuses cultures céréalières sont considérées comme sensibles à un stress de salinité élevé ; les plants de blé tendre peuvent tolérer des niveaux de salinité jusqu'à 6 dSm⁻¹, tandis que les plants de maïs sont considérés comme moins tolérants et sont affectés négativement à des niveaux de salinité supérieurs à 2 dSm⁻¹. En cas de stress salin, le rendement de nombreuses céréales telles que le blé, le riz et l'orge est réduit (Arshadullah et al., 2017).

La salinité peut entraîner d'importants effets négatifs sur les caractéristiques morphologiques et physiologiques du blé. Elle altère la germination des graines de blé, la croissance des plantules, l'absorption d'eau, la photosynthèse, l'absorption des nutriments, les activités enzymatiques ainsi que le rendement. Plusieurs études ont révélé différents effets du stress salin sur différentes espèces et cultivars de blé, certains présentant une tolérance retenue tandis que d'autres se sont révélés sensibles (Hasanuzzaman et *al.*, 2017). Le blé tendre (*Triticum aestivum*) a montré des réactions réduites de tolérance à la salinité, tandis que le blé dur (*Triticum turgidum* subsp. *durum*) s'est avéré plus sensible en raison de son incapacité à exclure le sodium (Na⁺) de ses tissus (Roy et *al.*, 2014). Des niveaux élevés de salinité ont entraîné une réduction de la croissance et du développement de huit génotypes de blé dur jordanien par rapport aux traitements non salins (Abdel-Ghani, 2009).

Les plantes exposées au stress salin conduisent à la production des substances réactives de l'oxygène (ROS), tels que les radicaux anions superoxydes modifie l'activité antioxydante. Les ROS provoquent des dommages oxydatifs à des composantes cellulaires telles que les lipides et les protéines, entravant ainsi leurs fonctions normales et conduisent finalement à la morte de la plante (Del Rio et *al.*, 2003) (Figure 05).

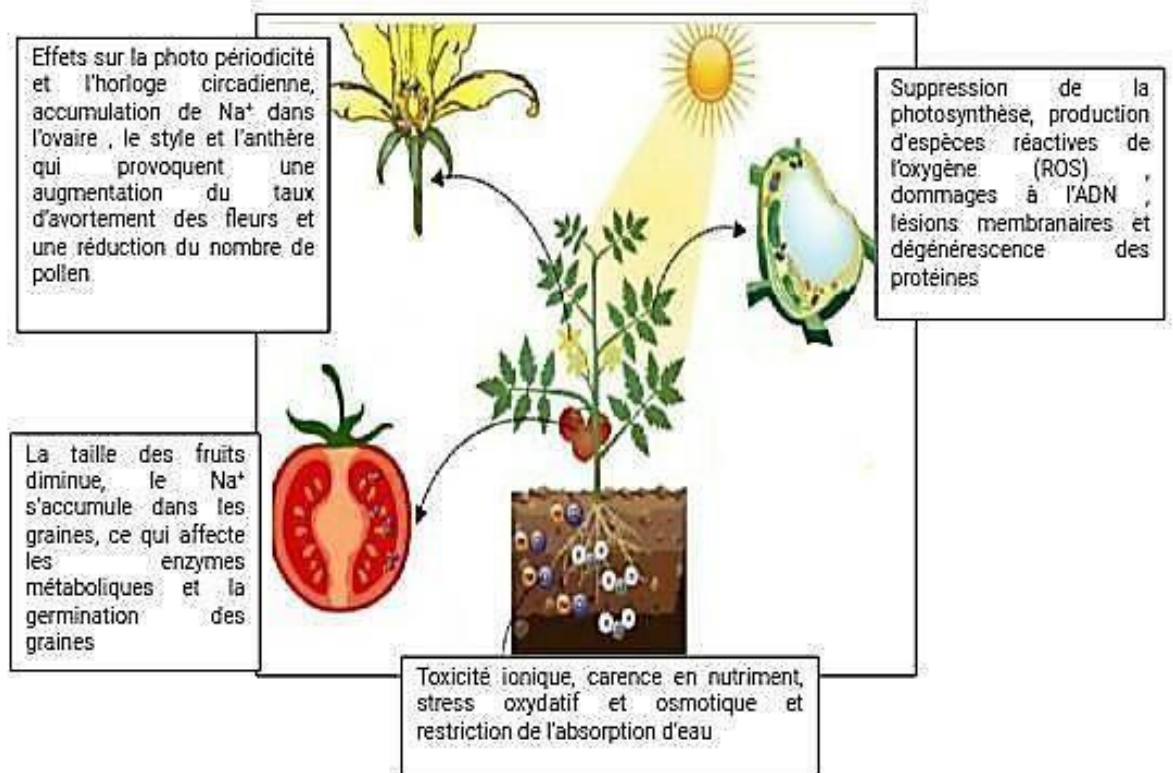


Figure 05 : Effet de la salinité sur le développement des plantes (Egamberdieva et *al.*, 2019).

II.4. Stratégies d'adaptations des plantes aux stress salin

Le stress salin, causé par une concentration élevée de sel dans le sol, peut avoir des effets dévastateurs sur la croissance et la survie des plantes. Cependant, au fil de l'évolution, les plantes ont développé des mécanismes sophistiqués pour survivre et prospérer dans de telles conditions hostiles. Parmi ces stratégies d'adaptation, nous pouvons observer plusieurs mécanismes clés qui permettent aux plantes de tolérer et de surmonter le stress salin.

II .4.1. Activation des voies de signalisation du stress

Lorsqu'elles sont soumises à un stress salin, les plantes activent des voies de signalisation spécifiques pour faire face à la situation. Ces voies de signalisation

déclenchent la production d'antioxydants et d'enzymes de détoxification pour protéger les cellules contre les dommages oxydatifs causés par le sel. Ce mécanisme de défense aide les plantes à maintenir leur fonctionnement cellulaire et à minimiser les effets négatifs du stress salin (Zhu, 2002).

II .4.2. Exclusion du sodium

L'une des stratégies d'adaptations des plantes au stress salin est l'exclusion du sodium. Les plantes ont la capacité de limiter l'entrée de sodium (sel) dans leurs tissus en régulant la perméabilité de leurs membranes cellulaires et en utilisant des transporteurs spécifiques pour exclure activement le sodium du cytoplasme (Munns et Tester, 2008). Cette régulation stricte permet aux plantes de maintenir un niveau de sodium bas dans leurs tissus, minimisant ainsi les effets néfastes du sel.

II .4.3. Accumulation de solutés compatibles

Une autre stratégie clé des plantes pour faire face au stress salin est l'accumulation de solutés compatibles. Les plantes peuvent accumuler des solutés compatibles, tels que la proline et glycine bêtaïne, en réponse au stress salin. Ces solutés aident à maintenir l'homéostasie osmotique en équilibrant la pression osmotique à l'intérieur des cellules et en protégeant les protéines et les structures cellulaires contre les dommages causés par le sel (Flowers et Colmer, 2008).

II.5. Rhizosphère

L'agronome et le physiologiste végétal allemand Lorenz Hiltner a créé en 1904 le terme "rhizosphère", qui vient de "rhiza" signifiant "racine" et de "sphèra" signifiant "ce qui entoure, la rhizosphère et l'un des systèmes les plus complexes considéré comme un point chaud de l'interaction plante-microbe. Le microbiome des plantes et de la rhizosphère a co-évolué pour des avantages mutuels (Eichmann et *al.*, 2021). Les plantes alimentent le microbiome de la rhizosphère avec des métabolites de carbone et d'azote par l'exsudation des racines. À leur tour, le microorganisme bénéfique contribue à l'absorption des nutriments, à la régulation des phytohormones et à la résistance aux stress biotique et abiotique de la plante. La

rhizosphère se divise en trois zones distinctes : l'endorhizosphère, le rhizoplan et l'ectorhizosphère (Figure 06).

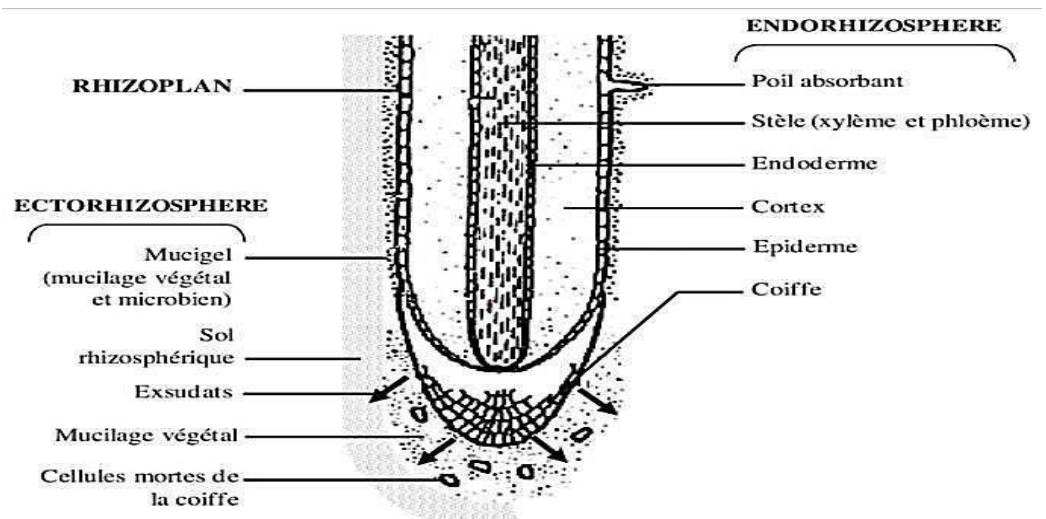


Figure 06 : Représentation schématique des trois zones de la rhizosphère (Lynch, 1983).

1. **L'endorhizosphère** fait référence aux tissus racinaires, comprenant le cortex racinaire, l'épiderme et les poils racinaires (Balandreau et Knowles, 1978). Elle représente l'intérieur de la racine et englobe le processus graduel de transition du sol vers l'intérieur de la racine, où les champignons et les bactéries pénètrent les cellules du parenchyme cortical de la plante en utilisant ses exsudats sans causer de dommages cellulaires (Maougal, 2014).
2. **Le rhizoplan** est la région de la surface des racines où les micro-organismes s'attachent en utilisant des structures de surface telles que les flagelles, les fimbriae ou les polysaccharides de surface cellulaire (Mwajita et *al.*, 2013).
3. **L'ectorhizosphère** fait référence au sol qui adhère aux racines ou qui est en contact direct avec la partie racinaire de la plante (Maougal, 2014).

II .5.1. Communautés microbiennes de la rhizosphère

La rhizosphère est un environnement qui abrite un large éventail de micro-organismes, comprenant des procaryotes tels que les archées, les bactéries et les virus, ainsi que des eucaryotes tels que les champignons, les oomycètes, les nématodes, les protozoaires, les algues et les arthropodes. Parmi ces organismes, les bactéries et les champignons sont les groupes les plus abondants et présentent des fonctions écologiques importantes. Les bactéries libres dans le sol qui se développent dans la rhizosphère colonisent les racines des plantes et facilitent leur croissance, et sont appelées des "Rhizobactéries favorisant la croissance des plantes" (PGPR) (Anirban et *al.*, 2021). Les bactéries favorisant la croissance des plantes prédominent parmi toutes les autres dans la rhizosphère. Des études ont solidement établi que la population bactérienne dans la rhizosphère est plus abondante que celle présente dans le sol environnant (Bahadur et *al.*, 2017 ; Verma et *al.*, 2017).

II .5.2. Bactéries promotrice de la croissance des plantes (PGPR)

Les bactéries qui résident dans la rhizosphère et qui ont la capacité de favoriser la croissance et la santé des plantes sont appelées collectivement les rhizobactéries favorisant la croissance des plantes ou « Plant Growth Promoting Rhizobacteria » (PGPR), ce terme introduit en 1978 par Kloepper et Schroth.

Les Rhizobactéries sont des micro-organismes qui vivent autour des racines des plantes et jouent un rôle très critique dans la fertilité du sol et peuvent augmenter la croissance des plantes et la productivité agricole (Asif et Basharat, 2022). Ces micro-organismes comprennent les bactéries rhizosphérique qui vivent librement telle que *Pseudomonas* spp., *Bacillus* spp., *Streptomyces* spp., *Burkholderia* spp., *Azospirillum* spp., ainsi que les bactéries qui établissent des relations symbiotiques spécifiques avec les plantes, telles que *Rhizobium* spp. et *Frankia* spp. (Glick ,2012).

II .5.2.1. Différents genres de PGPR

II .5.2.1.1. *Bacillus*

Les *Bacillus* sont des bactéries à Gram positif en forme bâtonnet, aérobies ou aéro- anaérobies facultatives, appartenant à la famille des *Bacillaceae*, l'ordre des *Bacillales*, la classe des *Bacilli* dans le *phylum* des Firmicutes. Ce genre représente une grande fraction de la communauté microbienne du sol (*Probanza et al.*, 2002). Leur habitat primaire est la rhizosphère particulièrement les systèmes racinaires des plantes ont un rôle dans la dénitrification et de la fixation d'azote. Elles sont potentiellement utiles comme agents de lutte biologique (*Nagorska et al.*, 2007), des producteurs d'antibiotiques et capables de solubiliser le phosphate. Ces bactéries sont capables de produire des endospores leur permettant de résister à des conditions environnementales défavorables (*Chibani*, 2017).

Ces espèces sont utilisées comme biofertilisants ont probablement des effets directs sur la croissance des plantes grâce à la synthèse d'hormones de croissance (*Amer et Utkhede*, 2007). Améliorent les différents paramètres de croissance des racines (la performance d'enracinement).

II .5.2.1.2. *Pseudomonas*

Les *Pseudomonas* forment un genre de bactéries à Gram négatif, appartiennent au *phylum* des *Proteobacteria*, la famille des *Pseudomonadaceae*, et à l'ordre des *Pseudomonales*. Les bactéries de ce genre sont généralement mobiles, non sporulées possédant une forme droite et fine. Ce sont des microorganismes ubiquitaires colonisent un large éventail d'environnements particulièrement la rhizosphère et les systèmes racinaires des plantes les rendant ainsi très intéressantes à être utilisées comme des PGPR (*Saharan et Nehra*, 2011).

Ces bactéries ont la capacité d'utiliser de nombreux substrats hydrocarbonés comme sources de carbone et d'énergie, produisent de nombreux métabolites antifongiques, des sidérophores appelés pyoverdines. Ces molécules améliorent la croissance et la santé des plantes et contribuent à l'acquisition du fer par les végétaux (*Amandine*, 2010).

II .5.2.1.3. *Rhizobia*

Les *rhizobiums*, sont des bactéries aérobies du sol appartenant à la famille des *Rhizobiaceae*. Ce sont des bâtonnets à gramme négatif, mobiles, ne forment pas des spores. Les *Rhizobia* peuvent améliorer la nutrition des plantes par la mobilisation du phosphate organique et inorganiques (Saharan et Nehra, 2011).

II .5.2.1.4. *Frankia*

Frankia sont des actinobactéries fixatrices d'azote qui peuvent vivre à l'état libre dans la rhizosphère ou en association symbiotique avec des plantes actinorhiziennes pionnières de la colonisation des sols pauvres ou perturbés (Duhoux et Nicole, 2004).

II .6. Effets bénéfiques des PGPR sur les plantes

Les PGPR ont la capacité de favoriser la croissance des plantes hôtes grâce à différentes actions, notamment la fixation de l'azote, la solubilisation de phosphate (Figure 07) (Nadji, 2017).

II .6.1. Production d'hormones de croissance

Les phytohormones sont des petites substances de nature organique produites naturellement par les plantes, appelées aussi des régulateurs de la croissance et du développement des plantes (RCP). Ces molécules jouent des rôles biochimiques, physiologiques et morphologiques dans la croissance et le développement des plantes (Hayat et *al.*, 2010). Plusieurs phytohormones comme les acides salicyliques, stimulent la croissance et le développement des plantes en particulier dans les conditions de stress biotiques et abiotiques (Kang et *al.*, 2015). Donc les PGPR sécrètent des hormones absorbées par les racines des plantes, ce qui régule le développement des racines et des parties aériennes des plantes et la réponse des plantes au stress.

Les principaux groupes d'hormones impliqués sont : L'acide indole-acétique, la cytokinine, l'éthylène et une petite quantité de gibbérelline.

II .6.1.1. Acide indole-3-acétique (IAA)

L'acide indol-3-acétique (IAA), c'est l'hormone la plus courante et la plus active de la classe des auxines et quantitativement la plus produite par les PGPR. Elle joue un rôle vital dans les réponses cellulaires chez la plante, telles que, la division cellulaire, la résistance des plantes au stress, la formation de pigments. Les IAA influencent positivement le développement des racines, le métabolisme, le taux de respiration, et la prolifération des racines, ce qui entraîne une meilleure absorption minérale des plantes inoculées par les PGPR (Deepmala, 2016).

II .6.1.2. Gibbérellines (AG)

Les gibbérellines sont également des phytohormones impliquées dans le processus de la germination et de l'émergence des graines, développement des fleurs, la fructification et le retard de la sénescence. Les AG ont également un effet physiologique sur l'élongation des pousses. Plusieurs genres de PGPR comme *Bacillus* et *Pseudomonas* ont été caractérisés pour la production d'AG (Maheshwari et al., 2015).

II .6.1.3. Cytokinines

Les cytokinines sont des substances impliquées dans la médiation du stress environnemental des racines vers les parties supérieures de la plante. Diverses PGPR synthétisent des cytokinines, entraînant une augmentation de la production d'exsudats des racines par la plante, augmentant ainsi l'interaction entre les PGPR et les plantes (Grover et al., 2020).

II .6.2. Fixation biologique de l'azote

L'azote (N) est un nutriment important pour plusieurs activités chez la plante. Il est nécessaire à la synthèse de la chlorophylle, les acides nucléiques, les enzymes et protéines. Les plantes ne peuvent absorber que l'azote disponible dans le sol sous forme d'ammonium et de nitrate à travers leurs racines. Certaines PGPR assurent la fixation de l'azote soit d'une façon non symbiotique par des micro-organismes menant une vie libre, soit symbiotique à travers une relation mutualiste

entre la bactérie et la plante. La conversion du N_2 en ammoniac assuré par des bactéries fixatrices d'azote dotées d'un système enzymatique de nitrogénase (Ahemad et Kibret, 2014).

II .6.3. Solubilisation de phosphate

Le phosphore (P) est un macronutriment essentiel pour la croissance et le développement des plantes mais aussi un important élément nutritif limitant cette croissance. Cependant, Une grande quantité du phosphore dans les sols se trouve sous forme insoluble inaccessible pour les plantes. Les bactéries solubilisant le phosphate, PSB (Phosphate Solubilizing Bacteria) sont fréquentes dans la rhizosphère et peuvent être utilisées pour résoudre ce problème (Figure 07) (Vessey, 2003).

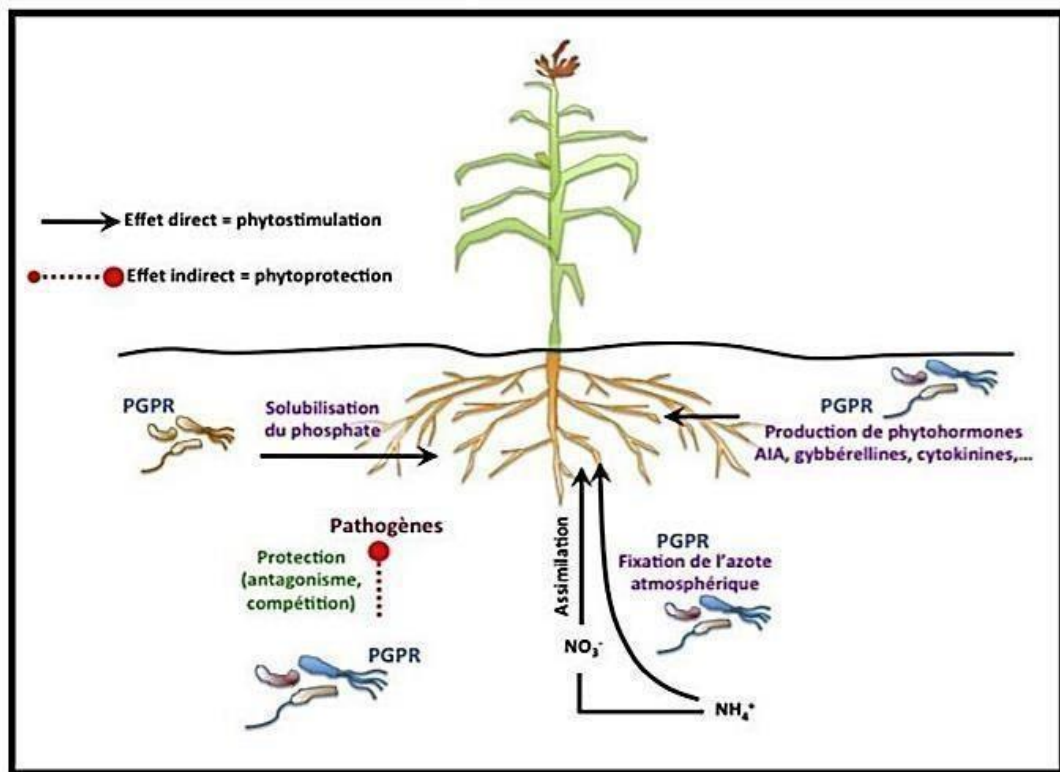


Figure 07 : Mécanisme phytobénéfiques des PGPR dans la rhizosphère (Khan et *al.*, 2009).

II .7. Tolérance des PGPR vis-à-vis le stress salin

Une nouvelle approche a été développée pour atténuer le stress salin chez les plantes. Elle consiste à l’application des PGPR sur les semences et les plantes. L’utilisation des PGPR comme inocula en agriculture pour l’allègement de stress salin est la voie la plus prometteuse pour améliorer la production et le rendement des régions touchées par la salinité (Mayak et *al.*, 2004).

Il existe de nombreux rapports sur l’amélioration de la croissance des plantes, le développement et l’absorption des nutriments par les inocula des bactéries tolérantes au sel. Plusieurs souches de PGPR ont montré des effets améliorateurs sur les plantes cultivées dans les conditions de stress salin (tableau II).

Tableau II : Effets de quelques souches des PGPR sur l’amélioration de la croissance des cultures et des plantes en présence du stress salin.

La culture	PGPR	Réponse	Références
Fraise	<i>Bacillus</i> , <i>Pseudomonas</i>	Augmentation de la hauteur des plantes.	Kong et Glick (2017)
Riz	<i>Thalassobacillus denorans</i> , <i>Oceanobacillus kapiialis</i> .	Augmentation du pourcentage et du taux de germination.	Shah et <i>al.</i> (2017)
Canola	<i>Enterobacter cloacae</i>	Augmentation des taux de proline	Rao et <i>al.</i> (2018)
Maïs	<i>P . fluorescens</i>	Elongation racinaire, poids frais	Kausar et Shahzad (2006)
Maïs	<i>Staphylococcus sciuri</i>	Teneur accrue en nutriments, en chlorophylle et en protéines.	Anzuay et <i>al.</i> (2017)

Blé	<i>Bacillus subtilis</i> , <i>Arthrobacter sp.</i>	Augmentation de la biomasse Sèche, des sucres solubles totaux et de la teneur en proline.	Upadhyay et <i>al.</i> (2012)
Tomate	<i>P. aeruginosa</i> , <i>P. stutzeri</i>	Longueur accrue des racines et des pousses Niveaux significativement plus élevées de proline, abscissique.	Yoo et <i>al.</i> (2019)

Les PGPR peuvent utiliser de nombreux mécanismes pour augmenter la tolérance des plantes au stress salin (Figure 08), y compris la régulation osmotique en provoquant l'accumulation des solutés compatibles, La production des phytohormones, en augmentant l'absorption des nutriments et en atteignant l'homéostasie des ions, et en réduisant le stress oxydatif grâce à une activité antioxydant accrue (Fazeli-Nasab et *al.*, 2019).

II.7.1. Production des protéines

Les cellules utilisent en ensemble de petites molécules organique, notamment des sucres, des polyols, des acides amies et leurs dérivés, des bêtaïnes et ectoïnes, pour s'adapter aux conditions de stress salin. Ces molécules jouent un rôle clé dans la capacité de la cellule à synthétiser des protéines en réponse à des conditions environnementales difficiles, telles que des variations de température et une salinité élevée. La production de protéines est un mécanisme essentiel dans la réponse de la cellule au stress salin, et ces petites molécules organiques contribuent à cette adaptation cruciale.

La proline, est l'un des solutés compatibles les plus communs qui jouent un rôle important dans l'ajustement osmotique de la cellule. De nombreuses souches de PGPR, telles que *Arthrobacter* et *Bacillus* augmentent la production de la proline

dans les plantes stressées, ce qui contribue à maintenir l'état de l'eau cellulaire, aidant ainsi les plantes à faire face au stress salin (Sziderics *et al.*, 2007).

II.7.2. Production des exopolysaccharides (EPS)

Les exopolysaccharides bactériens sont des polymères naturels de poids moléculaires élevés sécrétés par les bactéries dans leur environnement, en réponse aux différents types de stress externes, y compris la salinité, la sécheresse, la toxicité des métaux lourds et les changements de température (Donot *et al.*, 2012 ; Marvasi *et al.*, 2010).

De nombreux PGPR sont capables de sécréter des (EPS) qui forment des biofilms et facilitent l'adhésion à la surface des racines des plantes. Par conséquent, les PGPR produisant EPS peuvent jouer un rôle important dans le soulagement des stress abiotiques dans les plantes. Certaines souches PGPR produisent des exopolysaccharides qui se lient aux cations Na^+ et notamment diminuent sa teneur contribuant ainsi à atténuer le stress salin chez les végétaux (Ashraf *et al.*, 2004).

II.7.3. Production des enzymes (ACC) désaminase

En réponse à des contraintes comme la salinité, la sécheresse et la température, certaines PGPR produisent une ACC désaminase, une enzyme qui pourrait cliver l'ACC, le précurseur immédiat de l'éthylène dans la voie de biosynthèse de l'éthylène chez la plante.

L'augmentation de la production d'éthylène affecte négativement de nombreuses étapes physiologiques des plantes, stimule la maturation des fruits, le vieillissement des fleurs, la perte de la chlorophylle des feuilles, et la dégradation des protéines et des ARN et une perte de pigmentation des fleurs (Oldroyd *et al.*, 2001).

Les PGPR réduisent la production d'éthylène dans les plants après exposition à des concentrations croissantes de sel. Plusieurs études ont rapporté que *P. fluorescens* contenant l'ACC désaminase augmente la tolérance des plantes aux solutions salines et procure un rendement accru par rapport à celles inoculées avec des souches de *Pseudomonas* dépourvues de l'ACC désaminase (Cheng *et al.*, 2007 ; Saravanakumar et Samiyappan, 2007).

II .7.4. Production des enzymes antioxydants

Les plantes développent des systèmes de défense antioxydants enzymatiques ou non enzymatiques qui limitent l'accumulation d'espèces d'oxygène réactif et atténuent les dommages oxydatifs dus aux environnements stressés. L'inoculation des PGPR active les systèmes de défense antioxydants dans les plantes, elles réduisent ainsi les dommages oxydatifs aux plantes causés par différents types de stress abiotiques tels que la sécheresse, la salinité et les métaux lourds (Figure 09) (Vardharajula et al., 2011 ; Himabindu et al., 2016).

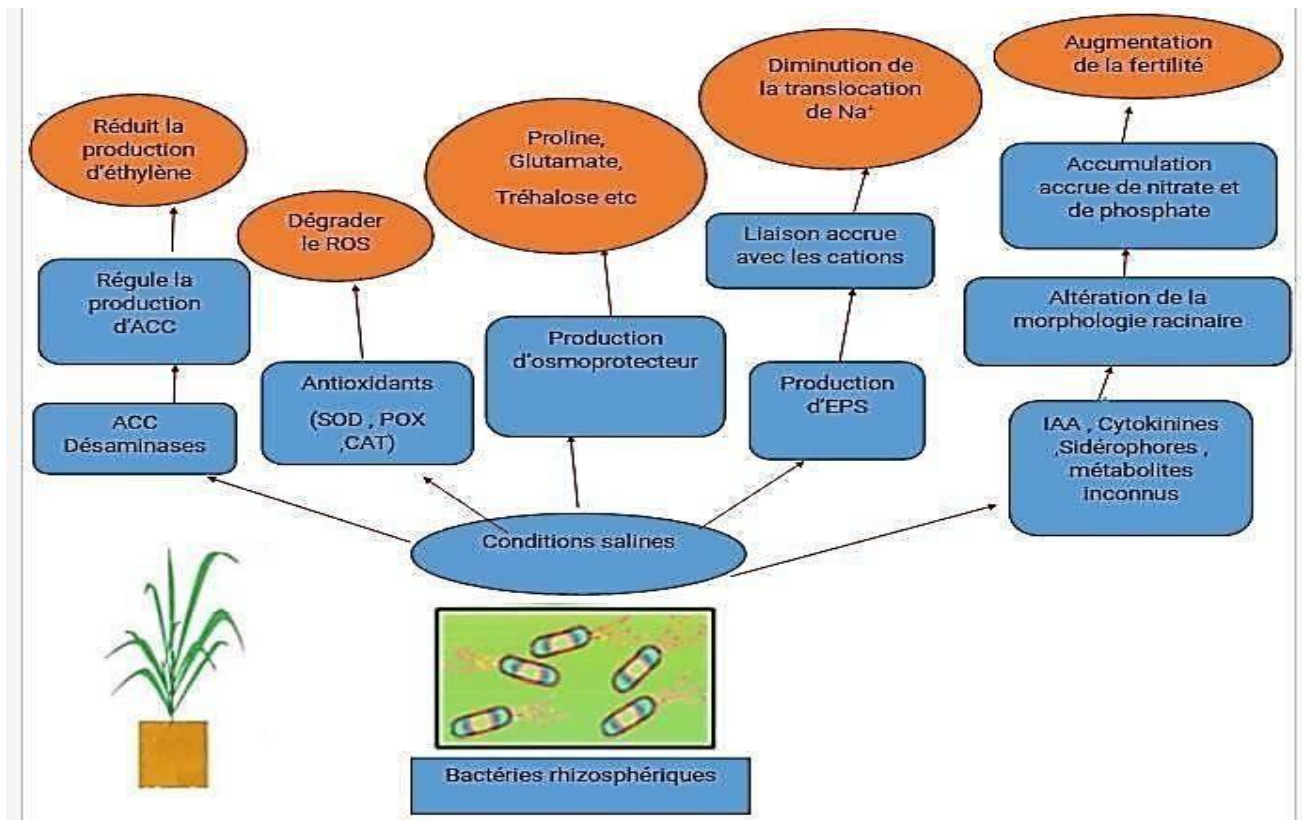


Figure 08 : Mécanisme impliqués par les PGPR dans la tolérance des plantes vis-à-vis le stress salin (Ashraf et al., 2008).



Partie 2 : Partie expérimentale



Chapitre I : Matériel et méthode

I.1. Cadre de l'étude

Le travail a été réalisé au niveau des laboratoires pédagogiques de physicochimie et d'analyse microbiologique de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, durant une période de deux mois.

I.2. Objectif de l'étude

L'objectif primordial est l'évaluation de l'effet de deux souches de PGPR sur l'amélioration de la croissance des graines du blé dur sous un stress salin.

I.3. Matériel utilisé**Matériel biologique****I.3.1. Souches bactériennes**

Deux souches bactériennes de *Bacillus* (*Bacillus* sp.3, *Bacillus* sp.4) ont été utilisées. Elles ont été fournies aimablement par M^{me} Benazzouz (Laboratoire de Microbiologie).

I.3.2. Graines du blé

Les graines du blé dur (*Triticum durum*) variété (Vitreux américaine) ont été fournies par notre promotrice M^{me} Benazzouz.

Matériel de laboratoire**I.3.3. Produits chimiques**

Les produits chimiques utilisés sont cités dans **l'annexe 01**.

I.3.4. Appareillage et outillage

Les appareils utilisés, et les différents outils utilisés durant le travail expérimental sont présentés dans l'annexe 02.

I.4. Méthodes

I.4.1. Prélèvement du sol

Le sol utilisé dans cette étude expérimentale a été collecté à partir des champs cultivés de blé dans la région d'Ain Zaouïa située à 45 Km au sud-ouest de Tizi-Ouzou (Figure 09).



Figure 09 : Localisation géographique de la région de prélèvement

Le sol a été recueilli dans des sacs en plastique et acheminé au laboratoire, homogénéisé, séché à l'air et à l'ombre pendant deux semaines, puis broyé et tamisé (maille 2mm). Ensuite, il a été stérilisé à l'autoclave à une température de 120°C pendant une heure (Figure 10).



Figure 10 : Echantillon du sol utilisé.

I.4.2. Détermination des paramètres physico-chimiques du sol

I.4.2.1. Mesure du pH

Le pH est une mesure de l'acidité ou de la basicité du sol. Il est important car il affecte la disponibilité des nutriments pour les plantes et la croissance microbienne dans le sol.

□ Mode opératoire

La mesure du pH consiste à homogénéiser 5g du sol tamisé dans 25ml d'une solution KCl (0.2N). Après agitation, à l'aide d'un homogénéisateur pendant deux heures à 21°C le mélange est laissé reposer pendant 24 heures. Une décantation s'en suit et le pH du surnageant est déterminé par le pH mètre (Ilyas *et al.*, 2012).

La valeur du pH obtenu a été comparée à l'échelle décrite par Gaucher, In : Soltser (1981)

(Tableau III) **Tableau III :** Echelle du pH du sol (Gaucher, In : Soltser, 1981).

pH	Désignation du sol
3 - 4,5	Extrêmement acide
4,5 - 5	Très fortement acide

5 – 5,5	Très acide
5,5 – 6	Acide
6 – 6,75	Faiblement acide
6,75 – 7,25	Neutre
7,25 – 8,25	Alcalin
> 8,5	Très alcalin

I.4.2.2. Conductivité électrique (C_E)

La conductivité électrique est une mesure de la capacité du sol à conduire l'électricité, qui est directement liée à la salinité du sol. Les sols salins peuvent avoir des effets négatifs sur la croissance des plantes, car ils peuvent réduire la disponibilité de l'eau et des nutriments.

□ Mode opératoire

5g du sol tamisé ont été mélangé avec 25 ml d'eau distillé, après agitation pendant deux heures à température proche de 20°C, laisser la solution reposer et décanter pendant 24 heures. La C_E de sol est mesurée à l'aide d'un conductimètre. Les valeurs obtenues ont été comparées à

l'échelle de salinité établies par l'USSL (1954) (Tableau IV) **Tableau IV** : Échelle de salinité du sol (USSL - 1954).

Conductivité électrique (MS/cm)	Salinité
0 – 0,6	Non salé
0,6 – 1,4	Peu salé
1,4 – 2,4	Salé
2,4 – 6	Très salé

□ **Analyse granulométrique****I.4.2.3. Texture**

Pour déterminer la texture du sol, la méthode par saturation a été utilisée. Elle consiste à mesurer le pourcentage d'humidité du sol (H %) et le comparer à une échelle qui détermine la texture lui correspondant (Tableau V).

5g de sol tamisé a été mélangé avec de l'eau jusqu'à obtenir une pâte homogène. L'opération est répétée jusqu'à ce que la pâte devienne lisse et glisse doucement lorsqu'on incline le récipient.

Ensuite, nous avons adopté les étapes suivantes :

- Peser une capsule vide (P_0).
- Prendre une petite quantité de pâte (sol mouillé), la mettre dans la capsule, puis repeser (P_1).
- Mettre la capsule à l'étuve à 105°C pendant 24 heures.
- Peser la capsule une troisième fois à la sortie de l'étuve (P_2).

Le pourcentage d'humidité est calculé par la formule suivante, et comparé aux valeurs citées dans le tableau ci-dessous pour déterminer la texture :

$$H\% = (P_0 + P_1) - P_2 \times 100 / P_1$$

Tableau V : Echelle de la texture (Soltser, 1981).

Pourcentage d'humidité	Texture
< 12	Sableuse
12 – 24	Sableux-lumineuse
24 - 37,5	Limono sableuse
37,5 – 45	Limono argileuse
45 – 75	Argilo limoneuse
> 75	Argileuse

I.4.3.1. Caractérisation morphologique des souches bactériennes

□ Etude macroscopique

La caractérisation macroscopique des souches bactériennes a été effectuée sur gélose nutritive, après incubation à 28°C pendant 24 heures une observation à l'œil nu des caractères culturaux a été effectuée, tel que : la forme, la couleur, l'aspect et la taille des colonies (Joffin et Leyral, 2006).

□ Etude microscopique

La coloration de Gram est réalisée afin de déterminer le type de Gram de chaque bactérie. En suivant la méthode décrite par Delarras (2007), le test est réalisé selon les étapes suivantes :: **Préparation du frottis** : Une goutte d'eau est déposée sur une lame, et un prélèvement provenant d'une culture jeune est déposé dessus. Le prélèvement est ensuite étalé pour obtenir une couche mince et uniforme. Ensuite, le frottis est fixé en le passant 4 à 5 fois dans la flamme. Le frottis est recouvert avec le colorant primaire (violet de Gentiane) et laissé agir pendant 1 minute. Le colorant est ensuite éliminé sans rinçage.

Le Lugol est versé sur le frottis et laissé agir pendant 1 minute, puis il est rincé à l'eau distillée. Une décoloration est réalisée en utilisant de l'alcool pendant 15 à 30 secondes, suivi d'un rinçage à l'eau.

Le frottis est recouvert de Fuchsine pendant 1 minute.

Le frottis est ensuite lavé à l'eau courante.

La lame est séchée, puis l'observation est effectuée à l'aide d'un microscope optique au grossissement $\times 100$.

I.4.4. Inoculation bactérienne des graines de blé dur

I.4.4.1. Désinfection superficielle des graines

Les graines de blé ont été désinfectées par trempage dans l'eau de javel à 3% pendant 10 min puis rincées, suivit de trois rinçages successifs à l'eau distillée stérile. Les graines sont transférées sur un papier absorbant stérile pour le séchage.

I.4.4.2. Préparation de l'inoculum

Le repiquage des souches bactériennes a été réalisé dans des boites de Pétri préalablement coulées par la gélose nutritive. L'incubation a été réalisée à 37°C pendant 24 heures.

Une suspension bactérienne de chacune des deux souches (*Bacillus* sp.3, *Bacillus* sp.4) a été préparée.

Un volume de 1 mL d'une solution de MgSO₄ stérile (0,1M) est déposée dans chaque boîte de Pétri puis les colonies bactériennes sont raclées à l'aide d'un râteau stérile et récupérées à l'aide d'une micropipette dans des tubes à essai contenant la solution de MgSO₄. La densité optique des suspensions bactériennes déterminée à l'aide d'un spectrophotomètre à une longueur d'onde de 620 nm, puis ajustée à une densité optique de 2 qui correspond à une concentration de 10^9 à 10^{10} UFC/mL.

I.4.4.3. Inoculation des graines et mise en germination

Les graines de blé désinfectées ont été placées dans des boites de Pétri contenant les suspensions bactériennes, pendant 30 minutes. Chez le témoin les graines sont immergées dans la solution de MgSO₄ stérile (0,1 M) (Figure 11).

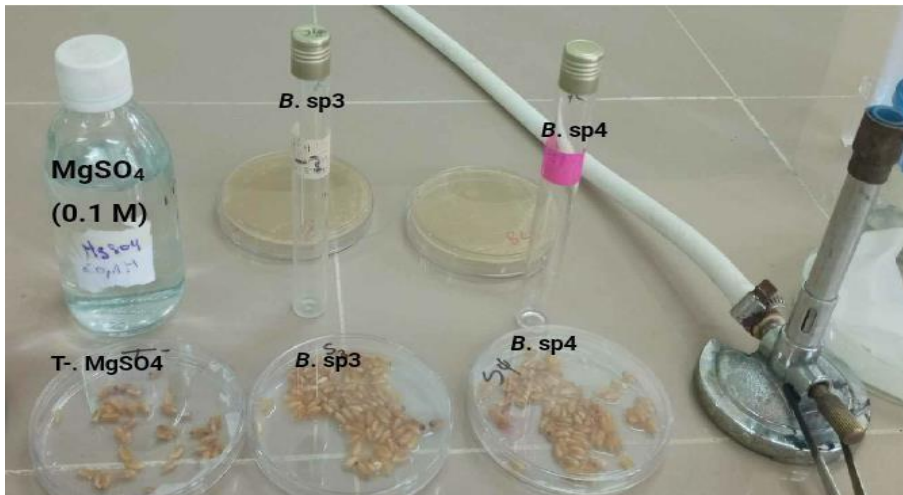


Figure 11 : Inoculation des graines.

Après bactérisation, les graines sont déposées sur des compresses stériles imbibées d'eau distillée stérile placées dans des boîtes de Pétri de 9 cm de diamètre l'incubation a été réalisée à l'étuve à 22 °C pendant 2 jours (Figure 12).

Le suivi de la germination des graines est effectué durant deux (0 2) jours. Les graines sont comptées pour déterminer la capacité et la période de germination. On considère qu'elles ont germées lorsque la radicule perce les téguments.



Figure 12 : Mise en germination des graines après bactérisation.

I.4.4.4. Paramètres étudiés**I.4.4.4.1. Taux de germination**

Le pourcentage de germination (TG) est le nombre de graines germées, rapporté au nombre total de graines. Il est calculé par la formule suivante :

I.4.4.4.2. Temps moyen de germination (TMG)

C'est un mode d'expression de la vitesse de germination d'une population de semences mises à germer dans les conditions parfaitement contrôlées. Le temps moyen de germination (TMG) se calcule de la façon suivante selon Corbineau et Come (2006) :

TMG : Temps moyen de germination (jours).

N1 : Nombre des graines germées au temps

T1. N2 :

Nombre des graines germées entre T1 et T2.

Nn : Nombre des graines germées entre Tn-1 et Tn.

T : Nombre de jours d'observation.

I.4.5. Evaluation de l'activité stimulatrice de la croissance des souches rhizobactériennes en présence du stress salin**I.4.5.1. Semis**

Le semis a été mené dans des petits pots en plastique dont le fond est troué pour assurer le bon drainage.

L'opération a été réalisée dans deux conditions : conditions d'asepsie, conditions naturelles. Dans les conditions d'asepsie, Les pots sont désinfectés d'abord par l'éthanol à 60%, ensuite sont remplis au fond d'une fine couche de (sable grossier) stérile et de 100 g d'un mélange (sol/sable fin) stérilisé dans les proportions volumiques 2/1 respectivement, et une dernière couche de tourbe stérile. Tous les pots sont recouverts avec du papier aluminium pour éviter leur contamination.

Les graines germées dans des boîtes de Pétri, après 48 heures sont mises en pots, à raison de sept graines par pot à 1 cm de profondeur (Figure 13).

Le semis se fait par 4 blocs, chaque bloc est traité par 3 concentrations salines (50 mM , 100 mM , 150 mM) , trois répétitions pour chaque concentration ont été réalisées .

Bloc 1 : Témoin : graines non inoculées.

Bloc 2 : les graines inoculées avec la souche S3.

Bloc 3 : les graines inoculées avec la souche S4.

Bloc 4 : les graines inoculées avec une suspension bactérienne contenant les deux souches (S3 + S4)

Dans les conditions naturelles, le semis a été réalisé dans le même principe pour les graines semées dans les conditions d'asepsie sauf que le sol n'est pas stérile pour voir l'interaction de deux bactéries S3 et S4 avec les micro-organismes naturels du sol. Les graines inoculées avec une suspension bactérienne contenant les deux souches (S3 + S4) et traitées par 3 concentrations salines.



Figure 13: Semis des graines du blé dur (*Triticum durum*) dans les pots..

I.4.5.2. Arrosage

Toutes les graines sont arrosées trois fois par semaine avec l'eau distillée stérile à 50% de la capacité de rétention du sol.

I.4.5.3. Préparation des solutions de NaCl

Trois solutions à différentes concentrations de NaCl (50, 100, 150Mm) ont été préparées. (Figure 14).



Figure 14 : Solutions salines (Na Cl).

I.4.5.4. Application du stress salin et rappel bactérien

Après 3 jours du semis (stade 4 feuilles), le stress salin a été appliqué 3 fois durant huit jours à raison de 3 mL de la solution saline pour chaque pot (Figure 15).

Dix jours après le semis, un rappel bactérien a été réalisé par l'apport de 1 mL de la suspension bactérienne sur chaque graine.



Figure 15 : Application du stress salin.

I.4.5.5. Analyse des paramètres morpho-biochimiques**I.4.5.5.1. Paramètres morphologiques****□ Longueur de la plumule et de la radicule**

Après 20 jours de croissance, la longueur des tiges et des racines ont été déterminés à l'aide d'une règle graduée.

□ Poids frais et sec de la plumule

Les feuilles et les tiges découpées en petits segments puis pesées à l'aide d'une balance de précision, puis mises en sachet en papier et placées dans l'étuve à 75°C pendant 3 jours pour sécher. Après séchage une deuxième pesée a été réalisée afin de déterminer le poids sec.

□ Poids frais et sec de la radicule

Parallèlement aux plumules les racines sont simultanément pesées et mises dans des sachets en papier. Celles-ci sont placées à l'étuve pendant 3 jours afin de peser le poids sec.

I.4.5.5.2. Paramètres biochimiques**I.4.5.5.2.1. Dosage de chlorophylles**

Pour l'estimation du taux de chlorophylle, 1g de feuilles de blé ont été lavées, séchées et découpées en petits segments. Ensuite les feuilles ont été broyées dans un mortier en présence de 4 mL d'acétone à 80% jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène. 6 mL d'acétone à 80% ont été ajoutés au mélange, broyé à nouveau et laissé décanter pendant 10 minutes. Le surnageant est récupéré dans un bêcher de 10 mL par filtration sur le papier filtre puis la solution est complétée à 10 mL avec l'acétone à 80%. 2 mL de l'extrait obtenu ont été introduits dans un tube à essai contenant 18 mL d'acétone. L'absorbance des échantillons est enregistrée à 663, 645 au spectrophotomètre. Les teneurs en pigments sont calculées par les formules suivantes :

Ch a (mg/l) = 12, 7 DO (663) _ 2, 63 DO (645)

Ch b (mg/l) = 22, 9 DO (645) _ 4, 68 DO (663)

Ch t (mg/l) = Ch a + Ch b

Ch a : concentration en chlorophylle a

Ch b : concentration en chlorophylle b

Ch t : concentration en chlorophylle totale

I.4.5.5.2.2. Teneur en cendres

La teneur en cendres, est une mesure de la quantité de matières minérales présentes dans un échantillon. L'échantillon des racines du blé dur est calciné à 550C dans un four à moufle laissé pendant 5 heures (NF V05-113,1972).

Mode opératoire

- 0,5g de l'échantillon a été pesé dans des creusets en porcelaine.
- Les creusets ont été place dans un four à moufle à 550C pendant 5 heures
- A la fin de la calcination, les creusets ont été retirés du four et places dans un dessiccateur de gel de silice pour refroidir et pour absorber l'humidité de l'air.
- Après refroidissement, les creusets ont été pesés pour déterminé la teneur en cendres de l'échantillon en utilisant cette formule :

$$\mathbf{MO\%} = \frac{M1 - M2}{P} \times 100$$

MO : Matière organique en g

M₁ : Masse de la capsule + prise d'essai en g

M₂ : Masse de la capsule + cendres en g

P : Masse de prise d'essai en g

La détermination de la teneur en cendre (T_c) est comme suit :

$$TC=100-MO$$



Chapitre II : Résultats et discussion

II.1. Paramètres physico-chimiques du sol

Les différentes caractéristiques physicochimiques du sol étudié sont regroupées dans le tableau VI.

Tableau VI : Détermination des paramètres physico-chimiques du sol étudié.

Echantillon	pH	C _E (mS/cm)	L'humidité%
Sol	7,56	0,5	89,39

Le résultat du pH montre une valeur de 7,56. Ce qui indique que le sol étudié est classé comme alcalin.

Ce résultat concorde avec l'étude élaborée par Chibani (2017), sur des échantillons de sol collectés de la rhizosphère du blé, où il a rapporté un pH légèrement alcalin selon la gamme de pH du sol (Gaucher et Soltner 1981).

L'étude de Cherif (2014) effectuée sur des échantillons de sols prélevés à partir des champs cultivés de blé ou de l'orge, a également montré des valeurs de pH modérément alcalin à alcalin. Ceci est en accord avec nos résultats.

Le pH peut être influencé par le climat, la végétation, et la nature géomorphologique des sols (Cherif, 2014).

Le résultat de test d'humidité a donné une valeur de 89,39%. Ce qui montre que la texture du sol prélevé est argileuse (H% >75 pour la texture argileuse).

Le taux d'humidité élevé est expliqué selon Cherif (2014), que les sols argileux sont plutôt fertiles, mais sont souvent mouillés et mal drainés.

La mesure de la conductivité électrique reflète la minéralisation des sols. Elle est rigoureusement proportionnelle à la salinité. L'échantillon de sol étudié présente une conductivité mesurée inférieure à 0,6 donc c'est un sol non salin selon l'échelle de salinité du sol (Ussel, 1981).

II .2. Caractérisation morphologique des souches

□ Etude macroscopique

L'observation macroscopique des colonies des souches bactériennes sur la gélose nutritive, montrent que les colonies de *Bacillus* sp.3 apparaissent avec un aspect lisse de couleur blanchâtre crèmeux de forme irrégulière, tandis que les colonies de la souche *Bacillus* sp.4 sont de couleur blanchâtre jaune et ronde avec un diamètre entre 2 et 4 mm (Figure 16).

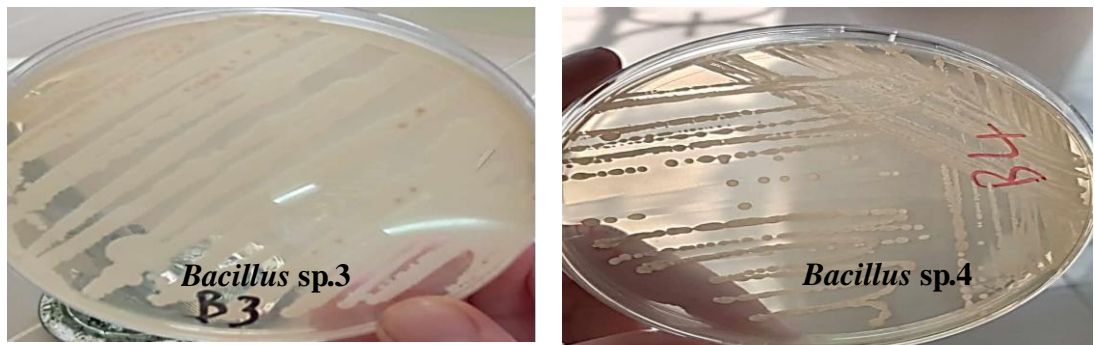


Figure 16 : Aspect des colonies des souches bactériennes formées sur une gélose nutritive.

□ L'examen microscopique

La coloration de Gram et l'observation microscopique nous ont permis de déterminer la forme, le type d'agencement et le Gram des souches bactériennes étudiées (Figure 17). La présence de spores dans les cellules bactériennes des deux souches a été également constatée. Les résultats de la caractérisation microscopique sont présentés dans le tableau (VII).

Tableau VII : Résultats de l'examen microscopique des souches bactériennes étudiées.

Souches	Forme	Gram	Agencement
<i>Bacillus</i> sp.3	Bacilles moyens, Spores centrales non déformantes	Positif	Isolées, en amas
<i>Bacillus</i> sp.4	Gross bacilles	Positif	Isolées

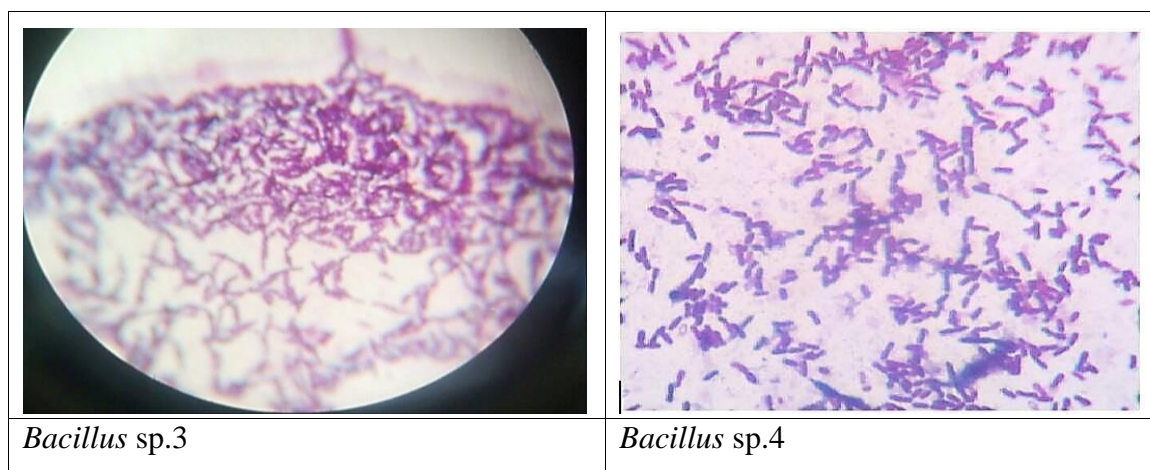


Figure 17 : Aspect microscopique des souches bactériennes avec le grossissement 100X.

II.3. Effet de l'inoculation bactérienne sur la germination des graines de blé dur

II .3.1. Taux de germination (TG)

Les résultats obtenus montrent que le taux de germination le plus opulent a atteint 100% par le témoin ainsi que la combinaison S3+S4. L'effet de la bactérisation par les souches *Bacillus* sp.3 et *Bacillus* sp.4 montrent des valeurs 98,7 et 99,2 respectivement (Figures 18, 19).

En comparant entre les résultats obtenus on constate que l'inoculation par les deux souches individuellement montre un effet sur le taux de germination mais inférieur par rapport à l'inoculation par la combinaison des deux souches.

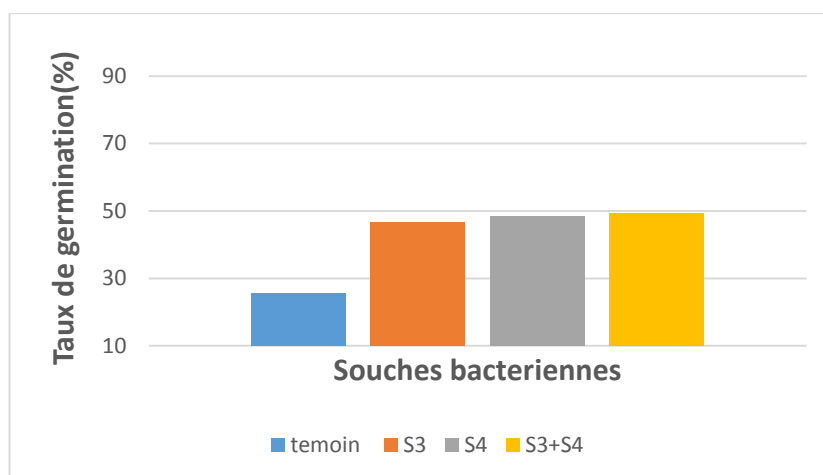


Figure 18 : Effets de la bactérisation par les différentes souches sur le taux de germination des graines du blé dur.

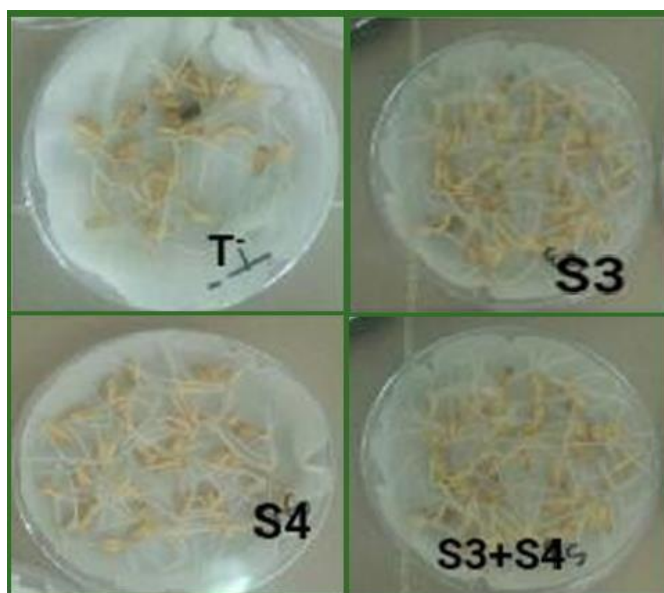


Figure 19 : Résultats du test de germination.

II .3.2. Vitesse moyenne de germination

Les résultats de la cinétique de la germination après bactérisation ont montré que les souches ont un effet faible sur la vitesse de germination des graines du blé (Figure 20). En effet, la germination des graines non bactérisées (témoin) est plus précoce par rapport aux graines bactérisées par les souches S3 et S4 et leur combinaison.

Les graines de témoin ont enregistré une période de germination de 25,5 h alors que les graines inoculées ont enregistrées des périodes de germination de 46,8 h pour S3, 48,5 h pour S4 et 49,2h pour la combinaison des deux souches.

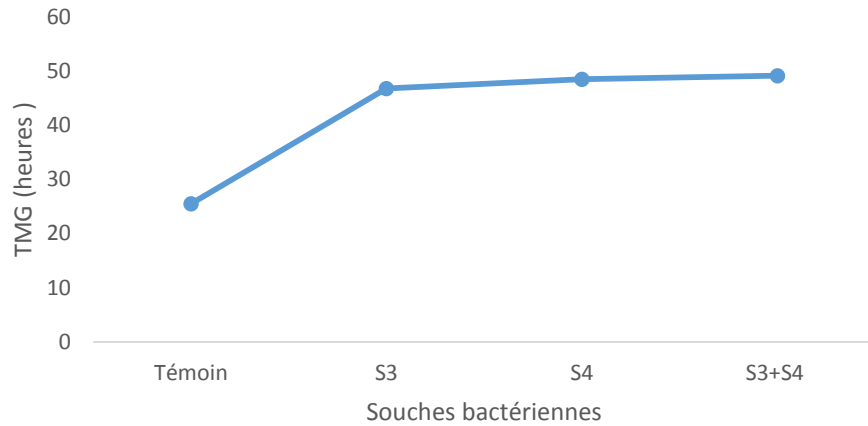


Figure 20 : Effet de la bacterisation par différentes souches bactériennes sur le temps moyen de germination des graines de blé dur.

II.4. Effets de l'inoculation bactérienne sur la croissance et sur les paramètres morpho-biochimiques du blé dur sous stress salin

II.4.1. Paramètres morphologiques

Les résultats des paramètres morphologiques montrent que la croissance du blé est affectée par la salinité et que l'inoculation bactérienne a un effet bénéfique significatif sur ces paramètres (Figure 21).

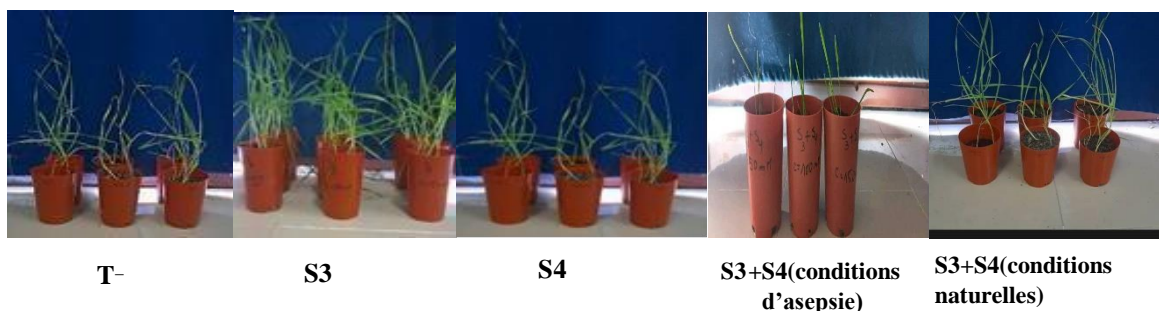


Figure 1 : Effet de l'inoculation par *Bacillus* sp.3, *Bacillus* sp.4 et leur combinaison (conditions d'asepsie, conditions naturelles) sur la croissance du blé dur sous différentes concentration de NaCl (50,100et 150 Mm).

II.4.1.1. Hauteur des tiges et longueur du système racinaire

A partir des résultats obtenus dans la figure 22 et 23, une fluctuation des valeurs de la hauteur des tiges et racines a été noté en présence de Na Cl.

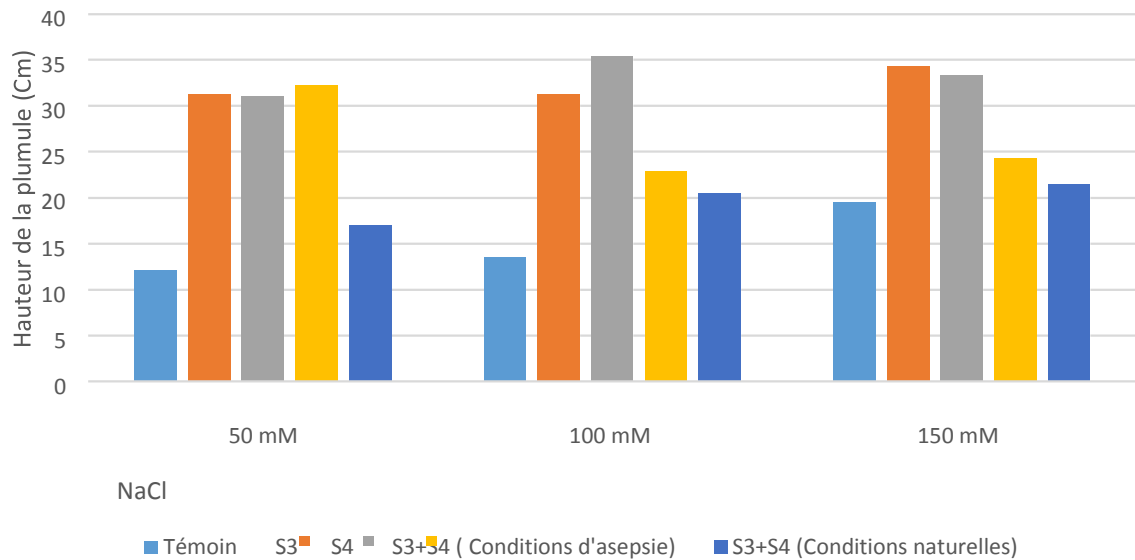


Figure 22 : Effet de l'inoculation bactérienne sur la hauteur de la partie aérienne du blé dur sous différentes concentrations de Na Cl (50,100et 150 mM).

L'inoculation de bactéries a considérablement amélioré la longueur des tiges. Notons que plus la concentration en sel augmente plus la hauteur de la partie aérienne augmente. Une longueur maximale de 35,4 Cm a été observé chez *Bacillus* sp.4 à une concentration modérée de 100mM, Suivi par *Bacillus* sp.3 de 34,26 Cm à la concentration 150mM et la combinaison de *Bacillus* sp.3 et *bacillus* sp.4 de 32,23 Cm à la concentration la plus faible 50 mM. La hauteur des tiges est très faible (17 cm) au niveau des conditions naturelles à la concentration 50 mM. Il a été constaté que les souches utilisées ont un effet marqué sur l'amélioration de la croissance des plantules du blé dur en présence du stress salin. La hauteur des tiges varie entre 25 et 35 cm, pour les plantules inoculées, tandis qu'elle varie entre 10 et 18 cm pour le témoin.

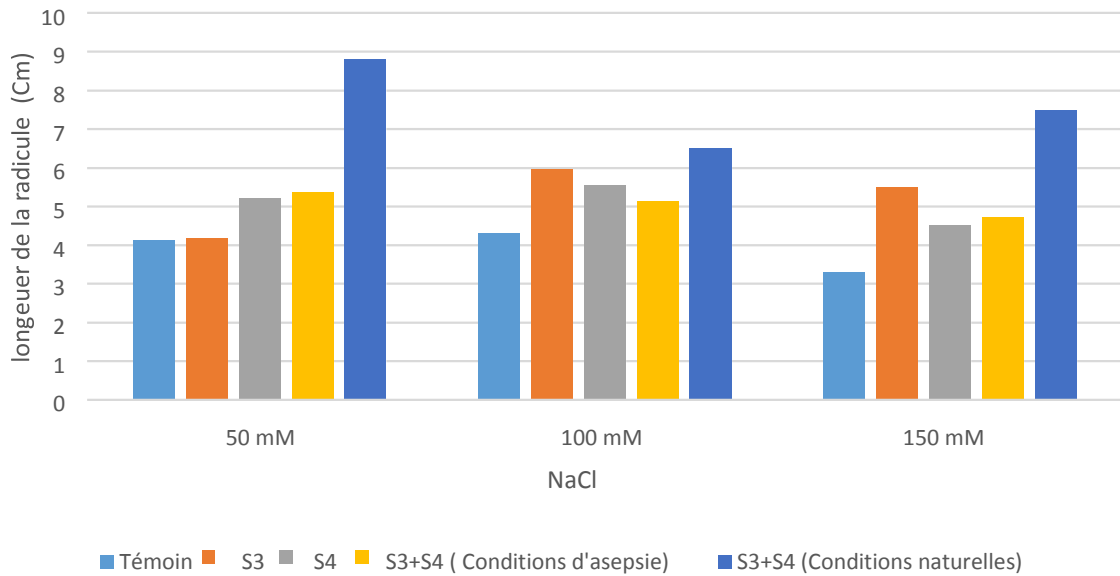


Figure 23 : Effet de l'inoculation bactérienne sur la longueur du système racinaire du blé dur sous différentes concentrations de NaCl (50, 100 et 150 mM).

La longueur de la partie racinaire est significativement affecté par l'inoculation de bactéries

Où une augmentation importante a été notée dans les plantes inoculées par *Bacillus* sp.3 on note une valeur de 4,16 cm à la concentration de 50 mM qui augmente avec l'augmentation de la concentration en NaCl pour atteindre une valeur de 5,9 cm à la concentration modéré 100 mM. Cependant la longueur de la partie racinaire chez les racines inoculées par la Combinaison *Bacillus* sp.3 et *Bacillus* sp.4 (conditions naturelles), est influencé 100 mM. Cependant la longueur de la partie racinaire chez les racines inoculées par la Combinaison *Bacillus* sp.3 et *Bacillus* sp.4 (conditions naturelles), est influencé positivement par l'application du stress salin. On note une valeur de 8,8 cm à la concentration 50 mM chez la combinaison de *Bacillus* sp.3 et *Bacillus* sp.4 (conditions d'asepsie) qui diminue avec l'augmentation de la concentration de sel et atteindre une valeur de 6.5cm à la concentration 100mM suivi par *Bacillus* sp.4(4,5 cm) à la concentration 150mM et 7,5 cm chez les plantes inoculées par la combinaison *Bacillus* sp.3 et *Bacillus* sp.4 (conditions naturelles).

L'inoculation des plantules par les souches bactériennes a montré des effets bénéfiques sur la Croissance racinaire dans les différentes conditions du stress salin par rapport au témoin.

Ces résultats sont similaires à ceux de Kerbab (2022), qui a montré que l'inoculation de Bactéries et leur combinaison donne un effet bénéfique sur la hauteur de la partie aérienne et la longueur racinaire. Cherif (2014), a traité les graines de blé de la variété Waha par *Bacillus* sp. sch1 sous stress salin, a constaté que l'inoculation est bénéfique en présence du stress salin. Ceci est en accord avec nos résultats.

II.4.1.2. Poids frais et sec des racines

La mesure du poids frais des racicules a enregistré des résultats nettement plus élevés chez la combinaison des souches *Bacillus* sp.3 et *Bacillus* sp.4 dans des conditions d'asepsie. Il est à noter que le poids frais des racicules augmente avec l'augmentation de la concentration en sel.

Par exemple, le poids frais à une concentration de 150 mM est de 0,135 g, suivi de 0,107 g à 50 mM, et enfin de 0,057 g à 100 Mm (Figure 24).

En ce qui concerne les plantes inoculées par *Bacillus* sp.4 et *Bacillus* sp.3, le poids frais des racicules diminue avec l'augmentation de la concentration de NaCl. On observe le poids frais le plus élevé chez *Bacillus* sp.4 à une concentration de 50 mM (0,101 g), qui diminue à 0,093g à la concentration la plus modérée de 150 mM.

Par comparaison avec le témoin et selon les concentrations en sel, il a été révélé que le poids frais des racines est toujours plus élevé.

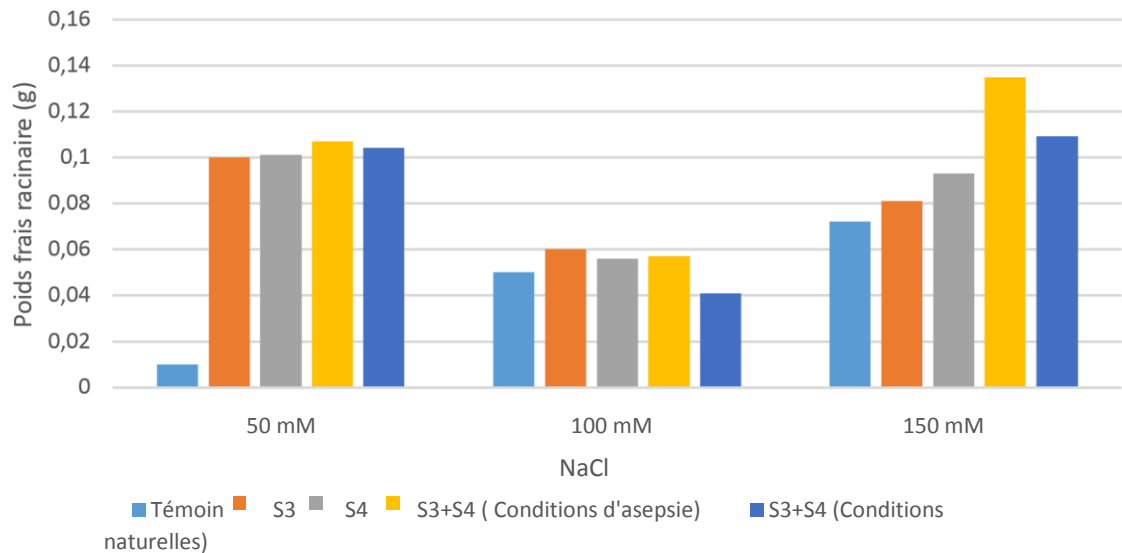


Figure 24 : Effet de l'inoculation bactérienne sur le poids frais des racines du blé dur sous différentes concentrations de NaCl (50, 100 et 150 mM).

Pour le poids sec des racicules, les résultats mettent en évidence une différence notable entre le témoin et les plantes inoculées par les PGPR. Les valeurs du poids sec des racicules pour les souches, *Bacillus* sp.3, *Bacillus* sp.4 et la combinaison de *Bacillus* sp.3 et *Bacillus* sp.4, dans des conditions d'asepsie, se révèlent être les plus élevées et pratiquement similaires aux concentrations de 50, 100 et 150 mM de NaCl (Figure 25).

L'impact de la salinité sur le poids sec des racicules est significatif pour la combinaison de *Bacillus* sp.4 et *Bacillus* sp.3 dans des conditions naturelles, ainsi que pour *Bacillus* sp.4 et *Bacillus* sp.3 aux concentrations de 50 mM et 100 mM.

Il a été constaté que le poids sec des racines montre les plus grandes valeurs par comparaison avec le témoin et cela pour toutes les concentrations en sel.

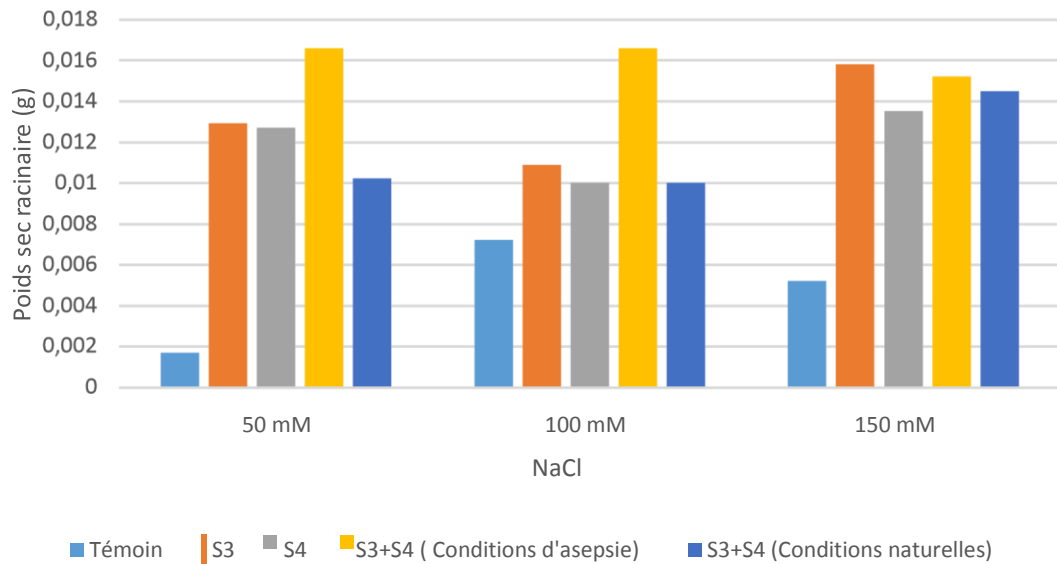


Figure 25 : Effet de l'inoculation bactérienne sur le poids sec des racines du blé dur sous différentes concentrations de Na Cl (50, 100 et 150mM).

II.4.1.3. Poids frais et sec des tiges

Les résultats obtenus montrent que le stress salin affecte les poids sec et frais des feuilles du blé dur. L'inoculation de bactéries a amélioré le poids frais et sec foliaire (Figure 26, 27). On remarque que les valeurs les plus faibles ont été enregistrées chez le témoin non inoculé essentiellement à la concentration 150 mM.

Le meilleur résultat a été enregistré au niveau des plantules inoculées par la souche S4 à la concentration 50 mM. Le poids frais et sec des tiges diminuent avec l'augmentation des concentrations de NaCl.

L'inoculation par la combinaison des deux souches dans les conditions naturelles a augmenté le poids sec des feuilles par rapport aux conditions d'asepsie.

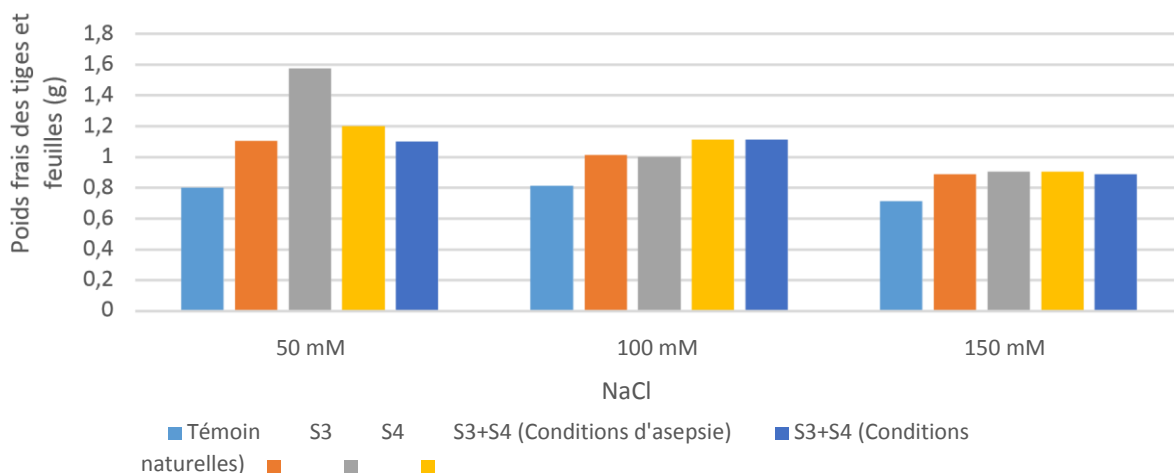


Figure 26 : Effet de l’inoculation bactérienne sur le poids frais des tiges et feuilles de Blé dur sous différentes concentrations de NaCl (50, 100 et 150 mM).

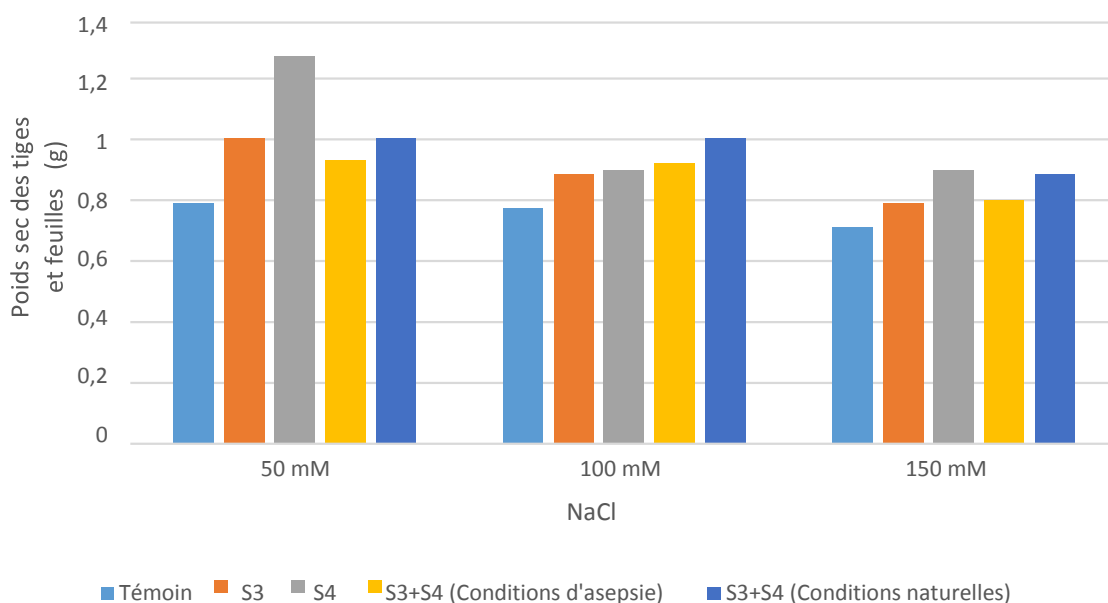


Figure 27 : Effet de l’inoculation bactérienne sur le poids sec des tiges et feuilles du blé dur sous différentes concentrations de NaCl (50, 100 et 150 mM).

L’effet positif de l’inoculation par la combinaison des deux souches dans les conditions naturelles peut être expliqué par l’interaction de souches étudiées avec des microorganismes bénéfiques présents dans le sol non stérilisé.

Kerbab (2022), a montré que l'inoculation des plantes d'*Arabidopsis thaliana* par trois souches appartenant à *Bacillus atropheus* et leurs combinaisons sous les conditions de stress salin améliore le poids frais et sec des feuilles.

II.4.2. Paramètres biochimiques

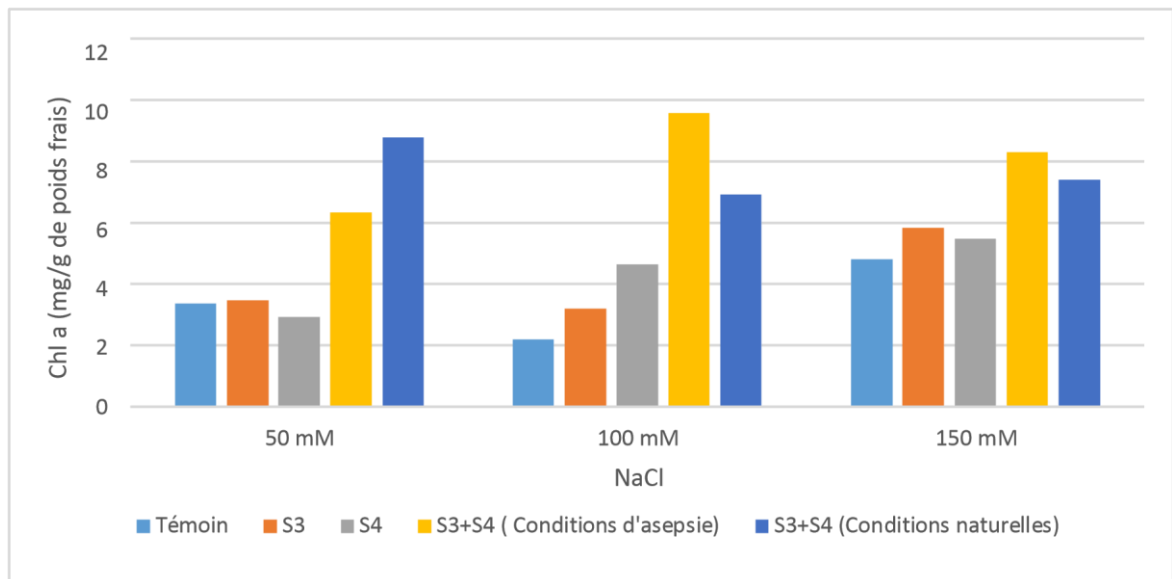
II.4.2.1. Taux de la chlorophylle

D'après cette étude sur la variation de la teneur en chlorophylle, nous avons constaté que la salinité affecte positivement les taux de chlorophylle a, b et totale (Figure 28).

Le taux de chlorophylle varie selon les niveaux de stress salin appliqués et les bactéries utilisées.

Les teneurs en chlorophylle a, b et totale sont plus élevées à la concentration 150 mM qu'à 50 et 100 mM.

L'effet remarquable de l'inoculation bactérienne est observé chez les plantes inoculées par la combinaison (S3+S4) dans les deux conditions (asepsie, naturelles) par rapport au témoin non inoculé et les plantes traitées par les souches individuellement.



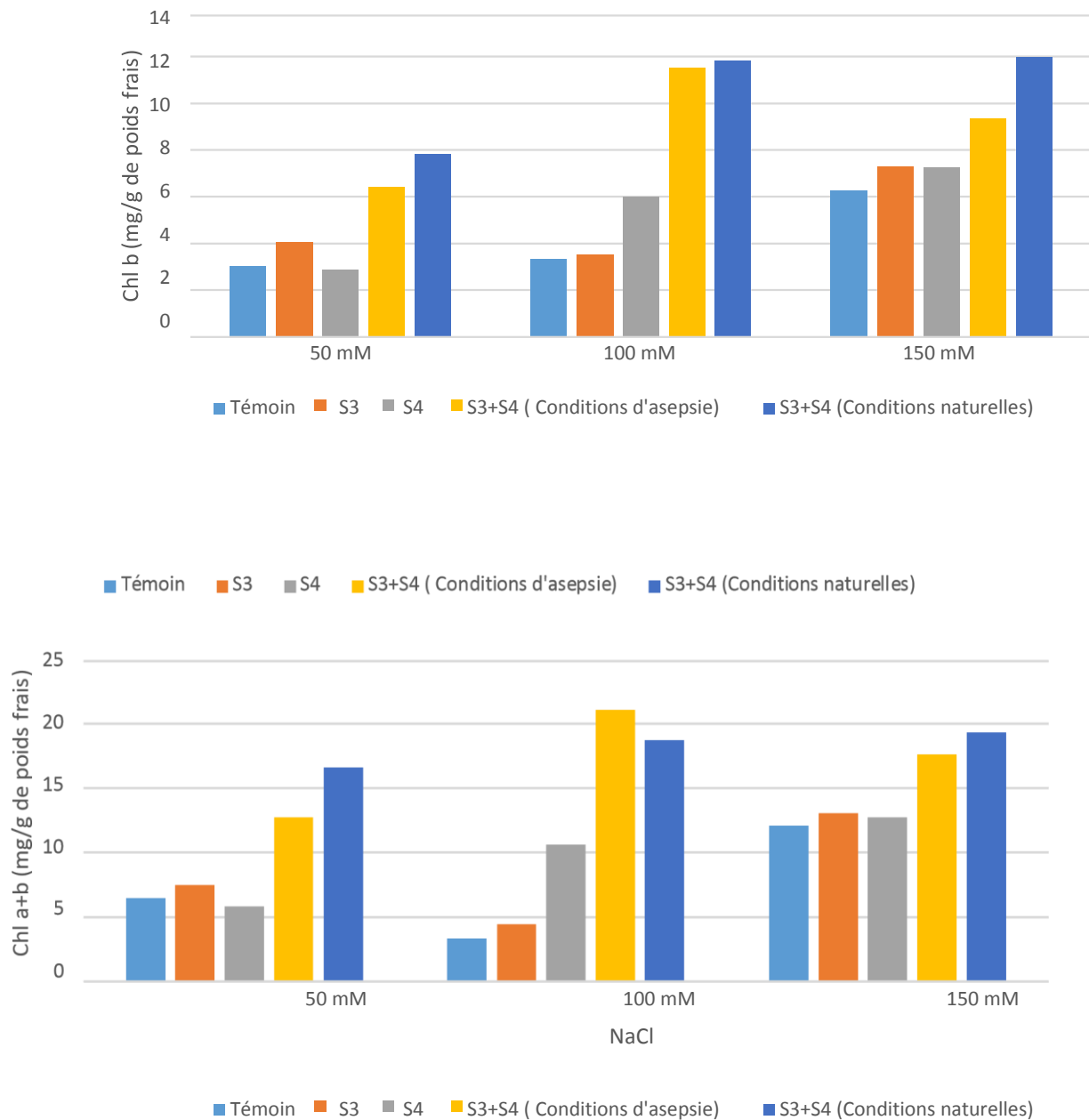


Figure 28 : Effet de la bacterisation sur le taux de chlorophylle a,b et totale (mg/g de matière fraîche) dans les feuilles du blé dur sous différentes concentrations de Na Cl (50,100 et 150mM).

Selon Mahmoud et *al.* (2016) le stress salin entraine une réduction significative des teneurs en chlorophylles, ceci est semblable aux résultats obtenus après l’application de stress salin chez le témoin non inoculé.

Kerbab (2022), a montré que l’inoculation par les souches de *Bacillus* OR15 et RB13 et leur combinaison ont amélioré le taux de chlorophylle des plantes *d’Arabidopsis thaliana*

en conditions de stress salin (0, 50, 100 et 150 Mm NaCl). Ces résultats sont similaires à ceux enregistrés dans cette étude L'amélioration par les PGPR de la teneur en chlorophylle de nombreuses plantes cultivées sous les conditions de stress abiotique a été déjà décrite (Heidari et *al.*, 2011 ; Kang et *al.*, 2014 ; Liu et *al.*, 2017).

II.4.2.2. Teneur en cendres

L'analyse des cendres racinaires démontre l'accumulation de minéraux dans les tissus du blé et nous informe sur son état nutritionnel, la teneur mesurée nous confère une référence pré inoculation bactérienne, on s'attend que la symbiose stimule l'adsorption de nutriments tel que le P, le K, le Ca, et se manifeste par une augmentation de teneur en cendres, ces augmentations peuvent atteindre 65 % (Mardukhi et *al.* 2011).

La teneur en cendres est mesurée sur les racines de blé dur on constate que les valeurs enregistrées au niveau des plantes inoculées varient entre 98.93% et 99,9%.

On constate que la combinaison des souches s3 et s4 dans les conditions naturelles à la concentration 100 Mm atteint une valeur maximale de 99,9 % comparée à la valeur minimale qui est de 98% a été enregistrée chez le témoin a la concentration de 150Mm.

En effet, la calcination a haute température entraîne une perte de masse organique conduisant à une teneur résiduelle élevée en minéraux, donc en cendres (Pomeranz et Meloan, 1994).

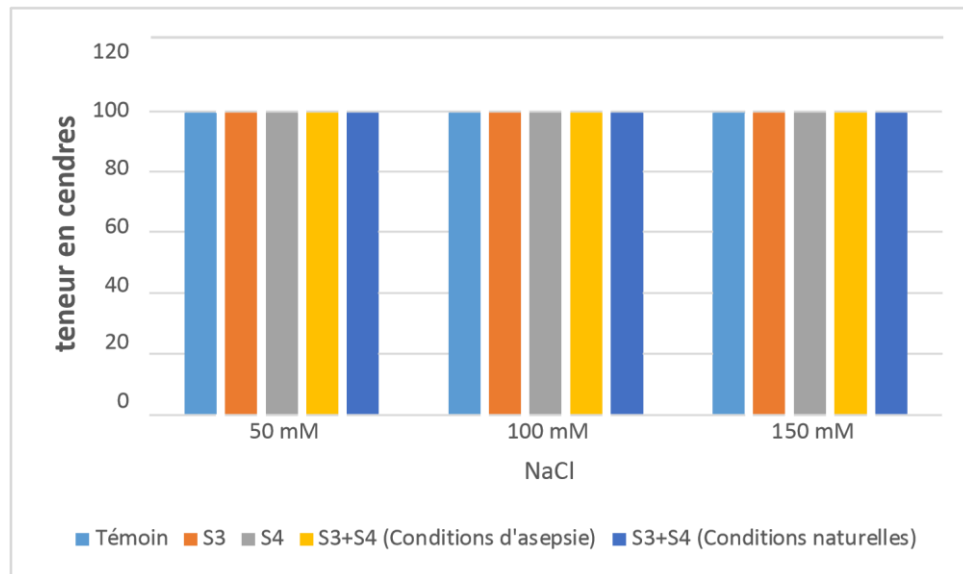
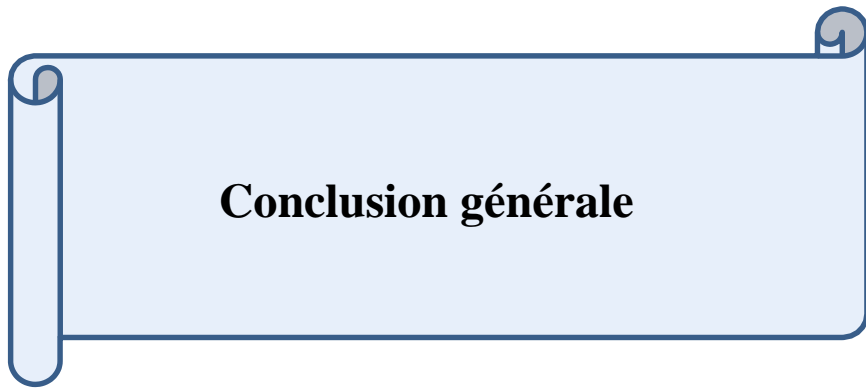


Figure 29 : effet de la bacterisation sur la teneur en cendres % dans les racines du blé dur sous différentes concentrations de NaCl (50mM, 100mM et 150mM).



Conclusion générale

Conclusion

Les cultures céréalières notamment celle du blé dur se trouvent exposés à de nombreux facteurs environnementaux qui limite la production agricole dont la salinité du sol responsable de la perte de rendement des cultures.

Dans ce travail, nous avons examiné le rôle de l'inoculation des graines du blé dur avec deux souches de PGPR (*Bacillus* sp.3 et *Bacillus* sp.4) dans l'amélioration de la germination et la stimulation de la croissance du blé dur dans les conditions de stress salin.

Les résultats obtenus rapportent que la bactérisation des graines du blé dur par les deux souches et leur combinaison montre un effet sur leur germination qui est considéré importante pour la combinaison (S3+S4).

Les résultats de l'essai de croissance dans des pots a montré que la croissance du blé est significativement affectée par la salinité. L'inoculation des graines de blé dur par ces bactéries et leur combinaison a montré un effet bénéfique sur la croissance car une amélioration des paramètres morphologiques a été enregistré (la hauteur des plumules, la longueur des racines, le poids frais et sec des tiges et des racines) qui est considérable surtout pour *Bacillus* sp.4 et la combinaison (*Bacillus* sp.3 + *Bacillus* sp.4). Tandis que pour la combinaison (*Bacillus* sp.3 + *Bacillus* sp.4) dans les conditions naturelles, les résultats sont contradictoires, car certains paramètres sont affectés positivement et d'autres négativement, cela peut être expliqué par l'interaction des deux bactéries étudiées avec des microorganismes du sol non stérilisé qui peuvent être bénéfiques ou non. Les paramètres biochimiques sont améliorés par l'inoculation de la combinaison (*Bacillus* sp.3 + *Bacillus* sp.4).

L'utilisation des bactéries de type PGPR pour l'amélioration de la croissance et la productivité des plantes touchées par la salinité reste une approche prometteuse pour améliorer la croissance du blé dur. Les résultats obtenus révèlent une grande importance à ces souches et ouvre plusieurs perspectives pour continuer :

-L'identification des souches testées.



Références bibliographiques

Référence Bibliographique

- **Akhtar. M.S, Siddiqui. Z.A, (2009).** Effect of plant growth promoting rhizobacteria, nematode parasitic fungi and root-nodule bacterium on root-knot nematodes *Meloidogyne javanica* and growth of chickpea Biocontrol Sci Technol, PP. 511-521.
- **Anzuay, M.S., Ciancio, M.G.R., Luduena, L.M., Angelini, J.G., Barros, G., Pastor, N., Taurian, T. (2017)** Growth promotion of peanut (*Arachis hypogaea* L.) and maize (*Zea mays* L.) plants by single and mixed cultures of efficient phosphate solubilizing bacteria that are tolerant to abiotic stress and pesticides. Microbiol. Res. 199, 98-109.
- **Adesemoye, A. O., Obini, M., et Ugoji, E. O.v (2008).** Comparison of plant growth-promotion with *Pseudoaemonas ruginosa* and *Bacillus subtilis* in three vegetables. Brazilian journal of Microbiology, 39(3), 423-426.
- **Ashraf M, Hasnain S, Berge O et Mahmood T. (2004).** Inoculating wheat seedlings with exopolysaccharide-producing bacteria restricts sodium uptake and stimulates plant growth under salt stress. Biol. Fertil. Soils, 40: 157-162.
- **Amer , G.A et Utkhede, R.S. (2000).** Development of formulations of biological agents for management of root rot of lettuce and cucumber. *Revue canadienne de microbiologie* , 46(9), 809-816. <http://dx.doi.org/10.1139/w00-063>.
- **Ahmad M, Kibret M (2014)** Mechanisms and applications of plant growth promoting rhizobacteria : current perspective. J King Saud Univ Sci 26:1-20
- **Akhtar. M.S, Siddiqui. Z.A, (2009).** Effect of plant growth promoting rhizobacteria, nematode parasitic fungi and root-nodule bacterium on root-knot nematodes *Meloidogyne javanica* and growth of chickpea Biocontrol Sci Technol, PP. 511-521.
- **Ashraf, M., H.R. Athar, P.J.C. Harris et T.R. Kwon (2008).** Some prospective strategies for improving crop salt tolerance. Adv. Agron. 97:45-110.
- **Amandine VIOLLET ,2010 :** Influence du système de sécrétion de type III bactérien dans les interactions plante *pseudomonas* spp. Fluorescents non pathogènes, thèse de doctorat,
- **Ashraf M, Hasnain S, Berge O et Mahmood T. (2004).** Inoculating wheat seedlings with exopolysaccharide-producing bacteria restricts sodium uptake and stimulates plant growth under salt stress. Biol. Fertil. Soils, 40: 157-162.
- **Bahadur,I.,Maurya,BR,Meena,VS,Saha,M.,Kumar,A.,Aeron,A.,2017.**Dynamique e de libération minérale du phosphate tricalcique et des déchets de muscovite par des rhizobactéries solubilisant les minéraux isolées de la plaine indo-gangétique de l'Inde .Géomicrobiol.J. 34 (5) ,454466
- **Bonjean, A., and E. Picard.** "Small grain cereals. Origin-history-economics-breeding." Small grain cereals. Origin-history-economics-breeding. (1990).
- **Benderradji, L. (2013).** Sélection in vitro pour la tolérance aux stress salin et thermique chez le blé tendre (*Triticum aestivum* L.). Thèse de Doctorat. Université des Frères Mentouri Constantine.

Références bibliographiques

- **Bonjean, A., and E. Picard.** "Small grain cereals. Origin-history-economics-breeding." Small grain cereals. Origin-history-economics-breeding. (1990).
- **Borrelli, P., Robinson, D. A., Fleischer, L. R., Lugato, E., Ballabio, C., Alewell, C., ... & Panagos, P. (2017).** An assessment of the global impact of 21st-century land use change on soil erosion. *Nature Communications*, 8(1), 1-12.
- **Boufenar-Zaghouane F. & Zaghouane O. (2006).** Guide des principales variétés de céréales à paille en Algérie (blé dur, blé tendre, orge et avoine). ITGC, 154.
- **Bahadur, I., Maurya, B. R., Meena, V. S., Saha, M., Kumar, A., Aeron, A., 2017.** Dynamique de libération minérale du phosphate tricalcique et des déchets de muscovite par des rhizobactéries solubilisant les minéraux isolées de la plaine indo-gangétique de l'Inde. *Géomicrobiol. J.* 34 (5) ,454466
- **Cherief, A., Bouhalili, M. (2018).** Effet de stress salin sur les paramètres morpho-physiologique, et biochimiques chez la fève *Vicia faba* L. Mémoire de Master.
- **Cherif, H. (2014).** Amélioration de la croissance du blé dur en milieu salin par inoculation avec *Bacillus* sp. et *Pantoea Agglomerans* isolées de sols arides. Thèse de doctorat.
- **Cheng, Z., E. Park et B. Glick (2007).** 1-Aminocyclopropane-1-carboxylate deaminase from *Pseudomonas putida* UW4 facilitates the growth of canola in the presence of salt. *Can J. Microbiol.*, 53(7):912-918.
- **Cherief, A., Bouhalili, M. (2018).** Effet de stress salin sur les paramètres morpho-physiologique, et biochimiques chez la fève *Vicia faba* L. Mémoire de Master. Algérie : *Université Abdelhamid Ibn Badis-Mostaganem*, 11 p.
- **Chellali, B. (2007).** Marché mondial des céréales : L'Algérie assure sa sécurité alimentaire.
- <http://www.lemaghrobdz.com/admin/folder 01/une.pdf>.
- **Clement G., Prats J., (1970).** les céréales. Collection d'enseignement agricole. 2ème Ed.
- **Carver, B. F. (Ed.). (2009).** Wheat: Science and Trade. Wiley-Blackwell.
- **Del Rio, L.A., F.J. Corpas, L.M. Sandalio, J.M. Palma, et J.B. Barroso (2003).** Plant peroxisomes, reactive oxygen metabolism and nitric oxide. *IUBMB Life*, 55:71-81.
- **Delarras, C. (2007).** Microbiologie pratique pour le laboratoire d'analyses ou de contrôle sanitaire : Aliments, produits cosmétiques, eaux, produits pharmaceutiques. Editions Médicales Internationales, Lavoisier 476 p.
- **Delarras, C. (2007).** Microbiologie pratique pour le laboratoire d'analyses ou de contrôle sanitaire : Aliments, produits cosmétiques, eaux, produits pharmaceutiques. Editions Médicales Internationales, Lavoisier.
- **Deepmala Katiyar, 2016:** Plant Growth Promoting Rhizobacteria-an Efficient Tool for Agriculture Promotion, P05.
- **Donot, F., Fontana, A., Baccou, J.C., Schorr-Galinda, S. (2012).** Microbial exopolysaccharides: Main examples of synthesis, excretion, genetics and extraction. *Carbohydr. Polym.* 87, 951_962.

Références bibliographiques

- **Djerroudi-Zidane O., M. Belkhodja, S. Bissati, S. Hadjadj. 2010.** Effet du stress salin sur l'accumulation de Proline Chez Deux Espèces d'Atriplex Halimus L. et Atriplex Canescens (Pursh) Nutt. *European Journal of Scientific Research*, 41 : 249-260.
- **Egamberdieva, D., Wirth, S., Bellingrath-Kimura, S. D., Mishra, J., & Arora, N. K. (2019).** Salttolerant plant growth promoting rhizobacteria for enhancing crop productivity of saline soils. *Frontiers in microbiology*, 10, 2791.
- **Eichmann, R., Richards, L. et Schafer, P. (2021).** Hormones comme intermédiaires dans l'assemblage du microbiome végétal. *Plant J.* 105, 518-541. doi :10.1111/TPJ.15135 de Salamone, IEG, Di Salvo, LP, Escobar Ortega, JS, Boa Sorte, PM
- **Egamberdieva, D., Kucharova, Z., Davranov, K., Berg, G., Makarova, N., Azarova, T., et Lugtenberg, B (2011).** Bacteria able to control foot and root rot and to promote growth of cucumber in salinated soils. *Biology and fertility of soils*, 47(2), 197-205.
- **FAO. (2015).** Status of the world's soil resources (SWSR)-main report. Food and agriculture organisation of the United Nations and intergovernmental technical panel on soils, Rome, Italy, 650.
- **FAO. (2008).** FAO Land and Plant Nutrition Management Service. <http://www.fao.org/ag/agl/agll/spush> Consulté le :12/08/2023. A 15 :32
- **FAO. (2020).** Agriculture: hausse de production Durant la campagne 2017-2018.
- <https://www.aps.dz/economie/100602-agriculture-hausse-de-production-durant-la-campagne-2017-2018>. Consulté le :14/08/2023. A 12 :06
- **FAO. (2011).** The state of the world's land and water resources for food and agriculture (SOLAW). Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- **Feldman, M. 2001.** Origin of Cultivated Wheat. Dans Bonjean A.P. et W.J. Angus (éd.) *The World Wheat Book: a history of wheat breeding*. Intercept Limited, Andover, Angleterre, 358.
- **Fageria, N.K.; Stone, L.F.; Santos, A.B.D. Breeding for salinity tolerance. *Plant Breed. Abiotic Stress Toler.* 2012, 9783642305535, 103–122.**
- **Feillet P. (2000).** Le grain de blé : composition et utilisation. INRA. Paris.

Références bibliographiques

- **Flowers, T.J. (2004).** Improving crop salt tolerance. *Journal of Experimental botany*, **55**(396), 307-319.
- **FAO. (2021).** FAOSTAT Database. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Retrieved from <http://www.fao.org/faostat/>
- **Flexas, J., Bota, J., Loreto, F., Cornic, G., & Sharkey, T. D. (2004).** Diffusive and metabolic limitations to photosynthesis under drought and salinity in C3 plants. *Plant Biology*, **6**(3), 269-279.
- **Flowers, T. J., & Colmer, T. D. (2008).** Salinity tolerance in halophytes. *New Phytologist*, **179**(4), 945-963.
- **Fazeli-nasab B, Moshtaghi N, Forouzandeh M. (2019)** Effect of Solvent Extraction on Phenol, Flavonoids and Antioxidant Activity of some Iranian Native Herbs. *Sjimu*. **27** (3) :14-26
- **Glick, B. R. (2012).** Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications. Scientifica, 2012.
- **Glick, B. R. (2015).** Beneficial plant–microbe interactions: Ecology of the rhizosphere (Vol. 63). Springer.
- **Giban M., Minier B. & Malvosi R. (2003).** Stades du blé, éd ITCF, Paris, 68p.
- **Grover, M., Bodhankar, S., Sharma, A., Sharma, P., Singh, J. et Nain, L. 2020.** PGPR mediated alterations in root traits: way towards sustainable crop production. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, **4**, 287.
- **Glick, B. R., Cheng, Z., Czarny, J., & Duan, J. (2007).** Promotion of plant growth by ACC deaminase-producing soil bacteria. *European Journal of Plant Pathology*, **119**(3), 329-339.
- **Hamadache, A. 2001.** Stades et variétés de blé, document de vulgarisation, ITGC, DFRV, alger, 22p.
- **Heidari, M., et Jamshid, P. (2010).** Interaction between salinity and potassium on grain yield, carbohydrate content and nutrient uptake in pearl millet. *J Agric Biol Sci*, **5**, 39-46
- **Huang, B., Sun, W., & Liu, X. (2012).** Effect of salt adaptation on cellular characteristics and Na⁺ removal ability of marine bacterium *Bacillus* sp. YX-1. *Environmental Science and Pollution Research*, **19**(8), 3522-3529.
- **Hallman, J., A. Quadt-Hallman, W.F. Mahaffee et J.W. Kloepper (1997).** Bacterial endophytes in agricultural crops. *Can, J. Microbiol.*, **43**: 895 -914.
- **Hayat, R., Ali, S., Amara, U., Khalid, R., et Ahmed, I. (2010).** Soil beneficial bacteria and their role in plant growth promotion: a review. *Annals of Microbiology*, **60**(4), 579- 598.
- **Hussain, S., Shaukat, M., Ashraf, M., Zhu, C., Jin, Q. et Zhang, J. (2019).** Stress de salinité dans les climats arides et semi-arides : effets et gestion des grandes cultures dans le changement climatique et l'agriculture. Londres : Intech Open.
- **Hamadache A. (2013).** Eléments de phytotechnie générale-Grandes Cultures-Tome 1 : le blé, 11-49.

Références bibliographiques

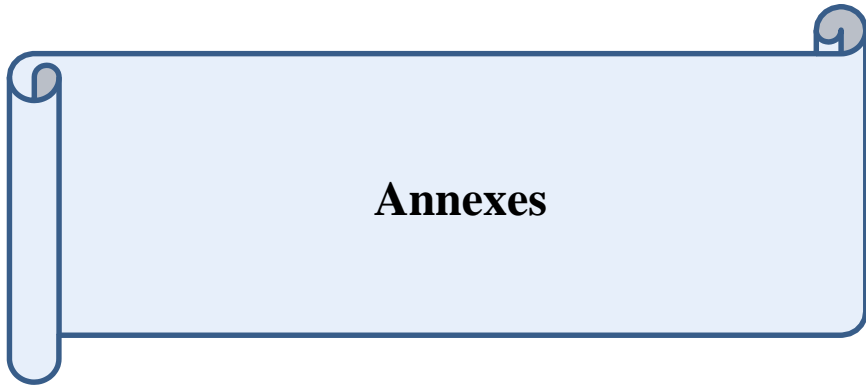
- **Hossain, S. (2019).** Scénario actuel des sols affectés par le sel dans le monde, sa gestion et l'importance de la recherche sur la salinité. *Int. J. Biol. Sci.* 1, 1–13. doi : 10.1201/9780203739242-1
Institut national des sols, de l'irrigation et du drainage 2008.
- **Ilyas, N., Bano, A. et Iqbal, S., N. I. (2012).** Physiological, biochemical and molecular characterization of *azospirillum* spp. Isolated from maize under water stress. *Pakistan journal of botany*, 44, 71-80
- **Kang, S. M., Khan, A. L., Waqas, M., You, Y. H., Hamayun, M., Joo, G.J., et al. (2015).** Gibberellin-producing *Serratia nematodiphila* PEJ1011 ameliorates low temperature stress in *Capsium annuum* L. *Eur. J. Soil Biol.* 68, 85-93. doi: 10.1016/j.soilbi.2015.02.005.
- **Kong, Z., Glick, B.R. (2017)** The role of plant growth-promoting bacteria in metal phytoremediation. *Adv. Microb. Physiol.* 71,97-132.
- **Kausar, R., et Shahzad, S. M. (2006).** Effect of ACC-deaminase containing rhizobacteria on growth promotion of maize under salinity stress. *J Agric Soc Sci*, 2(4), 216-218.
- **Kang, S. M., Khan, A. L., Waqas, M., You, Y. H., Kim, J. H., Kim, J. G., ... et Lee, I. J. (2014).** Plant growth-promoting rhizobacteria reduce adverse effects of salinity and osmotic stress by regulating phytohormones and antioxidants in *Cucumis sativus*. *Journal of Plant Interactions*,9(1), 673-682.
- **Khan, Khalil and Shewry, Peter R. Wheat: Chemistry and Technology**, Fourth Edition. AACC International Press, 2009.
- **Kerbab, S. (2022).** Effets bénéfiques des bactéries halotolérantes isolées de la rhizosphère des halophytes sur la croissance du blé dur dans les sols salins. Thèse de doctorat. Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie. Université Ferhat Abbas Sétif 1.56p.
- **Kumar, A., Singh, S., Gaurav, A. K., Srivastava, S.,- Saharan, BS. Et V. Nehra (2011).** Plant Growthpromotingrhizobacteria : A criticalreview. *Life Sci. Med. Res.*, 21.
- **Kumar, A., Singh, S., Gaurav, A. K., Srivastava, S., & Verma, J. P. (2020).** Plant growth-promoting Bacteria: biological tools for the mitigation of salinity stress in plants. *Frontiers in Microbiology*, 11, 1216.
- **Kerbab, S. (2022).** Effets bénéfiques des bactéries halotolérantes isolées de la rhizosphère des halophytes sur la croissance du blé dur dans les sols salins. Thèse de doctorat. Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie. Université Ferhat Abbas Sétif 1.56p.
- **Kloepper, J. W., & Beauchamp, C. J. (1992).** A review of issues related to measuring of plant roots by bacteria. *Can. J. Microbiol.* 38:1219-1232.
- **Lynch, J. M. 1983.** Soil biotechnology: Microbiological factors in crop productivity, *Blackwell Scientific Publications.*, 2, 133-171.

Références bibliographiques

- **Mayak S, Tirosch T et Glick BR.** (2004). Plant growth-promoting bacteria confer resistance in to tomato plants so salt stress. *Plant Physiol. Biochem.* **42**: 565-572.
 - **Mahmood, S.,** Daur, I., Al-Solaimani, S. G., Ahmad, S., Madkour, M. H., Yasir, M., ... et Ali, Z., (2016). Plant growth promoting rhizobacteria and silicon synergistically enhance salinity tolerance of mung bean. *Frontiers in Plant Science*, *7*, 876.
 - **Munns, R., & Tester, M. (2008).** Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, *59*, 651-681.
 - **Maheshwari, D. K., Dheeman, and Agarwal, M. (2015).** “Phytohormoneproducing PGPR for sustainable agriculture,” in *Bacterial Metabolites in Sustainable Agroecosystem*, end D. Maheshawari (Cham: Springer), 159-182. doi: 10.1007/978-3-319-24654-3_7
 - **Marvasi, M., Visscher, P.T., Martinez, L.C. (2010)** Exopolymeric substances (EPS) from *Bacillus subtilis*: Polymers and genes encoding their synthesis. *FEMS Microbial. Lett.* *313*, 189.
- Maougal, R. T. 2014.** Contribution des phytases bactériennes à l'adaptation de *Phaseolus vulgaris* à la faible disponibilité de phosphore en sols méditerranéens. Thèse de doctorat en sciences, Université des frères mentouri constantine 1. 264 p.
- **Nagorska.K, Bikow ski.M, Obuchowski.M (2007).** Multicellular behavior and production of a wide variety of toxic substances support usage of *Bacillus subtilis* as a powerful biocontrol agent. *Acta Biochimica Polonica*, *54*: 495-508.
 - **NFV 05-113., (1972).** **Determination des cendres totals**, Vol 49, n°4,0289-0298.
 - **Oldroy, GE., EM. Engstrom, SR. Long (2001).** Ethylene inhibits the Nod factor signal transduction pathway of *Medicago truncatula*. *Plant cell.* *13*:1835-1849.
 - **Probanza.A et Lucas Garcia.JA, (2002).** Pinus pineal seedling growth and bacterial rhizosphere structure after inoculation With PGPR *Bacillus*. *Applied Soil Ecology*, *20*: 75 - 84.
 - **Rabie, G. H.,** Aboul-Nasr, M. B., et Al-Humiany, A. (2005). Increase salinity tolerance of cowpea plants by dual inoculation of AM fungus *Glomus clarum* and nitrogen-fixer *Azospirillum brasilense*. *Mycobiology*, *33*(1), 51-61.
 - **Rajendran, K., Tester, M. et Roy, SJ (2009).** Quantification des trois principales composantes de la tolérance à la salinité des céréales. *Cellule végétale Environ.* *32*, 237– 249. doi : 10.1111/j.1365-3040.2008.01916.x
 - **Ranjbar, F.; Jalali, M.** The combination of geostatistics and geochemical simulation for the site-specific management of soil salinity and sodicity. *Comput. Electron. Agric.* **2016**, *121*, 301–312
 - **Sannazzaro, A. I., Echeverria, M., Alberto, E. O., Ruiz., o. A., et Menéndez., A. B (2007).** Modulation of polyamine balance in *Lotus glaber* by salinity and arbuscular mycorrhiza. *Plant Physiology and Biochemistry*, *45*(1), 39-46.

Références bibliographiques

- **Sapre, S., Gouha-Mishra, I., et Tiwari, S. (2016).** *Nostoc* sp. confers enhanced tolerance to salinity and plant growth promotion in oat seedlings (*Avena sativa*). *Microbiological research*. **206**, 25-32.
- **Sadouki M. (2018).** Etude de la variabilité morpho-physiologique du blé dur (*Triticum durum* Desf) dans les conditions climatique du Haut Chélif. Thèse de mastère. Univ de Khemis-Miliana.46p.
- **Soukeina Mint El Moukhtar, (2010)** : Etude des réponses physiologique et métabolique de dix variétés de riz (*Oryza sativa* L.) aux premiers stades de développement vis-à-vis du stress salin, étude approfondies, université cheikh Anta Diop de Dakar, p06.
- **Soltner, 2005** : Etude de la variabilité morpho-physiologique et moléculaire d'une collection de blé dur algérien (*Triticum durum* Desf.).Thèse Magistère. Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Département de Biologie et Ecologie, Université Mentouri, Constantine. Constantine.9p.
- **Sziderics, A. H., Rasche, F., Trognitz, F., Sessitsch, A., et Wilhelm, E. (2007).** Bacterial endophytes contribute to abiotic stress adaptation in pepper plants (*Capsicum annum* L.). *Canadian journal microbiology*, 53(11), 1195-1202.
- **Saharan, B. S. et Nehra, V. (2011).** Plant growth promoting rhizobacteria: a critical review. *Life Sciences and Medicine Research*, Volume 2011: LSMR -21.
- **Saravanakumar, D. et R. Samiyappan (2007).** ACC deaminase from *Pseudomonas fluorescens* mediated saline resistance in groundnut (*Arachis hypogea*) plants. *J. Appl. Microbiol.*, 102(5): 1283-1292.
- **Selvakumar, G., Kim, K., Hu, S. et Sa, T. (2014).** "Effet de la salinité sur les plantes et le rôle des champignons mycorhiziens arbusculaires et des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes dans l'atténuation du stress salin", dans *Physiological Mechanisms and Adaptation Strategies in Plants Under Changing Environment*, eds P. Ahmad et MR Wani (Cham: Springer), 115–144. doi : 10.1007/978-1-4614-8591-9_6
- **Soltner D. (2005).** Les grandes productions végétales .Ed. Collection sciences et techniques agricoles, 472p.
- **Tanveer M., Shah, AN, 2017.**Un aperçu des mécanismes de tolérance au stress salin de *Chenopodium album* Environ Sci Pollut Res Int. 24,16531-16535. doi : 10.1007/s11356-017-9337-2)
- **Upadhyay, S.K., Maurya, S.K., Singh, D.P. (2012)** Salinity tolerance in free-living plant growth promoting rhizobacteria. *Indian J. Res.* 3, 73-78.
- **Vessey, J.K (2003).** Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant Soil*, **255** : 571-586.
- **Yoo, S.J., Weon, H. Y., Song, J., Sang, M.K. (2019)** Induced tolerance to salinity stress by halotolerant bacteria *Bacillus aryabhattai* H19 -1 and *B. mesonae* H20-5 in tomato plants. *J. Microbiol. Biotechnol.*, 29, 1124-1136.



Annexes

Annexe 01 : produits chimiques

Eau distillée ; eau physiologique ; Sulfate de magnésium ($MgSO_4$) ; Fushine ; violet de Gentiane ; huile à immersion ; solution de Lugol ; alcool (Ethanol) ; acétone ; eau javel ; Kcl ; chlorure de sodium ($NaCl$) ; acide acétique ; ninhydrine. **Annexe 02 :**

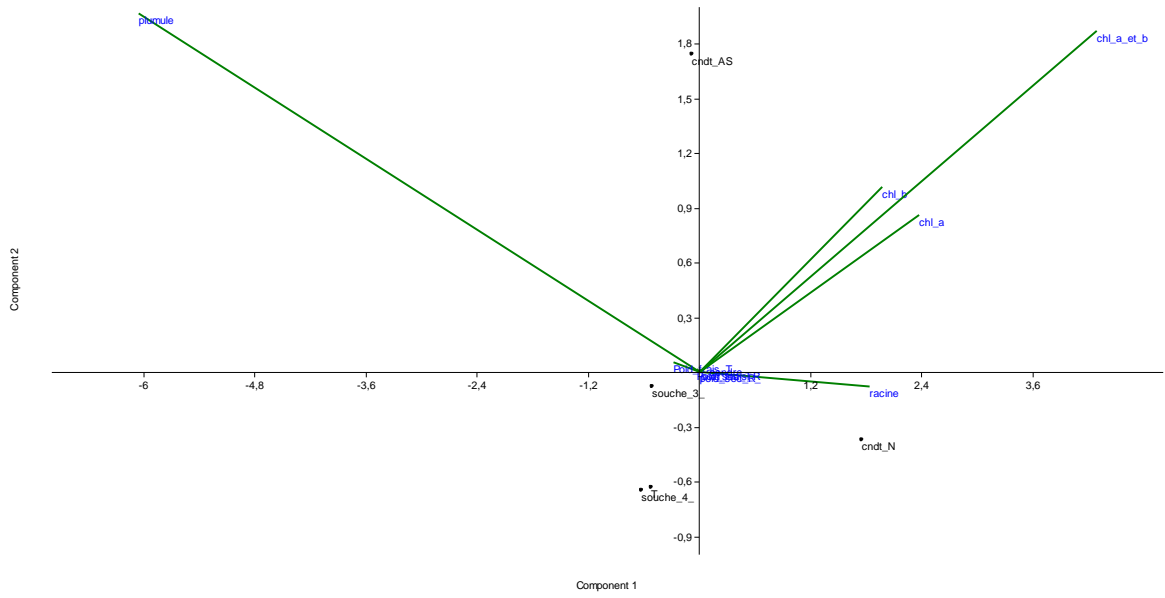
Appareillage et outillage

Outillage	Appareillage
Flacon	Etuve
Béchers	Bain marie
Eprouvettes graduées	Spectrophotomètre
Entonnoir	Réfrigérateur pH
Tubes à essai	mètre Balance
Spatule	Autoclave
Portoirs de tubes	Bec Bunsen
Boîtes de Pétries	Agitateur à plaque chauffante
Pincés	Four Pasteur
Micropipettes	Microscope optique
Seringues	
Pipette Pasteur	
Ecouillons	
Erlenmeyer	
Papier filtre	
Papier aluminium	
Lames	
Pioche	

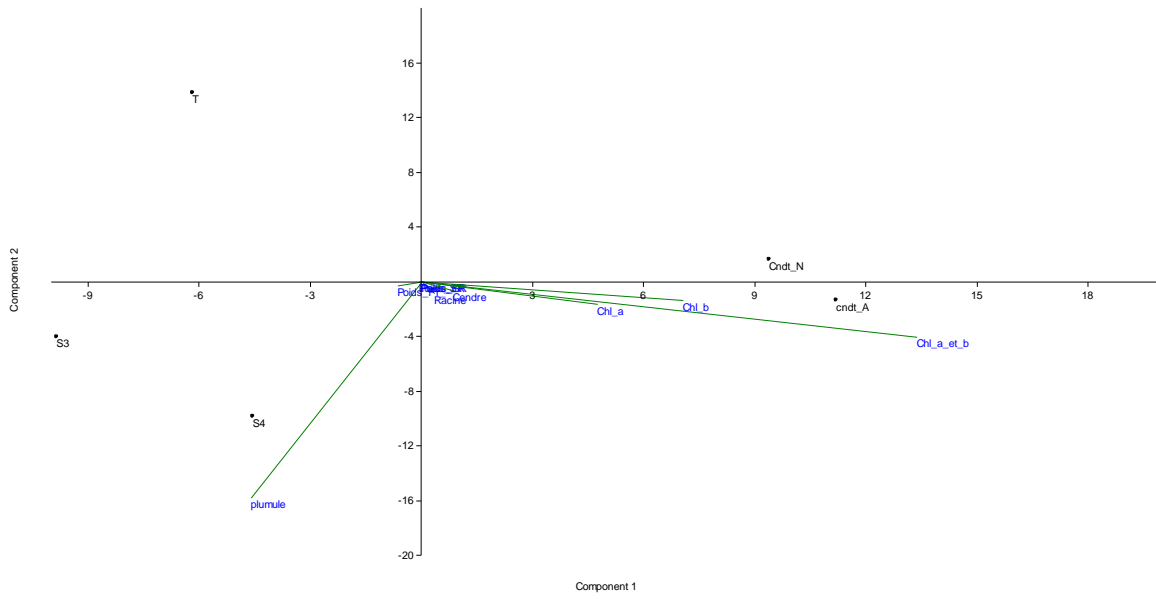
Annexe 02 :**Analyses statistiques :**

Les expériences effectuées sont exprimées via le logiciel Past. Il permet de grouper les paramètres qui présentent une corrélation entre eux par exemple pour la concentration 50Mm, la chlorophylle a ainsi que la chlorophylle b et la chlorophylle a et b forment un seul groupe. Les autres paramètres à l'exception des plumules forment un autre groupe, puis on remarque une convergence d'effets sur la souche4 et le témoin qui divergent un peu de la souche3.

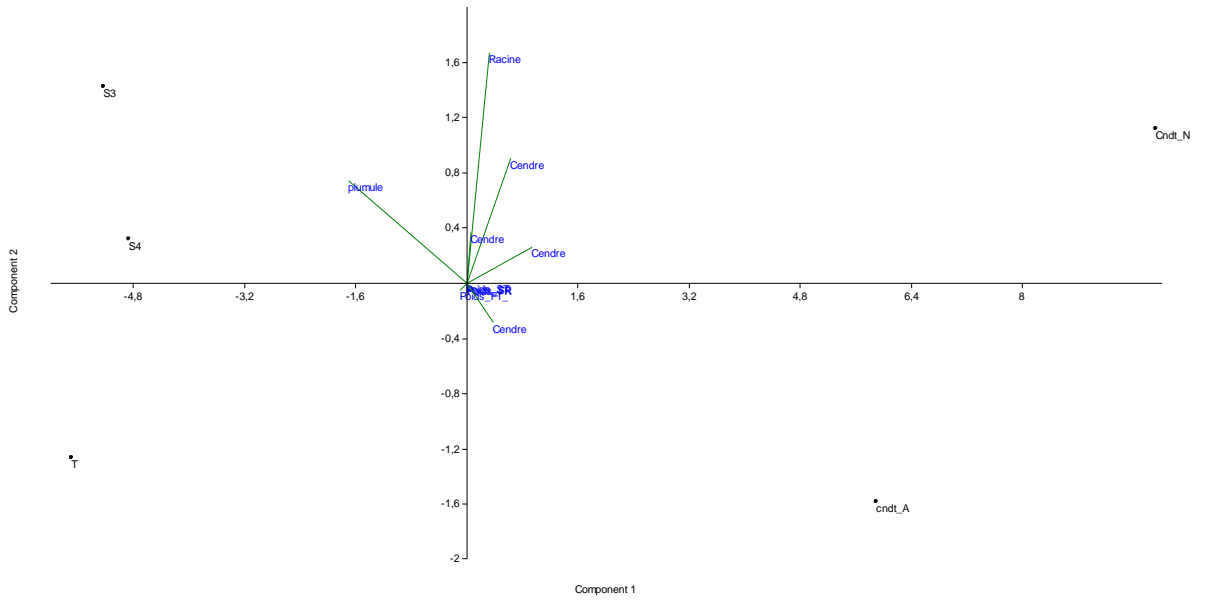
CONCENTRATION 50mM



Concentration 100mM



Concentration 150mM



Résumé

Les cultures céréalières notamment celle du blé dur se trouvent exposées à de nombreux facteurs environnementaux qui limitent la production agricole, dont la salinité du sol qui est l'un des principaux stress abiotiques affectant fortement la croissance végétale. Ce qui a rendu ce sujet l'une des priorités de la recherche scientifique visant à mieux comprendre le phénomène afin de pouvoir sélectionner des plantes plus tolérantes. Dans ce contexte, l'étude relative à l'inoculation des graines de blé dur variété (vitreux américain) avec deux souches bactériennes (*Bacillus* sp.3 et *Bacillus* sp.4) dans le but d'apprécier l'effet positif des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR) sur l'amélioration de la germination et la stimulation de la croissance du blé dur dans les conditions de stress salin. Les résultats obtenus rapportent que la bactérisation des graines du blé dur par les deux souches et leur combinaison montre un effet sur leur germination qui est considéré importante pour la combinaison (*Bacillus* sp.3 et *Bacillus* sp.4). L'inoculation des graines de blé dur par ces bactéries et leur combinaison a montré un effet bénéfique sur la croissance car une amélioration des paramètres morphologiques a été enregistré (la hauteur des plumules, la longueur des racines, le poids frais et sec des tiges et des racines) qui est considérable surtout pour *Bacillus* sp.4 et la combinaison (*Bacillus* sp.3 + *Bacillus* sp.4).

Mots clés : PGPR, *Bacillus*, Salinité, croissance, blé

Abstract

Cereal crops, particularly durum wheat, are exposed to a number of environmental factors that limit agricultural production, including soil salinity, which is one of the main abiotic stresses strongly affecting plant growth. This has made the subject one of the priorities of scientific research aimed at gaining a better understanding of the phenomenon so as to be able to select more tolerant plants. In this context, a study was carried out on the inoculation of durum wheat seeds (American vitreous) with two bacterial strains (*Bacillus* sp.3 and *Bacillus* sp.4) with the aim of assessing the positive effect of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) on improving germination and stimulating growth of durum wheat under salt stress conditions. The results obtained show that bacterization of durum wheat seeds by both strains and their combination shows an effect on germination which is considered significant for the combination (*Bacillus* sp.3 and *Bacillus* sp.4). Inoculation of durum wheat seeds with these bacteria and their combination showed a beneficial effect on growth as an improvement in morphological parameters was recorded (plumule height, root length, fresh and dry weight of stems and roots) which is considerable especially for *Bacillus* sp.4 and the combination (*Bacillus* sp.3 + *Bacillus* sp.4).

Key words: PGPR, *Bacillus*, Salinity, growth, wheat

ملخص

تتعرض محاصيل الحبوب، وخاصة القمح القاسي، لعدد من العوامل البيئية التي تحد من الإنتاج الزراعي، بما في ذلك ملوحة التربة، والتي تعد واحدة من الضغوط غير الحيوية الرئيسية التي تؤثر بقوة على نمو النبات. مما جعل الموضوع أحد أولويات البحث العلمي الهادف إلى الوصول إلى فهم أفضل للظاهرة حتى يتمكن من اختيار نباتات أكثر تحملاً. وفي هذا الإطار أجريت بهدف تقييم (*Bacillus* sp.3 و *Bacillus* sp.4) دراسة تلقيح بذور القمح القاسي (الزجاجي الأمريكي) بسلالتيين بكتيريتين على تحسين إنبات وتحفيز نمو القمح القاسي تحت ظروف (PGPR) التأثير الإيجابي للبكتيريا الجذرية المعززة لنمو النبات الإجهاد الملحي. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن بكتيريا بذور القمح القاسي بكلتا السلالتين ودمجهما أظهرت تأثيراً أظهر تلقيح بذور القمح القاسي بهذه (*Bacillus* sp.3 و *Bacillus* sp.4) على الإنبات والذي يعتبر معنوياً بالنسبة للجمع البكتيريا ومزيجها تأثيراً مفيداً على النمو حيث تم تسجيل تحسن في المعايير المورفولوجية (ارتفاع الريشة، طول الجذر، *Bacillus* sp.4 والتركيبية الوزن الطازج والجاف للسيقان والجذور) وهو أمر ملحوظ خاصة بالنسبة لبكتيريا sp.3 + *Bacillus* sp.4).

، الملوحة، النمو، القمح *Bacillus*، PGPR: الكلمات المفتاحية

