

DEPARTEMENT DES SCIENCES AGRONOMIQUES
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
UNIVERSITE AMAR TELIDJI LAGHOUAT
جامعة عمار تليجي الأغواط
FACULTE DES SCIENCES
كلية العلوم



MÉMOIRE DE MASTER

Filière : Sciences agronomiques

Option : Amélioration des plantes

THEME

Contribution à l'étude de la biostimulation de la
tomate (*Solanum lycopersicum* L.) par des
rhizobactéries sous stress salin

Réalisé par : BENSSAD Menal

Membre de Jury

M ^r . MOULAI ADEL.	MAA	Président
M ^{me} . MALLEM HAMIDA	MCA	Examinatrice
M ^{me} . AMEUR DJAMILA	MAA	Encadrante

Année universitaire 2023/2024

Remerciement

Avant tout, nous remercier DIEU tout puissant, qui nous a donné le courage et le savoir afin
d'achever ce modeste travail.

Nous remercions d'une façon toute particulière notre promotrice et
Melle AMEUR DJAMILA pour avoir accepté de diriger ce travail, pour tous ses efforts,
son
savoir, ses conseils , ses critiques constructives et sa confiance.

Tous nos remerciements pour Monsieur MOULAI ADEL, Et Madame MALLEM
HAMIDA

Pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de juger notre travail.

Enfin, nous tenons à remercier tous nos enseignants qui ont assuré notre formation
et tout

le personnel de la faculté des sciences de la nature et la vie , Université
AMAR TELIDJI LAGHOUAT.

Dédicace

*Je dédie ce modeste travail pour toute ma famille pour leur soutien
tout au long de mon parcours :*

A mon chère Père : رحمة الله

*Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se
doit. J'espère que tu es fier de moi .*

A ma chère Mère

*Son soutien tout au long de mes études sa bienveillance et ses conseils ont été
très précieux, je tiens à lui témoigner ma profonde affection et reconnaissance.*

A ma petite sœur Achouak

*Je voudrais te remercier pour tout ce que tu as fait pour moi et d'être ma petite
sœur que tu es, merci pour ta présence dans les bons et les mauvais moments
et ton soutien.*

A mes frères

ATtalah, Madani , Mohammed

A mes Amies

A mes chères Copines : Manel , Imane , Hizia

A tous mes collègues de Amélioration génétique

MANEL

Contribution à l'étude de la biostimulation de la tomate (*Solanum lycopersicum* L.) par des rhizobactéries sous stress salin

Résumé

La tomate (*Solanum lycopersicum* L.) représente une culture stratégique pour l'Algérie. Cependant, un défi majeur pour son développement dans les régions arides réside dans la salinité des sols. En effet, l'eau d'irrigation utilisée dans ces zones est souvent riche en sels, ce qui nuit à la croissance des plants. L'objectif de cette étude est de trouver des solutions aux problèmes de stress abiotiques, notamment la salinité élevée des sols, que rencontrent les régions agricoles en Algérie. Nous envisageons l'utilisation des rhizobactéries locales comme alternative écologique et économique pour atténuer ces effets négatifs. L'expérimentation a été réalisée en deux essais distincts : un essai de tolérance des rhizobactéries au NaCl et un essai de phytostimulation. Dans le premier essai, l'analyse a révélé que la plupart des souches bactériennes croissent bien à 0 % et 2 % de NaCl, mais certaines, comme B8 et B9, commencent à manifester des signes de stress à 5 %. À 10 %, les souches B4 et B5 ne montrent aucune croissance, tandis que B16 et Rs21 prospèrent jusqu'à 15 %, indiquant ainsi leur forte tolérance au sel. Pour l'essai de phytostimulation, les isolats R2, B4 et B9 ont été choisis pour évaluer leur effet sur la biostimulation de la croissance du blé sous stress salin. Quatre concentrations de NaCl ont été testées : 0, 4, 8 et 12 g/L. Les résultats montrent une augmentation du taux relatif d'humidité dans les feuilles à 8 et 12 g/L de NaCl, dépassant celui du témoin sans traitement bactérien. De plus, la quantité de proline dans les feuilles est supérieure à celle trouvée dans les racines, ce qui suggère une réponse physiologique favorable à l'osmoprotection sous stress salin. L'interaction entre les plantes et les PGPR (Bactéries Promotrices de la Croissance des Plantes) est fortement influencée par les stress biotiques et abiotiques, tels que les phytopathogènes, le déséquilibre nutritionnel et la salinité élevée, particulièrement dans les régions arides et semi-arides. L'augmentation de la concentration en sel conduit à une réduction de la croissance et du développement des cultures agricoles, rendant cette recherche essentielle pour l'agriculture durable dans ces zones.

Mots-clés : *Solanum lycopersicum* L., PGPR, rhizobactéries, salinité, biostimulation de la croissance.

المساهمة في دراسة التحفيز البيولوجي للطمطم (*Solanum lycopersicum* L.) بواسطة البكتيريا الجذرية تحت الضغط الملحي

الملخص

تعتبر الطمطم (*Solanum lycopersicum* L.) محصولاً استراتيجياً للجزائر. ومع ذلك، فإن التحدي الرئيسي في تطويرها في المناطق الجافة يتمثل في ملوحة التربة. فالمياه المستخدمة في الري في هذه المناطق غالباً ما تكون غنية بالأملاح، مما يؤثر سلباً على نمو النباتات. الهدف من هذه الدراسة هو إيجاد حلول لمشاكل الإجهادات البيئية، وخاصة ملوحة التربة المرتفعة التي تواجهها المناطق الزراعية في الجزائر. نهدف إلى استخدام البكتيريا الجذرية المحلية كبديل بيئي واقتصادي للتخفيف من هذه الآثار السلبية.

تم إجراء التجربة على مرحلتين منفصلتين: اختبار تحمل البكتيريا الجذرية للملح (NaCl) واختبار التحفيز النباتي. في المرحلة الأولى، أظهرت التحليلات أن معظم السلالات البكتيرية تنمو بشكل جيد عند 0% و 2% من NaCl، ولكن بعضها، مثل B8 و B9، بدأ يظهر عليها علامات الإجهاد عند 5%. عند 10%، لم تنمو السلالات B4 و B5، في حين أن B16 و Rs21 ازدهرت حتى 15%، مما يشير إلى تحملها العالي للملح. أما بالنسبة لاختبار التحفيز النباتي، فقد تم اختيار العزلات R2 و B4 و B9 لتقييم تأثيرها في تحفيز نمو القمح تحت الإجهاد الملحي، باستخدام أربع تركيزات من NaCl: 0، 4، 8 و 12 غرام/لتر. أظهرت النتائج زيادة في معدل محتوى الماء النسبي في الأوراق عند 8 و 12 غرام/لتر من NaCl، متفوقة على الشاهد الذي لم يتم معالجته بالبكتيريا. بالإضافة إلى ذلك، كانت كمية البرولين في الأوراق أعلى من تلك الموجودة في الجذور، مما يشير إلى استجابة فسيولوجية مواتية لحماية الأوسمولية تحت الإجهاد الملحي. تتأثر التفاعلات بين النباتات و (PGPR البكتيريا المحفزة لنمو النباتات) بشكل كبير بالإجهادات الحيوية وغير الحيوية، مثل الأمراض النباتية، اختلال التوازن الغذائي وارتفاع الملوحة، خصوصاً في المناطق الجافة وشبه الجافة. يؤدي زيادة تركيز الملح إلى تقليص نمو وتطور المحاصيل الزراعية، مما يجعل هذه الدراسة ضرورية للزراعة المستدامة في هذه المناطق.

الكلمات المفتاحية: *Solanum lycopersicum* L. ، PGPR ، بكتيريا جذرية، ملوحة، تحفيز النمو.

Contribution to the Study of Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) Biostimulation by Rhizobacteria Under Saline Stress

Abstract

Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) is a strategic crop for Algeria. However, a major challenge for its development in arid regions is soil salinity. Indeed, the irrigation water used in these areas is often high in salts, which negatively affects plant growth. The objective of this study is to find solutions to the problems of abiotic stress, particularly high soil salinity, encountered in agricultural regions of Algeria. We consider the use of local rhizobacteria as an ecological and economic alternative to mitigate these negative effects. The experiment was carried out in two separate trials: one to test the tolerance of rhizobacteria to NaCl and another to assess phytostimulation. In the first trial, the analysis revealed that most bacterial strains grew well at 0% and 2% NaCl, but some, like B8 and B9, began to show signs of stress at 5%. At 10%, strains B4 and B5 did not show any growth, while B16 and Rs21 thrived up to 15%, indicating their high tolerance to salt. For the phytostimulation trial, the isolates R2, B4, and B9 were selected to evaluate their effect on wheat growth under salt stress, using four NaCl concentrations: 0, 4, 8, and 12 g/L. The results showed an increase in the relative water content in the leaves at 8 and 12 g/L NaCl, surpassing that of the control (without bacterial treatment). Additionally, the proline content in the leaves was higher than in the roots, suggesting a favorable physiological response to osmoprotection under salt stress. The interaction between plants and PGPR (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria) is strongly influenced by both biotic and abiotic stresses, such as phytopathogens, nutrient imbalances, and high salinity, especially in arid and semi-arid regions. An increase in salt concentration leads to reduced growth and development of agricultural production, making this research essential for sustainable agriculture in these areas.

Keywords: *Solanum lycopersicum* L., PGPR, rhizobacteria, salinity, growth biostimulation.

Liste des abréviations

FAO : Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture.

PGPR : Plant Growth Promoting Rhizobacteria

GN : milieu gélose nutritif

USDA : Département de l'Agriculture des États-Unis

QTL : Quantitative Trait Loci

AMF : Arbuscular Mycorrhizal Fungi

CO₂ : dioxyde de carbone

S : sépales

P : pétales

E : étamines

C : carpelles

CE : la conductivité électrique

K⁺ : potassium

Fe : fer

Mn : manganèse

Mo : molybdène

Cu : cuivre

Zn : zinc

B : Bactérie

TNB : témoin non bactérisé

TRE : teneur relative en eau

AIA : acide indole-3- acétique

PGPR : Plantes Growth-Promoting Rhizobacteria

ACC : aminocyclopropane-1-carboxylate

Tab : tableau

Fig : figure

Liste des figures

N°	Titre	Page
01	Schéma d'un plant de tomate	07
02	La voie de transduction d'un signal de réponse à un stress abiotique chez la plante (Roeder, 2006).	15
03	Représentation schématique de la rhizosphère (Sheshadri et al., 2015)	20
04	Activité microbiologique de la rhizosphère (Vittorio et Christoph, 2016)	22
05	Présentation schématique de la flore de la rhizosphère	23
06	Croissance de certains isolats à des concentrations de 2 à 15 % de NaCl.	34
07	Effets de l'interaction entre le facteur bactérisation et le facteur concentration de NaCl sur la teneur en eau dans des feuilles	35
08	Effets de l'interaction entre le facteur bactérisation et le facteur concentration de NaCl sur la teneur en eau dans les des racines.	36
09	Effet de l'interaction entre le facteur bactérisation et le facteur concentration de Proline dans les feuilles	37
10	Effet de l'interaction entre le facteur bactérisation et le facteur concentration de Proline dans les racines	38
11	Effet de l'interaction entre le facteur bactérisation et le facteur concentration de Phénol dans les feuilles	39
12	Représentation des plants de tomate à la concentration de 12 g/L de NaCl.	39

Liste des tableaux

N°:	Titre	Page
01	Position systématiques de la tomate (Cronquist, 1981)	5
02	représentative les résultats de test tolérance au NaCl	33

Table des matières

Remerciements

Dédicaces

Résumé

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Table des matières

Introduction 01

Revue bibliographique

Chapitre 1 Généralités sur la tomate

I.1 Généralités sur la tomate	04
I.1.1 Histoire et origine de la tomate	04
I.1.2 Classification de la tomate	04
I.1.3 Description de la tomate	05
I.1.3.1. Système racinaire	05
I.1.3.2 Tige	05
I.1.3.3 Feuilles et inflorescences	06
I.1.3.4. Fleurs	06
I.1.3.5. Fruits	06
1.2. Classification génétique	07
1.2.1- Variétés fixées	07
1.2.2- Variétés hybrides	08
1.3 Les exigences pédo-climatiques de la tomate	08
1.3.1. Les exigences climatiques	08
1.3.1. 1 Température	08
1.3.1. 2 La Lumière	08
1.3.1. 3 L'humidité	09
1.3.1. 4 Structure du sol	09
1.3.1. 5 Le pH	09
1.3.1. 6 la salinité	10
1.3.1. 7 Les besoins hydriques	10
1.3.1. 8 La fertilisation	10
1.3.2.- les bienfaits de la tomate	10
1.3.3.- L'économie de la culture de tomate	11

Chapitre 2 la salinité

II.1 La salinité	12
II.1.1 Définition	12
II.1.2 Classification des sols salins	12
II.1.2. 1 Sols Salins	13
II.1.2 .2. Les Sols Salins-Alcalins	13
II.1.2 .3 Les Sols Alcalins	13
II.2. Le Stress	14
II.2.1 Définition	14
II.2.2. Les différents types de stress	14
II.2.2. 1 Stress biotique	14
II.2.2. 2 Stress abiotique	14
II.2.3 Effet de la salinité sur le développement des plante	15
II.2.4 Effet de la salinité sur la germination	16
II.2.5 Effet de la salinité sur le développement de la tomate	16
II.2.7.L'incidence de la salinité sur la florescence chlorophyllienne des tomates	18

Chapitre 3 les rhizobactéries

III.1-Généralité sur la rhizosphère	19
III.1.1 L'endorhizosphère	19
III.1.2 Le rhizoplan	20
III.1.3 L'ectorhizosphère	20
III.1.1-Activités microbiologique de la rhizosphère	20
III.1.2- la flore de la rhizosphère	22
III.1.2.1 Les champignons	23
III.1.2.2 Les actinomycètes	23
III.1.2.3. Les protozoaires	24
III.1.2.4. Les Algues	24
III.1.2.5. Les bactéries	24
III.1.3- Effet bénéfique de la bactérie	25
III.1.4- Facteurs déterminant la richesse et l'activité de la rhizosphère	25

Partie expérimentale

Matériel et Méthodes

IV-1 Matériel biologique	27
IV-1-1 Matériel végétal	27
IV-1-2 Matériel bactériens	27
IV-2 Essai de tolerance des isolats bactériens au NaCl	27

IV-3 Biostimulation de la croissance de la tomate sous stress salin	28
IV-3-1 Préparation des suspensions bactériennes	28
IV-3-2 Bactérisation du substrat	28
IV-3-3 Solution saline d'irrigation	28
IV-3-4 Dispositif expérimental	28
IV-3-5 Les paramètres étudiés	29
IV-3-5.1. paramètres morpho- physiologiques	29
a) Mensuration sur racines	29
b) Mensuration sur la partie aérienne	30
c) Mesure de la teneur relative en eau (TRE)	30
IV-3-5-2 Paramètres biochimiques	30
a) Extraction et dosage de la proline	30
b) Extraction et dosage de le phénol	31
IV-4 Analyse statistique	31
Résultats et discussion	
V.1 Résultats	32
V.1.2 Essai de tolérance des isolats bactériens au NaCl	32
V-2.2 Résultats relatifs à l'essai de la biostimulation de la croissance de la tomate sous stress salin	35
V.2.3. Effet sur la teneur en eau de feuilles	35
V.2.4. Effet sur la teneur en eau de racines	36
V.2.5. Effet sur la concentration de proline dans les feuilles	36
V.2.6. Effet sur la concentration de proline dans les racines	37
V.2.7. Effet sur la concentration du phénol dans les feuilles	38
V. 2 Discussion	40
Références bibliographiques	

Introduction

La tomate, qu'elle soit fraîche ou transformée, occupe une place prépondérante dans l'alimentation humaine (**Blancard *et al.*, 2009**). Elle est un ingrédient clé dans de nombreux plats traditionnels (**Courchinoux, 2008**). Ce fruit est particulièrement apprécié pour sa richesse en nutriments : il contient du potassium, des antioxydants, du magnésium, du phosphore, ainsi que des vitamines A, B, C et E, sans oublier ses fibres et sels minéraux essentiels (**Bureaux, 2013**).

La tomate est cultivée dans de nombreux pays à travers le monde, même dans des zones climatiques plus fraîches, grâce à l'essor des cultures sous abris (**FAO, 2010**). Ce fruit est non seulement un produit agricole savoureux, mais il est également riche en nutriments, notamment en lycopène. Des études épidémiologiques ont révélé que le lycopène pourrait jouer un rôle dans la lutte contre certaines maladies dégénératives, tel que le cancer de la prostate (**Liu *et al.*, 2000**).

Le potentiel de qualité se fixe dès la production, étant déterminé par les choix de variétés et les techniques de culture adoptées pour atteindre les critères visuels et organoleptiques souhaités. Les choix techniques réalisés est crucial car la qualité finale offerte au consommateur résulte des décisions prises à chaque phase, même les plus brèves (**Navez *et al.*, 2009**).

La croissance des plantes est effectivement influencée par plusieurs facteurs biotiques et abiotiques, dont la salinité qui constitue un obstacle majeur à la productivité végétale. À l'échelle mondiale, environ 340 millions d'hectares de terres agricoles subissent les effets de la salinité, représentant 23 % des surfaces cultivées (Cheverry, 1995). En Algérie, ce problème touche particulièrement 3,2 millions d'hectares (Hamdy, 1999), surtout dans les zones arides et semi-arides.

La salinisation est problématique car elle entraîne une diminution de la matière organique des sols et favorise l'accumulation d'ions toxiques. Cette dégradation des sols affecte directement la capacité des terres agricoles à soutenir une croissance saine des plantes. Les racines des végétaux ont du mal à absorber l'eau en raison de la concentration élevée de sels, ce qui peut réduire la croissance, entraîner des carences nutritives et diminuer le rendement des cultures.

Dans les régions touchées par la salinité, il est crucial de développer des stratégies de gestion durable du sol. Cela peut inclure l'utilisation de cultures halophiles, la mise en œuvre de techniques d'irrigation adaptées, et l'aménagement des terres pour réduire le drainage et favoriser l'infiltration de l'eau. En abordant la salinisation, on peut ainsi préserver la productivité agricole et améliorer la sécurité alimentaire dans ces zones vulnérables.

L'utilisation croissante des technologies microbiennes dans l'agriculture repose sur l'identification de nouvelles souches de bactéries bénéfiques, appelées PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria), qui favorisent la croissance des plantes. Les microorganismes de la rhizosphère jouent un rôle essentiel en influençant divers aspects du développement végétal (Kloepper et Beauchamp, 1992 ; Glick, 1995). Ils améliorent également la compétitivité des plantes et leur capacité à répondre à des facteurs de stress externes, tel que le stress salin. Des études montrent que l'inoculation de plantes soumises à un stress salin avec des souches PGPR permet d'atténuer ce stress (Ashraf *et al.*, 2008 ; Saharan et Nehra, 2011). En conséquence, la présence de bactéries halotolérantes, associées aux racines, peut également contribuer à améliorer la fertilité des sols salins (Hallman *et al.*, 1997). Par ailleurs, une meilleure compréhension des divers mécanismes d'action de ces rhizobactéries a permis de mettre en lumière leur potentiel dans l'optimisation de la croissance des plantes et leur résilience face aux stress abiotiques. Ainsi, l'exploitation des PGPR représente une voie prometteuse pour améliorer les rendements agricoles tout en préservant et enrichissant les sols.

L'objectif de notre travail est d'étudier la contribution de la biostimulation de la tomate par des rhizobactéries en conditions de stress salin. Cette recherche se déroulera au laboratoire Amar Thelidjy de notre université. Nous nous concentrerons sur l'impact de ces rhizobactéries sur la croissance et la résistance des plants de tomate lorsqu'ils sont exposés à des niveaux élevés de salinité. À travers cette étude, nous visons à comprendre les mécanismes d'interaction entre les rhizobactéries et les plants, tout en développant des approches susceptibles d'améliorer la croissance de tomates dans des environnements salins.

Notre étude se divise en deux parties. La première, théorique, comprend une revue bibliographique organisée en trois chapitres : le premier chapitre aborde les généralités sur la tomate, le deuxième traite de la salinité, et le troisième est consacré aux rhizobactéries. La deuxième partie présente le matériel et les méthodes utilisées pour étudier l'impact des

rhizobactéries sur le stress salin, ainsi que les résultats obtenus et leur discussion. Enfin, une conclusion clôt ce travail.

Revue bibliographique

Chapitre I

Généralités sur la tomate

I. 1 Généralités sur la tomate

La tomate (*Solanum lycopersicum L.*) est une espèce de plante herbacée de la famille des solanacées sont originaires du nord-ouest de l'Amérique du Sud et sont largement cultivées pour ses fruits. Le terme fait également référence à ce fruit charnu, largement consommé dans de nombreux pays / régions, qu'il soit frais ou modifié. Compte tenu de son importance économique, il fait l'objet de nombreux La recherche scientifique, considérée comme une installation de démonstration pour la recherche Scientifique aux fruits succulents (**Chanforan, 2010**).

I.1.1 Historie et origine de la tomate

La tomate inconnue dans l'ancien monde jusqu'au 16^{ième} siècle, et encore rarement consommées au 19^{ième} siècle. Dans la culture commerciale et les jardins potagers, la tomate est devenue le légume vedette du 20^{ième} siècle. Elle est connue pour sa fraîcheur et constitue la base ou la décoration de divers plats (qu'ils soient crus ou cuits) (**Blancard et al., 2009**).

Elle est utilisée depuis longtemps dans les sauces, notamment en Italie. L'industrie de transformation propose de nombreuses préparations : concentrés, jus, tomates pelées, tomates concassées, etc. En raison de son niveau de consommation relativement élevé, la tomate intervient pour une partie important dans l'apport de vitamines et de minéraux dans l'alimentation (**Blancard et al., 2009**).

L'origine de la tomate est très déroutante Mais probablement le premier La tomate connue pousse à l'état sauvage Ouest de l'Amérique du Sud les Andes sont devenues Pérou, Bolivie, nord du Chili et l'Équateur. Les ancêtres des Incas et les Aztèques ont été les premiers 700, pratiquez la culture de ces enfants fruit de la taille d'une cerise (**France, 2001**).

I.1.2 Classification de la tomate

La tomate est une plante herbacée annuelle sous nos climats. Elle est de la même famille que les pommes de terre, les aubergines, les poivrons... etc. (**Bureaux, 2013**)

Le nom du genre "Lycopersicon" est gréco-latin, ce qui signifie "pêche au loup et La partie "esculentum" du nom final de l'espèce vient du latin, ce qui signifie "comestible".

Cette comestibilité n'a rien à voir avec les feuilles, et cela n'a rien à voir avec les jeunes fruits verts, car ils contiennent des alcaloïdes toxiques (tommatine, solanine). Ceux-ci ont disparu du fruit au cours de mûrissement. (Blancard *et al.*, 2009)

Tableau 1 – Position systématique de la tomate (Cronquist, 1981)

Règne	Plantae
Sous règne	Trachenobionta
Division	Magnoliophyta
Classe	Magnoliopsida
Sous classe	Asteridae
Ordre	Solanales
Famille	Solanaceae
Genre	<i>Solanum</i> ou <i>Lycopersicon</i>
Espèce	<i>Lycopersicon esculentum</i> Mill (Cronquist, 1981)

I.1.3 Description de la tomate

C'est une espèce annuelle buissonnante, poilue et aux tiges plutôt grimpantes. Elle est diploïde avec $2n = 24$ (GUY, 1967). La taille est variable entre 40 cm à plus de 5 mètres, selon les variétés et le mode de culture Dumortier *et al.* (2010).

I.1.3.1. Système racinaire

Il est puissant, ramifié, fasciculé et très actif sur les 30 à 40 cm de profondeur. Dans certains cas, les racines peuvent atteindre jusqu'à 1 m de profondeur (Chaux et Foury (1994).

I.1.3.2. Tige

La tige est anguleuse et épaisse en zones d'entre-nœuds, les bourgeons terminaux produisent des fleurs, les rameaux issus des bourgeons axillaires produisent des feuilles à chaque nœud et se terminent par une inflorescence Chaux et Foury (1994). La tige porte deux types de poils, simple et glanduleux. Ces derniers contiennent une huile essentielle responsable d'une odeur spécifique à la plante Kolev (1976).

I.1.3.3. Feuilles et inflorescences

Elles sont alternées et constituées de plusieurs folioles, initialement terminales. Elles se trouvent ensuite repoussées latéralement par un rejet axillaire qui poursuivent leurs développements jusqu'à ce que de nouvelles inflorescences se forment Kasdi (1989).

I.1.3.4. Fleurs

Elles sont hermaphrodites disposées en solitaire ou en grappe (inflorescence cymeuse), ayant un diamètre de 1,5 à 2 cm. La formule florale est : 5S (sépales) + 5P (pétales) + 5E (étamines) + 2C (carpelles). Le calice est gomosépale ayant un tube court et poilu et la corolle est gamopétale Martin (2019).

I.1.3.5. Fruits

Le fruit est une baie de taille, de forme (sphérique, oblongue, allongée) et de couleurs (blanches, rose, rouge, jaune, orange, verte, noire) très variables selon les variétés Renaud (2003). La paroi de l'ovaire évolue en péricarpe charnu et délimite des loges, dont le nombre varie des variétés Grasselly *et al*, (2000).

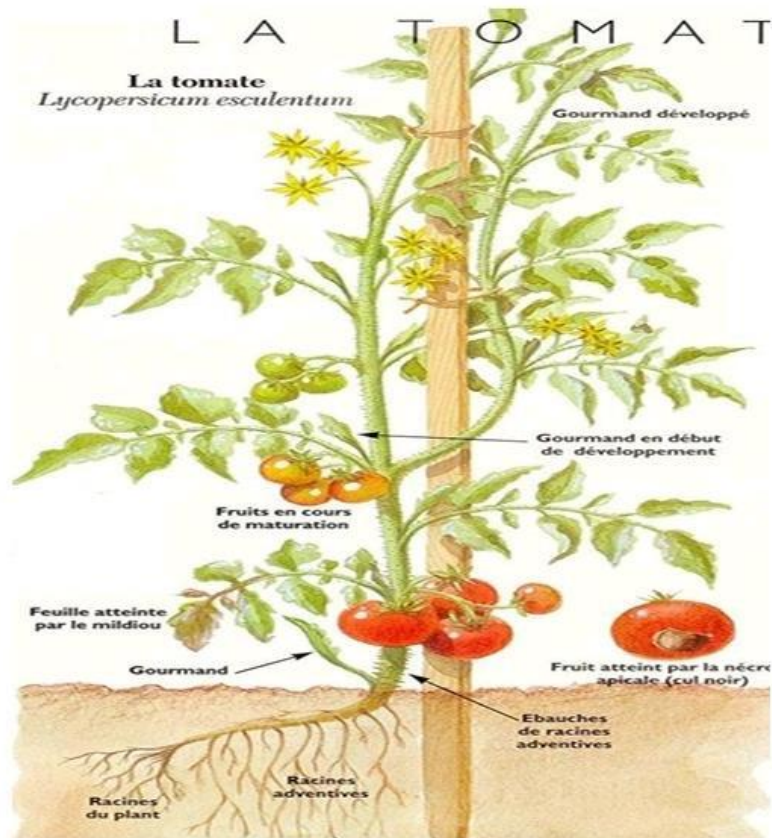


Figure 01 : Schéma d'un plant de tomate

I.1.4. Classification génétique

La tomate est une plante climatérique, diploïde à $2n=24$ chromosomes (Judd *et al.*, 2002), Chez laquelle il existe de très nombreux mutants monogéniques, dont certains sont très importants pour la sélection. Sa carte chromosomique compte actuellement 235 gènes localisés avec précision (Gallais et Bannerot, 1992) .

Selon le mode de fécondation, on distingue deux types de variétés de tomate :

I.1.4.1- Variétés fixées

Les variétés végétales se distinguent par leur effet d'hétérosis, un phénomène qui favorise la combinaison de gènes avantageux. Cet effet conduit à une résistance accrue aux

maladies, ainsi qu'à une amélioration de la nouaison, surtout dans des conditions difficiles (Polèse, 2007).

I.1.4.2- Variétés hybrides

Les variétés hybrides sont variées et possèdent la capacité de combiner plusieurs traits agronomiques appréciables, tels qu'une bonne précocité, une résistance aux maladies et aux ravageurs, ainsi que de hauts rendements. Toutefois, ces hybrides ne peuvent pas être multipliés, car leurs caractéristiques se dégradent avec la descendance (Polèse, 2007).

1.2 Les exigences pédo-climatiques de la tomate

I.2.1. Les exigences climatiques

La tomate est une plante d'origine tropicale, elle présente des exigences particulières : sensible au froid, craint beaucoup le gel et les vents chauds et très exigeante en température (Tikarrouchine, 2009).

1.3.1. 1 Température

La culture de la tomate exige une température minimale et une exposition au soleil. Cette plante est sensible au froid, particulièrement en dessous de 2 °C. Cependant, les nouvelles variétés hybrides montrent une plus grande tolérance à des températures variées (Polèse, 2007). Les semences germent lorsque les températures se situent entre 14 °C et 40°C (ITDAS, 2005 in Cherboub, 2008).

La température est le principal facteur déterminant pour le développement entre 22°C et 28°C (Shanakra, 2005).

1.3.1. 2 La Lumière

La lumière constitue un facteur écologique essentiel, jouant un rôle clé dans divers processus physiologiques, notamment la photosynthèse (Belaid, 2016). Les besoins en lumière de la tomate sont également très élevés. Bien que cette culture soit neutre en ce qui concerne la photopériode, elle nécessite une importante quantité d'énergie lumineuse, en particulier pour l'initiation florale (Philouze et Hedde, 1993).

1.3.1. 3 L'humidité

L'humidité de l'air est généralement exprimée en termes d'humidité relative ou de degré de saturation. Elle joue un rôle déterminant dans la transpiration et les échanges gazeux des plantes. Il est particulièrement important de veiller à un niveau adéquat d'humidité lors de la période de floraison (ITDAS, in Cherboub, 2008).

1.3.1. 4 Structure du sol

La tomate se cultive dans une grande variété de sols, allant des terrains alluviaux aux terres argileuses plus lourdes. Toutefois, les sols légers, perméables, meubles et riches en humus lui conviennent particulièrement bien. Ce facteur est particulièrement crucial pour les cultures primeur. En effet, les cultures précoces tirent avantage des sols qui s'échauffent rapidement au printemps (Heuvelink, 2005).

Pour assurer une bonne récolte, il est donc essentiel de choisir le bon type de sol. Un sol léger et bien aéré favorise non seulement la croissance des racines, mais permet également un meilleur drainage, ce qui est vital pour éviter l'excès d'eau qui pourrait nuire à la plante. Dans cette optique, la composition du sol joue un rôle clé dans la réussite de la culture de la tomate

1.3.1. 5 Le pH

La tomate se développe de manière optimale dans des sols dont le pH se situe entre 5,5 et 6,8, où l'approvisionnement en éléments nutritifs est adéquat et suffisant (Shankara, 2005). Bien que le rendement varie peu avec les fluctuations du pH, elle peut également être cultivée sur des sols à pH basique, ces derniers étant largement présents en Algérie (Cherboub, 2008).

Cette flexibilité quant au pH des sols élargit les possibilités de culture de la tomate dans diverses régions, tout en soulignant l'importance d'une gestion adéquate des nutriments pour assurer une production optimale. En tenant compte de ces facteurs, les agriculteurs peuvent améliorer significativement leurs rendements.

1.3.1. 6 la salinité

La tomate est classée comme une plante à tolérance modérée à la salinité. Lorsque la conductivité électrique (CE) atteint 2,5 g/l de sels totaux, le rendement des cultures diminue de 10 %. Cette salinité affecte particulièrement le rendement destiné à l'export, car elle entraîne une réduction du calibre des fruits (ITDAS, 2006, in Cherboub, 2008).

1.3.1. 7 Les besoins hydriques

La tomate est une plante sensible à la fois au déficit hydrique et à l'excès d'eau. Ses besoins en eau varient selon le stade de développement, ce qui rend indispensable un suivi rigoureux de l'irrigation. Une gestion appropriée de l'eau est cruciale pour garantir une croissance optimale et un rendement satisfaisant des cultures.

- De la plantation à la floraison, la tomate nécessite une grande quantité d'eau, bien que la phase de croissance soit relativement lente.
- Pendant la période de floraison jusqu'à la maturation, les besoins en eau diminuent, et la plante entre dans une phase de croissance rapide.
- En fin de récolte, lors de la phase de vieillissement, les besoins en eau deviennent faibles (ITDAS, 2006 in Cherboub, 2008).

1.3.1. 8 La fertilisation

La tomate est considérée comme une espèce nécessitant de nombreux éléments fertilisants. La fumure organique seule ne suffit pas à satisfaire ses besoins nutritionnels. Elle requiert des apports en azote, phosphore, potassium (K⁺), fer (Fe), manganèse (Mn), molybdène (Mo), cuivre (Cu) et zinc (Zn). Les oligo-éléments doivent être apportés soit par application foliaire, soit par fertigation (Cherboub, 2008).

1.2.3. Les bienfaits de la tomate

La couleur rouge de la tomate est due au lycopène, qui protège les cellules des attaques radiculaires, et au bêta-carotène, un antioxydant majeur qui joue un rôle dans la prévention de nombreux cancers et maladies cardiovasculaires. La tomate est excellente pour

le foie et pour éliminer les mauvaises graisses. Riche en vitamine C, elle contribue à une meilleure assimilation du fer et du calcium. De plus, sa richesse en potassium aide à diminuer l'hypertension. Peu calorique et riche en vitamine B, la tomate participe également à donner un teint éclatant (Abraoui, 2016).

I.2.4. L'importance économique de la culture de tomate

La tomate est une plante à grande échelle cultivée tant en plein champ qu'en serre, avec une superficie d'environ 3 millions d'hectares à l'échelle mondiale. Cela représente près d'un tiers des terres dédiées aux légumes. En plus de sa consommation fraîche, la tomate a permis le développement d'une industrie de transformation significative, produisant des articles tels que le concentré, les sauces (y compris le ketchup), les jus et les conserves (Xavier, 2021).

Concernant l'Algérie, une analyse des données de la filière tomate, associée aux statistiques douanières des pays exportateurs de produits dérivés de tomate, met en lumière une tendance intéressante : ces dernières années, l'Algérie a considérablement réduit ses importations de concentré de tomate. Notamment, les données montrent une quasi élimination de ces importations durant les saisons 2019/2020 et 2020/2021.

Cette dynamique s'inscrit dans le cadre d'une politique de développement national axée sur l'amélioration de la production locale. En 2021, la production de tomates en Algérie a atteint environ 23 millions de quintaux, soit 2,5 millions de tonnes métriques. D'après les statistiques de cette même année, cinq principaux pôles de production ont été identifiés : Annaba, Skikda, Guelma, El Tarf et Ain Defla (Xavier, 2021).

Ces chiffres reflètent les efforts déployés pour renforcer l'autosuffisance alimentaire du pays et réduire la dépendance aux importations. Le développement de l'agriculture et de la transformation agricole en Algérie semble donc porter ses fruits, en améliorant non seulement l'offre locale, mais aussi en créant des opportunités économiques pour les agriculteurs et l'industrie.

L'essor de la culture de la tomate en Algérie est le résultat d'une stratégie nationale bien orientée, visant à renforcer la production locale et à s'inscrire dans un cadre de développement durable. Cette évolution contribue à la sécurité alimentaire et à la dynamique économique du pays, tout en permettant de répondre à la demande croissante des consommateurs.

Chapitre II

La salinité

I.2 La salinité

I.2.1 Définition

La salinité des sols est caractérisée par une forte concentration de sels solubles, qui peut affecter la croissance des plantes. Un sol est classé comme salin lorsque la conductivité électrique (CE) d'un extrait de pâte saturée à 25 °C est égale ou supérieure à 4 dS/m, ce qui correspond à environ 40 mM de NaCl et génère une pression osmotique approximative de 0,2 MPa (Arbaoui, 201). Cette classification, basée sur la CE, indique que la salinité peut réduire considérablement le rendement de la plupart des espèces cultivées.

La salinité est étroitement liée aux cations tels que Sodium (Na^+), Calcium (Ca^{2+}) et Magnésium (Mg^{2+}), tandis que les anions comme Chlorure (Cl^-), Sulfate (SO_4^{2-}) et Bicarbonate (HCO_3^-) contribuent également à la salinité du sol (Soil Taxonomy, 2010). Le NaCl est souvent considéré comme le sel le plus problématique, car des concentrations élevées de Na^+ et Cl^- peuvent être toxiques pour les plantes (Kaewmanee *et al.*, 2013).

La salinité des sols représente l'un des principaux stress abiotiques limitant la croissance des plantes cultivées (Cheikh *et al.*, 2020). Actuellement, sur 1,5 milliard d'hectares de terres cultivées à l'échelle mondiale, environ 77 millions d'hectares (5 %) sont affectés par une teneur excessive en sels (Tamba *et Faye*, 2017). Ce phénomène est particulièrement courant dans de nombreuses zones arides et semi-arides, notamment dans le bassin méditerranéen (Hamdoud, 2012).

I.2.2 Classification des sols Salins

La classification des sols, en réponse aux phénomènes écologiques observés dans les zones arides et semi-arides, repose sur l'analyse de leurs propriétés physico-chimiques. En 1955, le Département de l'Agriculture des États-Unis (USDA) a élaboré un système de classification qui permet de catégoriser les sols en fonction de leur salinité et de leur teneur en sodium. Ce système distingue trois grandes catégories :

II.1.2.1 Sols Salins

Ces sols possèdent une concentration élevée de sels solubles, mais sans excès de sodium. Ils montrent une conductivité électrique élevée et peuvent affecter négativement la croissance des plantes en raison de l'osmolarité, sans causer de toxicité due au sodium (Constantine, Sétif Bordj Bou Arredj) (USDA 1955).

II.1.2.2 Les Sols Salins-Alcalins

Les sols salins-alcalins se caractérisent par une conductivité électrique (CE) dépassant 4 dS/m ainsi qu'un taux de sodium échangeable supérieur à 13 %. Cette concentration élevée en sodium échangeable est suffisamment problématique pour inhiber la croissance des plantes cultivées. Ces types de sols sont principalement présents dans la région de Relizane, notamment dans la plaine de Mina. L'impact de leur salinité et alcalinité nécessite des stratégies de gestion adaptées pour améliorer leur productivité agricole (USDA, 1955).

II.1.2.3 Les Sols Alcalins

Les sols alcalins se caractérisent par une conductivité électrique (CE) inférieure à 4 dS/m et un taux de sodium échangeable supérieur à 13. Ces sols sont riches en sodium échangeable et se rencontrent principalement dans les régions steppiques et les hauts plateaux (USDA, 1955).

Selon Darwish *et al.* (2005), la salinité naturelle, ou primaire, est la plus courante et largement répandue, tandis que la salinité secondaire, causée par l'érosion ou l'irrigation, continue de croître. En dehors de la salinité naturelle, une part significative des terres agricoles cultivées est devenue saline en raison du défrichement et de l'irrigation, qui augmentent la concentration de sels dans la zone racinaire (Seeling, 2009). La majorité des cultures sont sensibles à la salinité générée par de fortes concentrations de sels dans le sol. Les facteurs physico-chimiques, tels que la texture du sol et la salinité, représentent les influences les plus significatives sur la variabilité du rendement, en dehors des conditions climatiques (Kausar *et al.*, 2014).

I.2.3 Le Stress

I.2.3.1 Définition

Le stress est défini comme un ensemble de réactions physiologiques déclenchées par diverses agressions extérieures, telles que la sécheresse, le froid, la salinité, etc....

I.2.3.2. Les différents types de stress

II.2.2. 1 Stress biotique

Ces agents nuisibles, tels que les virus, les organismes phytophages et les pathogènes, sont variés. Pour s'en protéger, la plante active un mécanisme de défense élaboré qui déclenche une série de réactions. Les protéines défensives produites par la plante agissent comme une barrière contre ces menaces (**Shilpi et Narendra, 2005**).

II.2.2. 2 Stress abiotique

Les scientifiques utilisent le terme "stress" pour désigner tout facteur environnemental susceptible d'être nuisible aux organismes vivants. Au niveau cellulaire, le stress résulte de la variation d'un paramètre environnemental, entraînant l'activation de mécanismes permettant de réguler l'homéostasie. Ainsi, le stress fait référence tant à l'action d'un agent nocif qu'aux réactions qu'il provoque chez l'organisme affecté. Il représente une force qui tend à perturber les systèmes normaux (figure. 2), (**Roeder, 2006**), ou encore une condition non optimale qui modifie l'équilibre des fonctions d'un organisme en raison d'un facteur perturbateur (**Orcutt et al., 2011**).

Parmi les conditions environnementales susceptibles de provoquer un stress abiotique, on trouve les inondations, la sécheresse, les températures extrêmes, ainsi que la salinité excessive des sols ou des eaux. De plus, la présence de minéraux inadaptés dans le sol, comme les métaux lourds, peut également être problématique. Un excès de lumière peut quant à lui entraîner un phénomène de photo-inhibition (**Shilpi et Narendra, 2005**).

Parmi ces conditions, la sécheresse, le froid et la salinité sont les types de stress les plus courants et les plus étudiés. Ils peuvent induire des modifications métaboliques, physiologiques et phénologiques chez les plantes (**Shabala et al., 2012**).

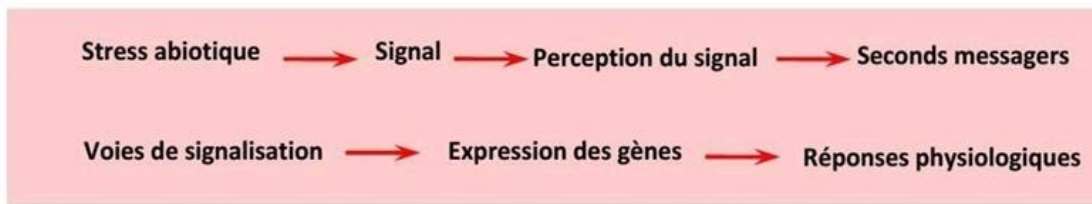


Figure 2: La voie de transduction d'un signal de réponse à un stress abiotique chez la plante (Roeder, 2006).

I.2.4 Effet de la salinité sur le développement des plante

Un grand nombre d'études ont mis en évidence la réponse des plantes à un environnement salin (Kausar *et al.*, 2014). De plus, la sensibilité d'une espèce au stress salin varie au cours de son développement. Il est bien établi que le comportement d'une plante diffère selon que la salinité du milieu extérieur est maintenue constante, augmente de manière continue ou fluctue (El-Hendawy *et al.*, 2011).

La salinisation progressive des sols constitue un facteur limitant majeur pour la productivité agricole, en particulier dans les régions tropicales et méditerranéennes. Contrairement aux halophytes, qui sont naturellement tolérants aux sels (le NaCl étant généralement le principal), la plupart des espèces d'intérêt agronomique appartiennent au groupe des glycophytes, dont la croissance est affectée par la présence de sel. La tolérance au sel varie selon les familles, les genres et les espèces des plantes. Pour définir des pratiques culturales permettant de surmonter ce stress et pour créer des variétés tolérantes au sel, il est essentiel de mener des études physiologiques, biochimiques, moléculaires et génétiques (Levigneron *et al.*, 2015).

Les effets de la salinité sur le développement et le rendement des plantes sont nombreux et souvent difficiles à classer. Les ions de chlorure de sodium pénètrent dans les plantes par les racines et sont transportés par le xylème jusqu'aux tiges et aux feuilles. Là, ils peuvent être soit stockés (dans le cas des plantes de type "inclure"), soit peu retenus et renvoyés vers les racines via le phloème (pour les plantes de type "exclure"). L'accumulation de sel dans l'espace intercellulaire des parties aériennes des végétaux est responsable de la nécrose et de la mort cellulaire (Levigneron *et al.*, 2015).

I.2.5 Effet de la salinité sur la germination

Selon les recherches de Daroui *et al.* (2012) sur *Washingtonia filifera* L. et de Ndiaye *et al.* (2014) sur *Gossypium hirsutum* L., il a été montré que les graines de ces espèces parviennent à germer même en présence d'une contrainte saline. Certaines études ont indiqué qu'en l'absence de stress salin, plus de 75 % des graines germent dans les dix premiers jours, tandis que ce chiffre tombe à seulement 25 % en situation de stress salin durant la même période. En conséquence, le taux de germination diminue de 50 % sous l'effet du stress salin, et ce taux de germination décroît à mesure que le niveau de salinité augmente (Elhadji *et al.*, 2019).

I. 2.6- Effet de la salinité sur le développement de la tomate

La tomate, *Solanum lycopersicum*, est l'un des fruits les plus consommés dans le monde et joue un rôle essentiel dans l'alimentation humaine (Manaa *et al.*, 2014).

Cette espèce est fréquemment soumise à diverses contraintes environnementales. Parmi celles-ci, la salinité se distingue comme un des principaux facteurs influençant la croissance de la plante et le rendement en fruits dans de nombreuses régions à travers le monde (Shabala, 2012).

La salinité constitue un stress complexe qui impacte tous les stades de développement de la plante, de la germination à la maturation des fruits. Lorsqu'une plante est soumise au stress salin, elle subit, à divers niveaux, des perturbations dans l'ensemble de sa physiologie. Cela affecte sa nutrition minérale, la régulation de son statut hydrique, la gestion des stress oxydatifs secondaires, son équilibre hormonal et son activité photosynthétique (Shabala, 2012).

Le développement de nouvelles variétés de tomates plus résistantes au stress salin est une priorité. Cela nécessite une approche complexe de génétique quantitative, intégrant l'analyse de QTL (Quantitative Trait Loci) et, si besoin, des croisements interspécifiques avec des espèces sauvages apparentées qui possèdent des caractéristiques halophyties (Benazzouk, 2018).

I.2.7. Effet de salinité sur la germination des tomates

Selon Badaoui (2018), la vitesse et la cinétique de germination des graines de tomates sont dégradées par des concentrations de salinité ; lorsque la concentration de chlorure de sodium atteint ou dépasse 8 g/L, la germination devient presque impossible.

De son côté, Arbaoui (2016) souligne qu'au stade de germination, la tomate se comporte comme une plante moyennement tolérante à la salinité. Les expériences réalisées ont démontré que les phytohormones jouent un rôle crucial dans la réponse des plantes au stress salin. En particulier, l'application d'acide salicylique et d'acide gibbérellique a amélioré la capacité des graines de tomate à germer dans des conditions salines.

I.2. 8. L'incidence de la salinité sur la florescence chlorophyllienne des tomates

Le stress salin affecte la croissance des plantes par divers aspects du métabolisme, notamment l'absorption et la distribution des éléments nutritifs, ainsi que l'altération de la photosynthèse et de la respiration, ainsi que la synthèse des protéines. La chlorophylle des feuilles est influencée par plusieurs facteurs, tels que l'âge et la position des feuilles, ainsi que par des éléments environnementaux comme la lumière, la température et la disponibilité en eau (**Hikosaka *et al.*, 2006**). Des études ont démontré que les concentrations de chlorophylle a, chlorophylle b et chlorophylle totale étaient significativement réduites sous l'effet du stress salin (**Denden *et al.*, 2008**).

Chapitre III

Les rhizobactéries

III. 3.1-Généralité sur la rhizosphère

Le terme "rhizosphère", dérivant des mots grecs "rhiza" (racine) et "sphaira" (sphère), a été introduit en 1904 par le chercheur allemand Hiltner. Il désigne la zone du sol entourant la racine, qui est influencée directement ou indirectement par celle-ci. La rhizosphère peut être considérée comme une partie cachée du système racinaire, lui-même souvent difficile à cerner. Cette région se distingue par sa richesse en nutriments par rapport au sol découvert, en raison de l'accumulation d'exsudats racinaires variés, tels que des acides aminés et des sucres, qui servent de sources d'énergie et de nutriments pour les bactéries présentes dans le sol (**Gray et Smith, 2005**).

La rhizosphère est une zone du sol caractérisée par une concentration élevée de gaz carbonique et une faible teneur en oxygène dissous. En conséquence, elle constitue un environnement réducteur propice au développement d'activités de dénitrification, qui transforment les ions nitrates en oxydes d'azote, voire en ammoniac. Ce phénomène joue un rôle significatif dans la modification des propriétés du sol, notamment en matière de caractéristiques biologiques, de biodiversité, d'activités microbiennes, ainsi que de fertilité et de qualité du sol (**Gobat *et al.*, 2003**).

Les caractéristiques physico-chimiques et biologiques de la rhizosphère se distinguent clairement de celles d'un sol cultivé ou non cultivé (**Morgan *et al.*, 2005 ; Cregut, 2009**). En effet, la rhizosphère représente un habitat dont les limites sont ambiguës, établissant un gradient microbiologique et physico-chimique. Ce gradient s'étend depuis la racine elle-même jusqu'à une distance variable, généralement comprise entre 1 et 5 mm, au-delà de laquelle l'effet rhizosphérique commence à diminuer.

D'après Schroder et Hartmann (2003), cette zone d'interaction se divise en trois zones distinctes (**figure 2**) : l'endorhizosphère, qui se situe à l'intérieur de la racine, le rhizoplan, qui correspond à la surface de la racine, et l'ectorhizosphère, également appelée sol rhizosphérique, qui désigne le sol directement lié à la racine, en opposition à celui qui est distant :

III.1.1 L'endorhizosphère

Certaines bactéries vivent au contact direct de la racine, voire même pénètrent dans les tissus rhizodermiques et corticaux, sans pour autant être parasites ou prédatrices. Ceci souligne le fait que l'interface entre la racine et la microflore s'étend à l'intérieur de la racine

III.1.2 Le rhizoplan

Le rhizoplan (RP), désigne la surface racinaire et les bactéries qui y sont fortement adhérentes.

III.1.3 L'ectorhizosphère

Représente la zone extérieure qui se trouve directement après le rhizoplan

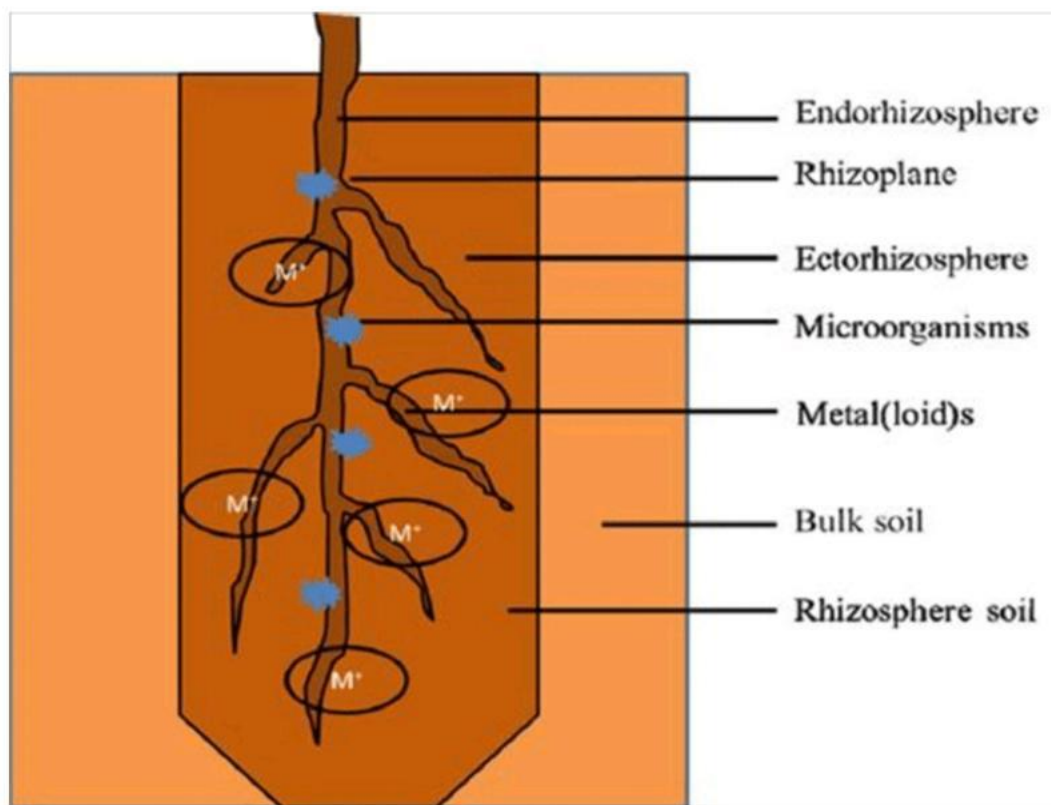


Figure 03 : Représentation schématique de la rhizosphère (Sheshadri *et al.*, 2015)

III.3. 2-Activités microbiologique de la rhizosphère

La rhizosphère est la zone du sol située à proximité des racines, caractérisée par une intense activité microbiologique. Cet environnement écologique dynamique favorise les interactions entre les microorganismes et les plantes, facilitant l'exploitation des micro et macronutriments disponibles en quantités limitées (**Gholami *et al.*, 2012**). De plus, la rhizosphère se distingue par un volume élevé de substances racinaires, qui soutiennent une population microbienne abondante (**Miransari, 2011**).

La microflore du sol comprend une variété de microorganismes, tels que différents genres de bactéries fixatrices d'azote, des mycorhizes, des champignons, des algues et des protozoaires. Ces organismes jouent un rôle crucial dans la stimulation de la croissance des plantes en fournissant des éléments nutritifs et en protégeant contre les pathogènes environnants (**Amarger, 2002**) (**figure 03**).

La rhizosphère est divisée en trois principales composantes interconnectées : la rhizosphère du sol, le rhizoplan et les racines. La rhizosphère du sol désigne la zone du sol affectée par les racines en raison de la libération de substances qui modulent l'activité microbiologique (**Barea *et al.*, 2005**). Au cours de leur développement, les racines libèrent activement ou passivement divers composés organiques, principalement des sucres tels que le galactose, le glucose, le fucose, le mannose, le xylose et l'arabinose, ainsi que des acides carboxyliques et des acides aminés (**Chaboud, 1983**).

La deuxième composante, le rhizoplan, est la surface des racines, comprenant les particules de sol qui s'y accrochent (**Barea *et al.*, 2005**). De nombreuses études ont montré que les microorganismes du sol interagissent avec les racines et les éléments du sol à l'interface entre ces racines et le sol (**Barea *et al.* 2002; Bowen et Rovira, 1999; Glick, 1995**). Enfin, les racines forment une partie intégrante du système puisque certains microorganismes, appelés endophytes, peuvent coloniser leurs tissus (**Bowen et Rovira, 1999; Kennedy, 1998**) et influencer sur leur croissance.

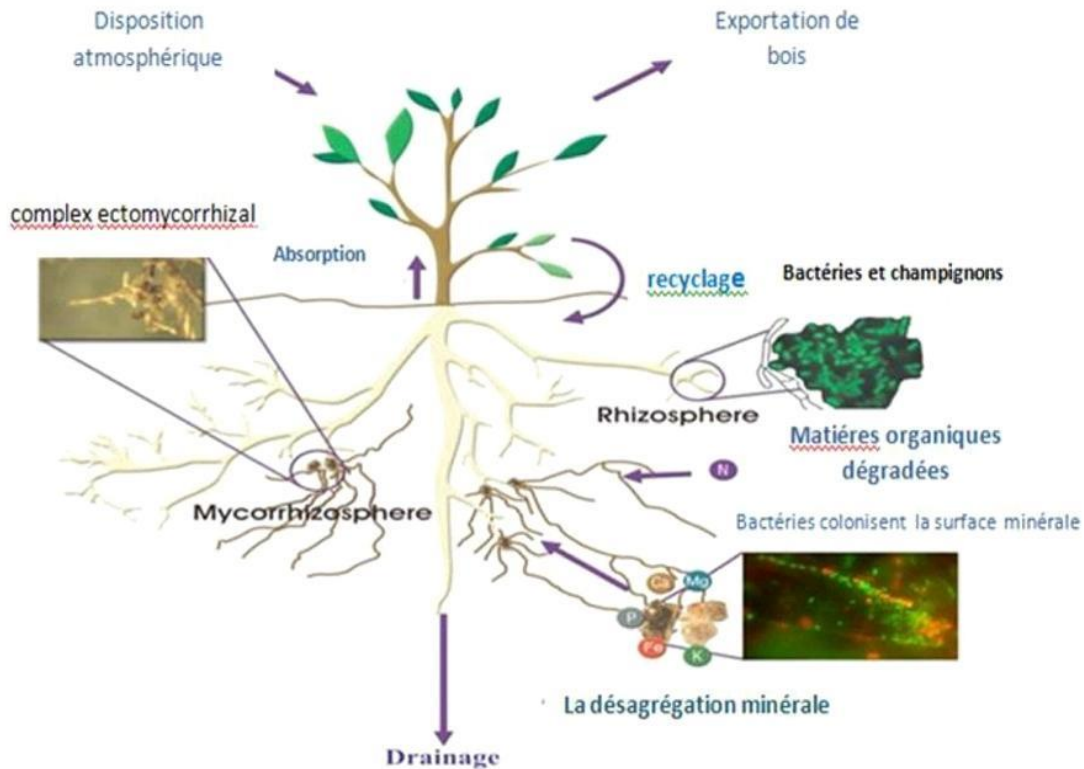


Figure 04 : Activité microbiologique de la rhizosphère (Vittorio et Christoph, 2016)

III.3. 2.1- la flore de la rhizosphère

La rhizosphère est un milieu dynamique et structuré, riche en biodiversité. Elle abrite une multitude de microorganismes qui interagissent de diverses manières avec les plantes. Ces microorganismes forment des communautés complexes, où des interactions variées ont lieu non seulement entre les organismes et les racines des plantes, mais aussi entre les microorganismes eux-mêmes (Wardle *et al.*, 2004). Cela crée un réseau d'interactions qui influence la santé des plantes et le fonctionnement des écosystèmes, illustrant ainsi la complexité de cet environnement unique (Figure 05).

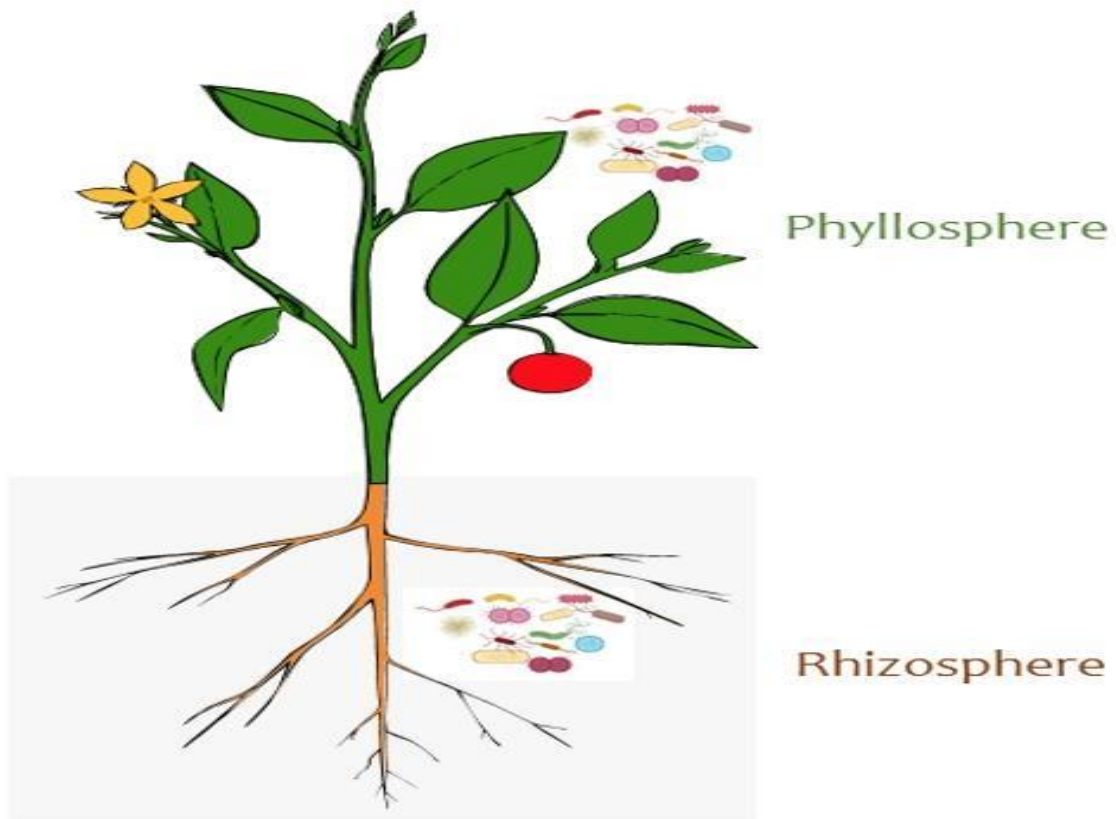


Figure 05 : Présentation schématique de la flore de la rhizosphère

La rhizosphère est naturellement colonisée par les microbes qui sont :

III.1.2.1 Les champignons

Les champignons mycorhiziens de type arbusculaire (AMF : Arbuscular Mycorrhizal Fungi) représentent le groupe le plus significatif au sein de la rhizosphère. Ils forment des associations symbiotiques avec les racines des plantes, facilitant ainsi l'absorption de divers éléments nutritifs. Parmi ces éléments, le phosphore est particulièrement notable, car il est transporté le long des hyphes des champignons et délivré à la plante hôte. En plus de cette fonction nutritive, les interactions avec les mycorhizes peuvent également renforcer les mécanismes de défense des plantes, les rendant plus résistantes aux parasites et aux pathogènes (Clémentine, 2013).

III.1.2.2 Les actinomycètes

Les actinomycètes forment un ordre de bactéries filamenteuses, septées et ramifiées (Larpent *et al.*, 1989). En parallèle, les mycètes sont également présents dans le sol. En effet, tous les sols contiennent une microflore extra-racinaire riche et variée. La biomasse fongique peut considérablement varier, atteignant entre 120 kg/ha et plus d'une tonne dans des sols normaux (Dommergues et Mangenot, 1970). Cette diversité témoigne de l'importance écologique des champignons et des actinomycètes dans les écosystèmes terrestres.

III.1.2.3 Les protozoaires

Le terme protozoaire signifie "premier animal". Ces organismes sont des eucaryotes unicellulaires hétérotrophes, et leur abondance est particulièrement élevée dans les sols humides et riches en matières organiques, atteignant 1 à 2 millions par gramme de terre. Les protozoaires jouent un rôle crucial dans la régulation des populations bactériennes, car ils se nourrissent de ces dernières. En recyclant rapidement une biomasse significative, ils contribuent à la disponibilité des nutriments pour la communauté biologique environnante (Girard *et al.*, 2005).

III.1.2.4 Les Algues

Les algues font partie du règne végétal, mais elles ne forment pas un ensemble homogène. Elles peuvent être libres ou fixées à un support, et leur taille varie considérablement, allant de quelques micromètres à plusieurs dizaines de mètres pour certaines espèces (Egan *et al.*, 2008). Cette diversité morphologique et écologique témoigne de l'adaptabilité des algues à différents environnements.

III.1.2.5 Les bactéries

La communauté bactérienne de la rhizosphère est recrutée à partir des réservoirs de micro-organismes présents dans le sol (Bakker *et al.*, 2013). Les rhizobactéries sont des bactéries capables de coloniser intensément les racines. Les espèces non symbiotiques les plus étudiées incluent *Agrobacterium* sp, *Azospirillum* sp, *Bacillus* sp et *Pseudomonas* sp. Les effets bénéfiques de ces rhizobactéries proviennent de leur position stratégique à l'interface sol-racine. En effet, le rhizoplan et la rhizosphère sont des zones d'échanges intensifs entre la plante et son environnement, favorisant des interactions réciproques (Lemanceau, 1992).

III.3. 2.3- Effet bénéfique de la bactérie

Les rhizobactéries qui favorisent la croissance des plantes, connues sous le terme RFCP, stimulent directement la croissance de celles-ci en augmentant le prélèvement des éléments nutritifs du sol, en induisant et produisant des régulateurs de croissance végétale et en activant les mécanismes de résistance induite chez les végétaux. Les RFCP stimulent indirectement la croissance des végétaux par leur effet antagoniste sur la microflore qui leur est néfaste, en transformant les métabolites toxiques et en stimulant la nodulation des légumineuses par les rhizobia. Les effets antagonistes des RFCP impliquent la production d'antibiotiques et la compétition nutritionnelle avec les pathogènes végétaux. L'établissement de l'association RFCP-plante est primordiale pour l'expression des effets bénéfiques aux plantes. L'utilisation des RFCP marquées avec des gènes de bioluminescence permet de visualiser le processus de colonisation racinaire. Suite à l'apparition des exsudats de la semence, l'inoculum bactérien se multiplie, puis les bactéries sont transportées passivement par la racine en développement, hors de la zone d'influence de la semence. Par la suite, les RFCP continuent de se multiplier grâce aux exsudats racinaires et persistent sur les racines. Plusieurs compagnies développent actuellement des inoculants contenant des RFCP, surtout afin de réduire l'utilisation des pesticides de synthèse en agriculture (C.J. Beauchamp.1993).

III.3. 2.4- Facteurs déterminant la richesse et l'activité de la rhizosphère

Selon Gobat *et al*, 2003 l'activité microbienne dans la rhizosphère est régie :

Les facteurs influençant les écosystèmes peuvent être regroupés en deux grandes catégories.

- D'une part, les facteurs environnementaux climatiques, tels que l'humidité de l'air, la température, la radiation solaire et la teneur en dioxyde de carbone (CO₂), jouent un rôle crucial dans la dynamique des écosystèmes. Ces éléments déterminent les conditions de croissance, la photosynthèse et le développement des plantes.

- D'autre part, les facteurs édaphiques concernent les caractéristiques du sol. Parmi eux, on trouve la teneur en eau et en oxygène du sol, sa température, ainsi que la disponibilité des éléments nutritifs assimilables par les plantes. De plus, la présence de composés phytotoxiques peut entraîner des effets néfastes sur la croissance et la santé des végétaux.

- Par des échanges de « molécules signal entre les racines des plantes et les microorganismes qui leur sont associés » (champignons, bactéries, cyanobactéries...). Mais quand il y a par exemple une symbiose associative entre les PGPR et une plante, le rôle et l'importance de ces molécules est encore mal connue. Les signaux rhizosphériques influent sur l'expression génique « épigénétique ». Ils sont souvent « phytobénéfiques » en améliorant par exemple l'architecture, la croissance et le fonctionnement du système racinaire.

Partie expérimentale

Matériel et Méthodes

Le présent travail a été réalisé aux laboratoires de l'Université Amar Telidji à Laghouat, au sein de la Faculté des Sciences, Département des Sciences Agronomiques. L'objectif principal de cet expérimentation est de mettre en évidence l'effet bénéfique des rhizobactéries sur la croissance de la tomate (*Solanum Lycopersicum L.*) sous stress salin.

L'expérimentation a été conduite en deux essais, le premier consiste à étudier la tolérance de certain rhizobactéries aux NaCl, le deuxième essai vise la phytostimulation de la tomate par rhizobactéries *in vivo*, il a été conduit dans la tourbe en pot irrigué par l'eau salé.

II-1 Matériel biologique

II-1-1 Matériel végétal

Le matériel végétal utilisé dans le présent travail est constitué de plants de Itomate (*Solanum Lycopersicum L.*) Variété traité. importé de la chine fournie par PANG'S SEED. C'est des graines hybride F1 de variété ELMASSA, récoltées en 2022 traitées par Metalexil Mancozeb, leurs taux de germination sont de 92% selon le fournisseur.

II-1-2 Matériel bactériens

Dans la présente étude, nous avons utilisé trois isolats bacteriennes (B4 /B9/R2) qui ont été isolés et identifiés dans les laboratoires des sciences agronomiques à l'université Amar Telidji. Laghouat. Ces isolats ont été réactivées sur le milieu de culture GN et incubées à 28°C.

II-2 Essai de tolerance des isoltats bacterians au NaCl

Pour évaluer la tolérance des rhizobactéries au sel soit NaCl, un test de croissance en présence de différentes concentrations de NaCl a ete réalisé. Nous avons utilisé le milieu de culture GN additione de concentrations variées de NaCl, soit 0 ; 2; 5; 7; 10 et 15 %. Les cultures bactériennes, jeunes agées de 24 heures cultivées préalablement en milieu GN sont inoculées dans ces milieux salins. Après un temps d'incubation de 24 à 48 heures à 30°C, Nous avons observé et noté la croissance bactérienne sur les différents milieux. Les résultats permettent d'évaluer la tolérance au sel des bactéries : une croissance normale dans des

concentrations élevées indique une haute tolérance, tandis qu'une croissance réduite ou absente à des concentrations plus faibles révèle une faible tolérance. Ce test est crucial pour comprendre la capacité des bactéries à survivre dans des environnements salins, et de sélectionner les plus performantes pour des implications dans des essais ultérieurs.

II-3 Biostimulation de la croissance de la tomate sous stress salin

II-3-1 Préparation suspension bactérien

La préparation de la suspension bactérienne des isolats rhizobactériens a été réalisée à partir d'une culture bactérienne jeune, cultivée sur milieu GN pendant 24 heures. Les colonies bactériennes ont été raclées et mises dans des flacons contenant de l'eau distillée stérile. Nous avons ajusté l'inoculum bactérien à une concentration d'environ 10^8 cellules/mL

II-3-2 Bactérisation du substrat

La bactérisation du substrat par les trois suspensions bactériennes soit (B9, B4 et R2) a été réalisée et conditionnés en pots 24 h avant la transplantation des plants de tomate, un rappel a été réalisé sept jours après par irrigation à raison de 20 ml/pot. Pour le témoin non bactérisé (TNB) nous avons utilisé l'eau distillée.

II-3-3 Solution saline d'irrigation

La solution saline a été apporté pendant dix jours par irrigation avec de solution saline avec la concentration de 4 ; 8 ; 12 g/l de NaCl dissous dans l'eau minérale , pour le témoin nous avons utilisé que l'eau sans NaCl.

II-3-4 Dispositif expérimental

L'essai biostimulation de la croissance a été conduit en randomisation totale à deux facteurs étudiés et à six répétitions :

- **Facteur 1** : représente la bactérisation avec quatre niveaux soit les isolats bactériens (B9, B4 et R2) le témoin non bactérisé (TNB).

- **Facteur 2** : représente la concentration du facteur stressant soit le NaCl avec quatre niveaux pour le stress salin de 0 ; 4 ; 8 ;12 g/l de NaCl.

Nous avons **16** traitements qui sont :

- **T1, T2, T3, T4** : correspond à une bactérisation par B9 et la concentration respective de 0 ;4 ;8 et 12 g/l de NaCl.
- **T5, T6, T7, T8** : correspond à une bactérisation par B4 et la concentration respective de 0 ;4 ;8 et 12 g/l de NaCl.
- **T9, T10, T11, T12** : correspond à une bactérisation par R2 et la concentration respective de 0 ;4 ;8 et 12 g/l de NaCl.
- **T13, T14, T15, T16** : correspond au témoin non bactérisé et la concentration respective de 0 ;4 ; 8 et 12 g/l de NaCl.

II-3-5 Les paramètres étudiés

L'effet du stress salin sur la tomate a été étudié en évaluant certains paramètres physiologiques et biochimiques.

II. 3-5.1. paramètres morpho- physiologiques

Pour évaluer le seule paramètres physiologique dans notre étude soit la mesure de la teneur relative en eau nous avons procédé à évaluer les paramètres de croissance, des mensurations ont été réalisées portant sur plusieurs critères : le poids frais et le poids sec tant de la partie aérienne que des racines des plantules.

a) Mensuration sur racine

Après dépotage, chaque plant est débarrassé de la tourbe adhérent à la racine, nous avons procédé immédiatement à la pesée pour déterminer le poids frais. Le poids sec a été déterminé pour chaque plant, après séchage à l'étuve pendant quatre jours à une température de 60°C.

b) Mesuration sur la partie aérienne

Après dépotage, nous procédons immédiatement à peser la partie aérienne (tige + feuille), fraîchement coupée au niveau du collet, pour déterminer le poids frais de chaque plant, après séchage à l'étuve pendant quatre jours à une température de 60°C pesée pour déterminer le poids sec.

c) Mesure de la teneur relative en eau (TRE)

Pour évaluer la teneur relative en eau (TRE) des plantes, nous avons utilisé le poids des échantillons frais soit le poids humide initial. Et le poids sec des échantillons après qu'ils atteignent un poids constant. La teneur relative en eau est alors calculée en utilisant la formule suivante :

$$\text{TRE}(\%) = \left\{ \frac{\text{Poids frais} - \text{Poids Sec}}{\text{Poids frais}} \right\} * 100$$

II-3-5-2 Paramètres de biochimie

Pour évaluer les paramètres biochimiques nous avons procédé à l'extraction et dosage de la proline et le phénol.

a) Extraction et dosage de la proline

Le dosage de la proline a été déterminé par la méthode de Troll et Lindsey (1955). Un échantillon de 1g de matière fraîche a été prélevé sur le tiers médian foliaire, et placé dans un tube à essai auquel nous avons ajouté 2 ml de méthanol à 40%. L'échantillon est chauffé, pendant 1 heure dans un bain-marie à 85°C. Après refroidissement, 1 ml de la solution d'extraction est ajouté à 1 ml d'acide acétique, 25 mg de ninhydrine et 1 ml du mélange, 120 ml eau distillée 300 ml acide acétique et 80 ml acide orthophosphorique. L'ensemble est porté à ébullition pendant 30 mn au bain marie. Après refroidissement, nous avons additionné 5 ml de toluène après agitation au vortex et nous avons procédé à la lecture à une longueur d'onde de 528 nm. La proline est exprimée en µg/g de matière fraîche.

b) Extraction et dosage de le phenol

Une quantité définie (100 mg) de tissus végétaux (feuilles et racines) est mélangée à un solvant organique (3ml d'éthanol), afin de réaliser une macération pour extraire les principes actifs. Après 48 heures, 100 μ L d'extraits dilués sont mélangés à 500 μ L de réactif de Folin-Ciocalteu préalablement préparé et dilué 10 fois avec de l'eau distillée (10%). Une quantité de carbonate de sodium (750 μ L) est ensuite ajoutée en concentration définie aux mélanges qui sont agités. Après 10 minute à l'obscurité, La lecture de l'absorbance s'effectue sur une longueur d'onde de 760 nm et la concentration en polyphénols dans les extraits végétaux peut finalement être déterminée (Öksüz *et al.*, 2015).

II-4 Analyse statistique

Les résultats ont été analysés à l'aide du logiciel Stat Box Végétal 6.9 en version d'essai. L'analyse a utilisé une(ANOVA), prenant en compte l'essai aléatoire. Il s'agit d'une analyse à deux facteurs de variation, incorporant la bactérisation et la concentration de NaCl, tant pour les essais réalisés in vitro qu'in vivo. Lorsque l'analyse révélait une variation significative avec un seuil d'erreur de 5 %, elle était complétée par le test de Newman et Keuls. Ce test a permis d'effectuer des comparaisons détaillées des résultats.

Résultats et discussion

III.1 Résultats

Les résultats présentés dans cette partie sont issus des essais effectués sur des graines de tomate pour mettre en évidence l'effet bénéfique des *Pseudomonas* spp. rhizobactéries sur la germination de tomate sous stress abiotiques ; salin .

Les analyses statistiques des résultats ont révélé des différences très hautement significatives pour certains des paramètres étudiés, notamment le taux relatif en eau dans les feuilles et la quantité de proline dans les racines et les feuilles. En revanche, le taux relatif en eau dans les racines et la quantité de phénol ne présentent pas de différences significatives, que ce soit pour le facteur de bactériation, le facteur de concentration de NaCl, ou pour leurs interactions..

III.6 Essai de tolérance des isolats bactériens au NaCl

Dans cet essai, nous avons évalué la tolérance de 33 isolats bactériens d'origine rhizosphérique (B4, B5, B6, B7, B8, B9, B10, B11, B12, B14, B15, B16, B17, B21, B704, B429, B212, B108, O, C, I, H, R2, B, F1, F2, NS1, Az24, T32, P12, Rs21, E.1.0 et E.1.1) à différentes concentrations de NaCl à savoir 0 , 2 , 5 , 7 , 10 et 15 %. (**Figure6**).

L'analyse des données (tableau 2) sur la croissance des bactéries en fonction des concentrations de NaCl montre une réponse variée parmi les différents isolats testés, illustrant leur tolérance à la salinité. À des concentrations faibles de NaCl (0% et 2%), tous les isolats présentent une croissance active, ce qui indique une bonne adaptation aux conditions osmotiques de ces niveaux. En revanche, à partir de 5%, des différences notables émergent : certaines isolats, telles que B8 et B9, commencent à montrer une diminution de la croissance, suggérant qu'elles sont sensibles à l'augmentation de la salinité. À 10%, plusieurs isolats, dont B4 et B5, ne parviennent pas à croître, soulignant leur sensibilité à des niveaux plus élevés de NaCl. À l'inverse, des isolats comme B16 et Rs21 se distinguent par leur capacité à continuer à croître même à des concentrations de 15%, ce qui indique une tolérance élevée au sel et ce qui suggère leur potentiel pour des applications dans des environnements salins.

Tableau 2: représentative les résultats de test tolérance au NaCl

	0%	2%	5%	7%	10%	15%
B4	+	+	+	+	-	-
B5	+	+	+	-	-	-
B6	+	+	+	+	-	-
B7	+	+	+	+	-	-
B8	+	+	-	-	-	-
B9	+	+	+	-	-	-
B10	+	+	+	+	+	-
B11	+	+	+	-	+	+
B12	+	+	-	+	-	-
B14	+	+	+	+	-	-
B15	+	+	+	+	-	+
B16	+	+	+	+	+	+
B17	+	+	-	+	-	-
B21	+	+	-	-	-	-
O	+	+	-	-	-	-
C	+	+	+	-	-	-
I	+	+	+	+	-	-
H	+	+	-	-	-	+
R2	+	+	+	-	-	+
B	+	+	+	-	-	-
F1	+	+	-	-	-	-
F2	+	+	-	-	-	-
NS1	+	+	-	+	-	-
Az24	+	+	-	+	+	-
T32	+	+	-	+	+	-
P12	+	+	-	+	-	-
B212	+	+	+	+	-	-
B429	+	+	-	+	-	-
Rs21	+	+	+	+	-	-
B108	+	+	-	-	-	-
B704	+	+	-	-	-	-
E.10	+	+	-	+	-	-
E.11	+	+	-	+	-	-

(+) : Croissance des bactéries

(-) : Aucune Croissance de bactéries

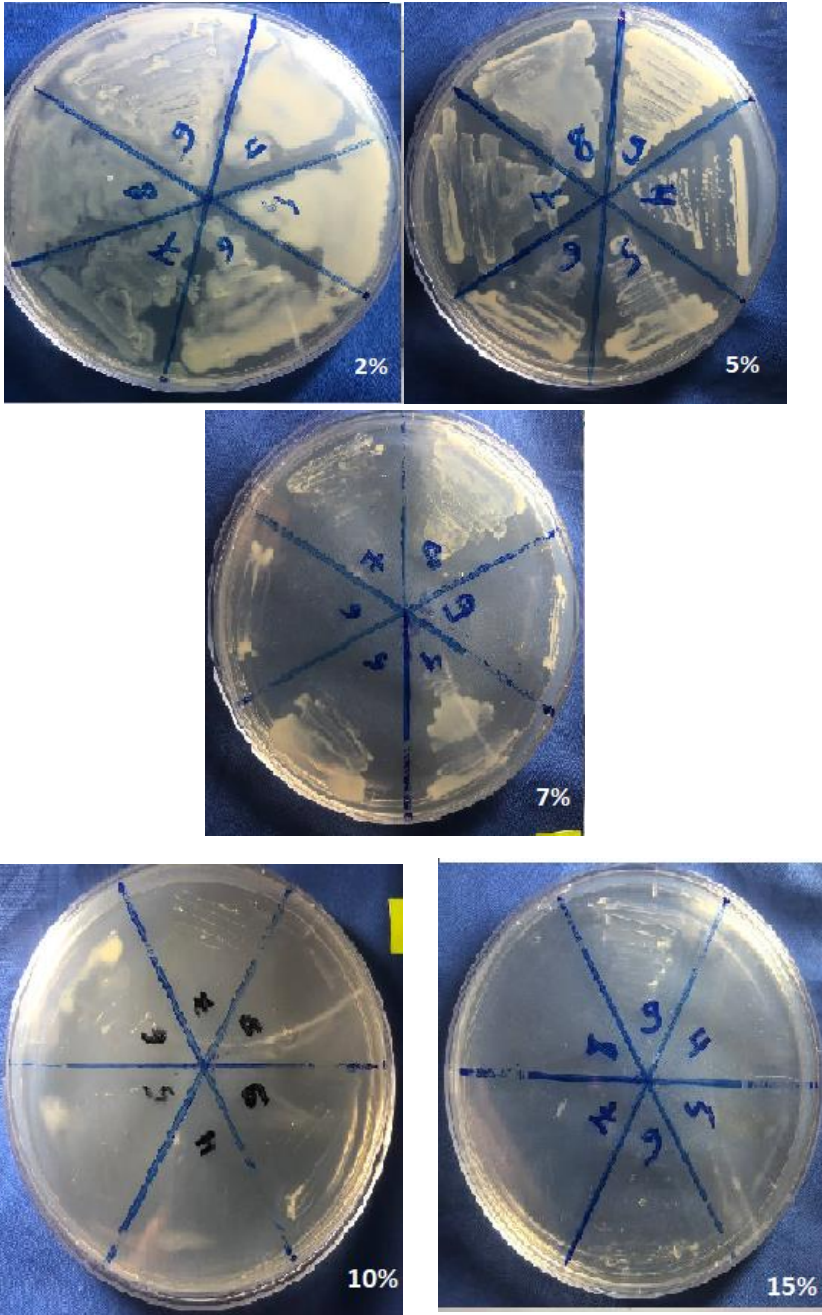
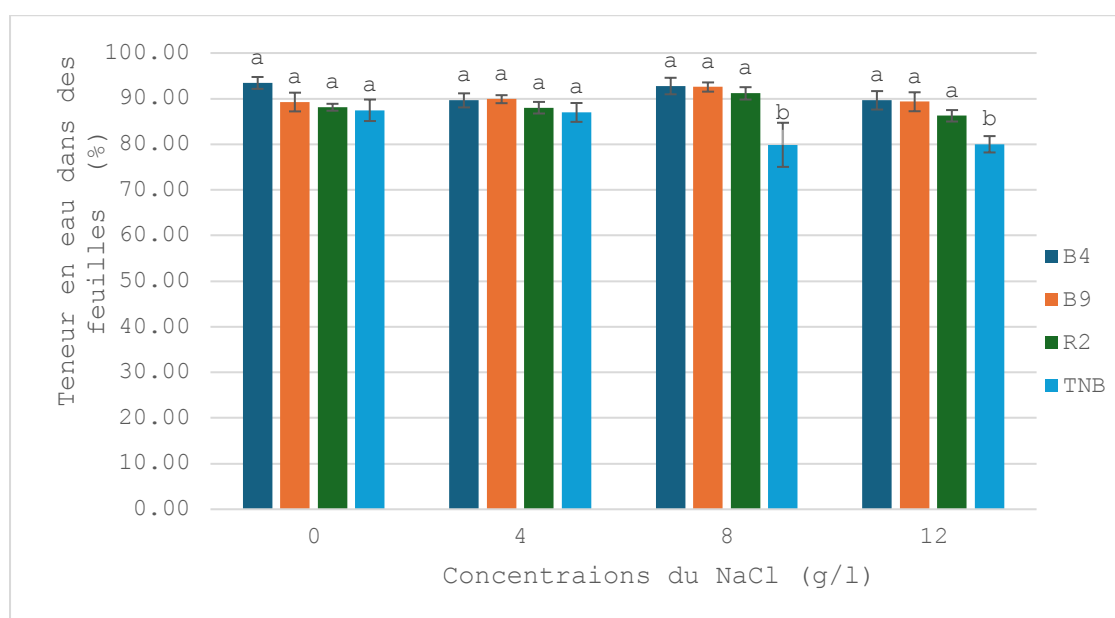


Figure 6 : Croissance de certains isolats à des concentrations de 2 à 15 % de NaCl..

III-2 Resultas relatifs a l'essai de la biostimulaion de la croissance du la tomate sous stress salin

III.2.1. Effet sur la teneur en eau de feuilles

D'après l'analyse de la variance, pour l'interaction entre les deux facteurs (facteur bactérisation et le facteur concentration de NaCl), est hautement significatif ($P=0.000$). Nous avons noté que tous les traitements ont été classés dans le groupe (a) avec des moyennes variant entre 86,24 % et 93,45 % à l'exception de deux traitements, TNB à 8 g/L et à 12 g/L de NaCl, qui ont enregistré des moyennes de l'ordre de 79,88 % et 80 %, respectivement.. (figure 7) .



Les valeurs suivies de la même de la lettre appartiennent au même groupe homogène, selon

Le test de Newman-keuls ($\alpha = 5\%$).

B9, B4, R2: souches des *Rhizobactéries*,

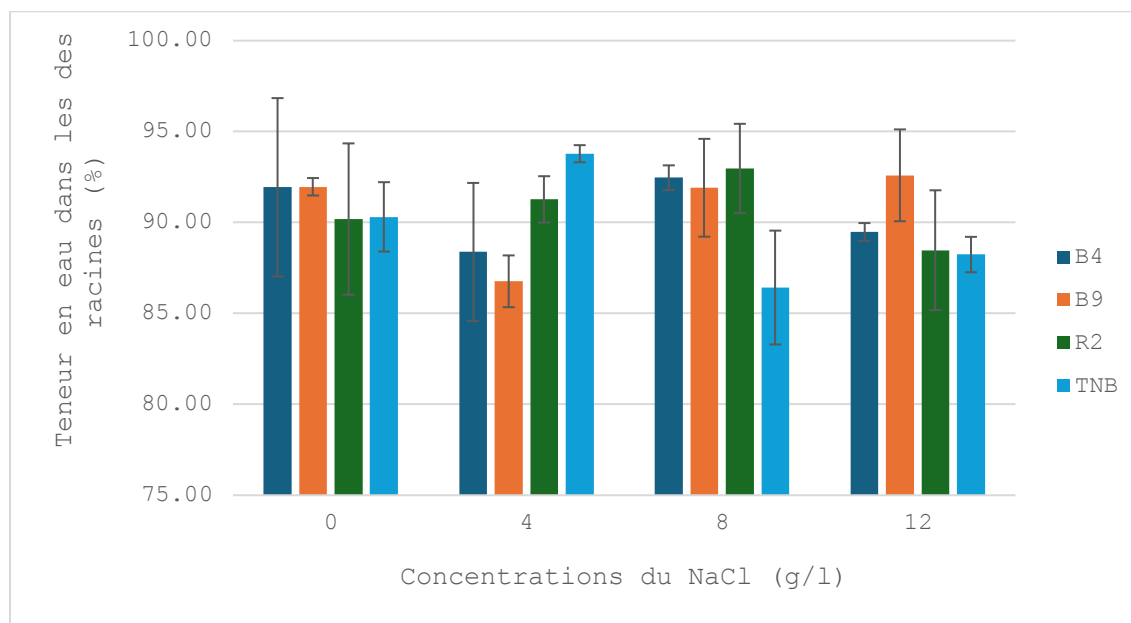
TNB : témoin non bactérié

0; 4 ; 8 et 12 g/l Concentrations de NaCl

Figure 7. Effets de l'interaction entre le facteur bactérisation et le facteur concentration de NaCl sur la teneur en eau dans des feuilles .

III.2.2. Effet sur la teneur en eau de racines

L'analyse de la variance a révélé une différence non significative pour l'interaction entre le facteur concentration de NaCl et le facteur de bactériation ($P = 0,069$). Les traitements ont enregistré des moyennes comprises entre 86,42 et 92,97% (Figure 8).



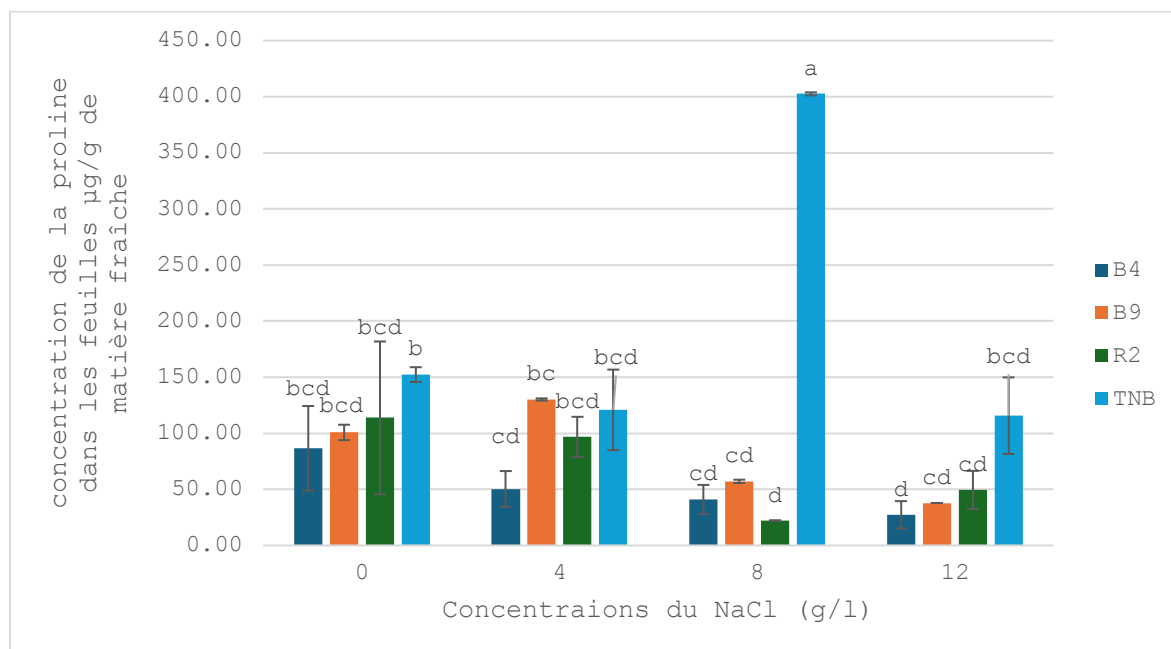
Les valeurs suivies de la même de la lettre appartiennent au même groupe homogène, selon Le test de Newman-keuls ($\alpha = 5\%$).
 B9, B4, R2: souches des *Rhizobactéries*,
 TNB : témoin non bactérié
 0; 4 ; 8 et 12 g/l Concentrations de NaCl

Figure 8. Effets de l'interaction entre le facteur bactériation et le facteur concentration de NaCl sur la teneur en eau dans les des racines.

III.2.3. Effet sur la concentration de proline dans les feuilles

D'après l'analyse de la variance, l'interaction entre les deux facteurs (bactériation et concentration de NaCl) est hautement significative ($P = 0,000$). À la concentration de 8 g/L de NaCl, le TNB a enregistré la moyenne la plus élevée avec 402 μg de proline, classé dans le groupe (a). Suivant ce groupe, le TNB à la concentration de 0 g/L de NaCl est classé dans le groupe (b). Dans le groupe intermédiaire (bc), la souche B9 à 4 g/L de NaCl présente une moyenne de 130 μg . Les traitements TNB à 4 et 12 g/L de NaCl, ainsi que R2 à 0 et 4 g/L de NaCl, et les bactéries B9 et B4 à 0 g/L de NaCl, sont classés dans le groupe intermédiaire (bcd), avec des moyennes allant de 86,60 à 120,91 μg . Ensuite, B9 à 8 et 12 g/L de NaCl, B4 à 4 et 8 g/L de NaCl, ainsi que R2 à 12 g/L de NaCl, se situent dans le groupe intermédiaire (cd), avec

des moyennes enregistrées variant entre 37,87 et 57,15 μg . Enfin, les plus faibles quantités de proline sont observées avec B4 à 12 g/L de NaCl, avec 27,36 μg , et R2 à 8 g/L de NaCl, avec 22,15 μg , classés dans le dernier groupe homogène (d) (**Figure 9**).



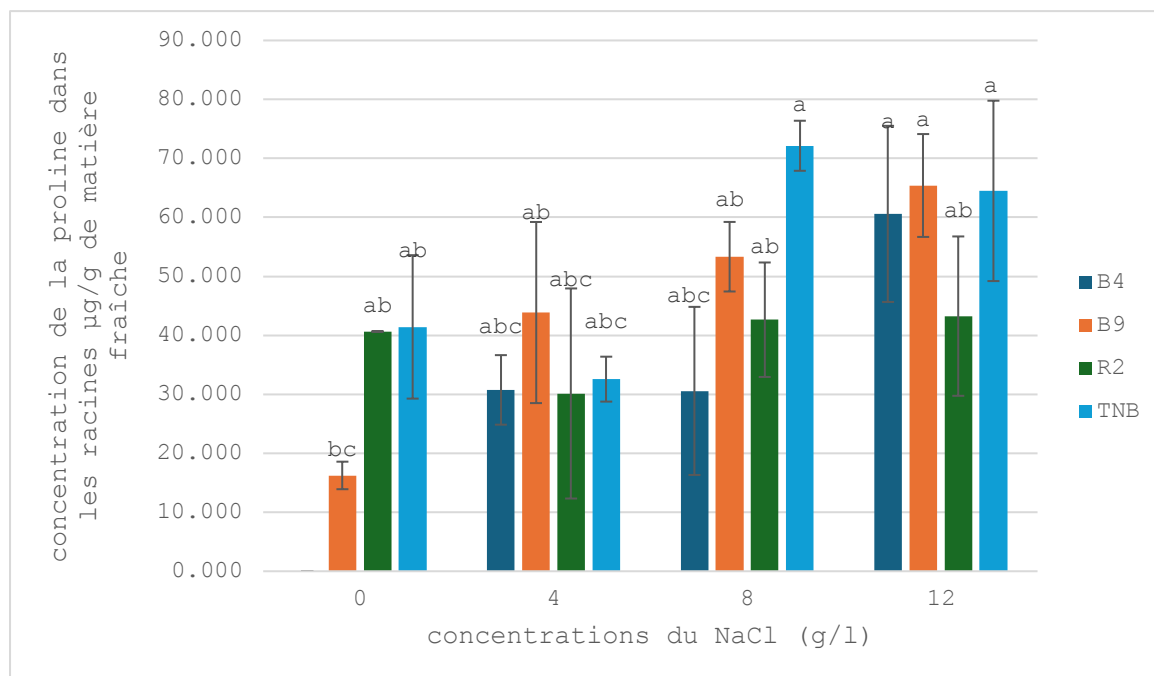
Les valeurs suivies de la même de la lettre appartiennent au même groupe homogène, selon Le test de Newman-keuls ($\alpha = 5\%$).
 B9, B4, R2: souches des *Rhizobactéries*,
 TNB : témoin non bactérié
 0; 4 ; 8 et 12 g/l Concentrations de NaCl

Figure 9. Effet de l'interaction entre le facteur bactérisation et le facteur concentration de Proline dans les feuilles

III.2.4. Effet sur la concentration de proline dans les racines

D'après l'analyse de la variance, l'interaction entre les deux facteurs (facteur bactériation et le facteur concentration de NaCl) est significative ($P=0,036$). Les résultats pour TNB à la concentration 8 et 12g/l de NaCl ainsi que B9 et B4 à 12g/l de NaCl ont donné les moyennes les plus élevés allant de 60,589 à 72,139 μg classé dans groupe (a). Suivi dans le groupe (ab) par la (B9) aux concentrations 4 et 8 g/l de NaCl et R2 aux concentration 4 ; 8 et 12g/l de NaCl et TNB à la concentration 0 g/l de NaCl avec des moyennes allant de 40,650 à 53,331 μg . dans le groupe (abc) sont classé TNB ; B4 ; R2 à la concentration 4 g/l de NaCl et la B4 à la concentration 8 g/l de NaCl ont enregistré des moyennes entre 30,140 et 32,572 μg .

Ensuite TNB ; B4 et R2 à 4 g/l de NaCl. Enfin la plus faible moyenne de l'ordre de 16,243 μg enregistré par la (B4) à 0 g/l de NaCl et classé dans groupe (bc) (**Figure 10**).

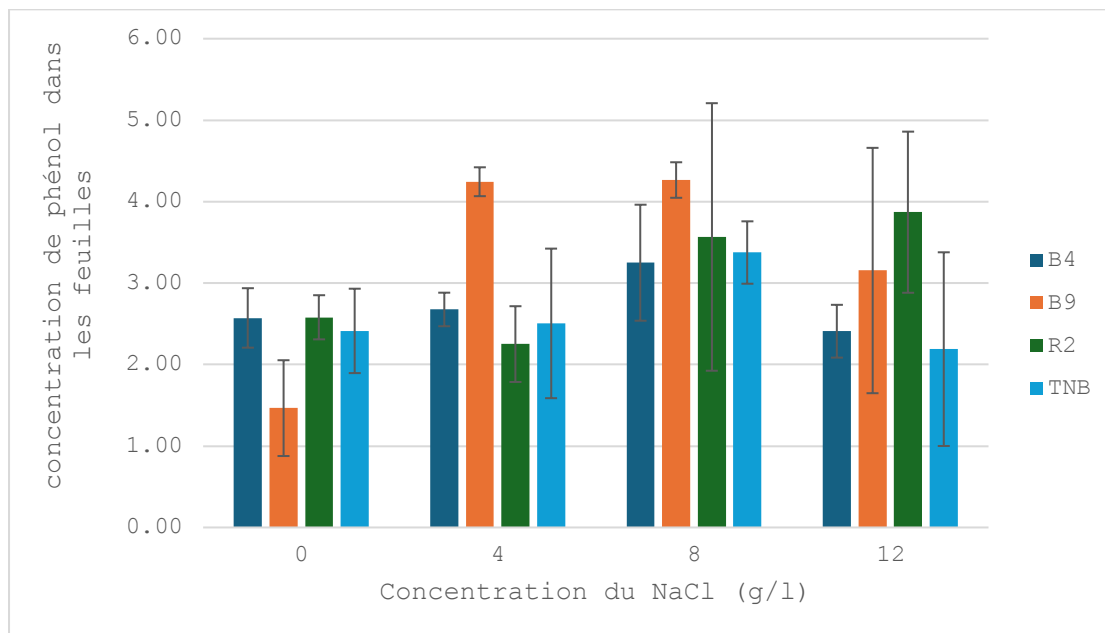


Les valeurs suivies de la même lettre appartiennent au même groupe homogène, selon le test de Newman-Keuls ($\alpha = 5\%$).
 B9, B4, R2: souches des *Rhizobactéries*,
 TNB : témoin non bactérié
 0; 4 ; 8 et 12 g/l Concentrations de NaCl

Figure 10. Effet de l'interaction entre le facteur bactérisation et le facteur concentration de Proline dans les racines

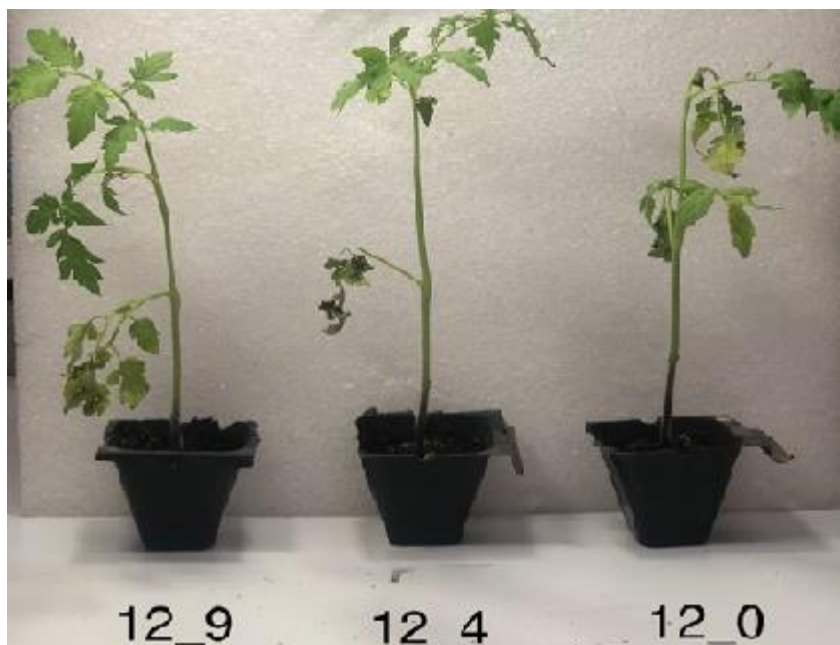
III.2.5. Effet sur la concentration du phénol dans les feuilles

L'analyse de variance a montré que pour l'interaction entre les deux facteurs (facteur bactérisation et le facteur concentration de NaCl), est non significatif ($P = 0,199$). Les traitements ont enregistré des moyennes comprises entre 1,46 et 3,87 (**Figure 11**).



Les valeurs suivies de la même de la lettre appartiennent au même groupe homogène, selon
 Le test de Newman-keuls ($\alpha = 5\%$).
 B9, B4, R2: souches des *Rhizobactéries*,
 TNB : témoin non bactériisé
 0; 4 ; 8 et 12 g/l Concentrations de NaCl

Figure 11. Effet de l'interaction entre le facteur bactérisation et le facteur concentration de Phénol dans les feuilles



12_9 : B9 à la concentration 12 g/l de NaCl
 12_4 : B9 à la concentration 12 g/l de NaCl
 12_0 : TNB : témoin non bactériisé à la concentration 12 g/l de NaCl

Figure 12. Représentation des plants de tomate à la concentration de 12 g/L de NaCl.

III. 2 Discussion

Dans cette partie nous discuterons les résultats de la stimulation de la croissance de tomate (*Solanum lycopersicum L.*) par des rhizobactéries (B4, B9, R2) sous stress abiotique, la salinité. D'après l'analyse de variance, nous avons observé des résultats très hautement significatifs pour l'interaction des deux facteurs étudiés concernant le taux relatif en eau dans les feuilles, ainsi que la quantité de proline dans les racines et dans les feuilles. En revanche, le taux relatif en eau dans les racines et la quantité de phénol ne présentent pas de différences significatives.

L'analyse de la croissance des bactéries en fonction des concentrations de NaCl révèle une variabilité marquée entre les souches testées. Alors qu'à 0% et 2% de NaCl, la plupart des souches montrent une croissance positive, des signes de stress apparaissent dès 5% pour certaines, comme B8 et B9. À 10%, des souches telles que B4 et B5 n'affichent aucune croissance, indiquant une sensibilité accrue. En revanche, B16 et Rs21 continuent de croître jusqu'à 15%, soulignant leur tolérance élevée au sel.

Dans notre essai nous avons remarqué que les souches bactériennes jouent un rôle bénéfique sur la croissance de la tomate (*Solanum lycopersicum L.*), nous avons constaté que d'une manière générale pour l'ensemble des paramètres étudiés les traitements ont donné des meilleurs résultats et aussi non bactériés pour les résultats obtenus in vivo.

Nous avons constaté que les résultats enregistrés in vivo chez la bactérie B4 avec moyenne 91.95 % à la concentration 0g/l de NaCl ont été meilleurs que ceux obtenus par les bactéries B9; R2, surtout en stress salin, la bactérie aide les grains à la germination et le développement des racines et des feuilles.

Le témoin non bactérisé (TNB) à partir de concentration de NaCl se classe toujours en dernier dans son catégorie. Pour les teneurs en proline est plus élevée dans les racines que les feuilles; elle est plus élevée chez les traitements bactérisés B4 et B9 et le témoin non bactérisé (TNB) chez les racines, et les feuilles le plus élevée le témoin non bactérisé (TNB). au sien de la même concentration de NaCl; pour les deux concentrations 4g/l et 8g/l de NaCl la teneur en proline est remarquablement enlevée. d'après les travaux de Snoussi en (2012) où il a été mentionné qu'il y a une accumulation de proline dans les différentes parties de la plante (racine, tige, feuille basale, feuille médiane et feuille apicale) irriguée par des eaux salines corrigées et ce compte tenu l'osmolarité externe plus forte, ce qui nécessite pour la plante un ajustement de

l'osmolarité interne encore plus forte ce qui se traduit par une production accrue de proline. pour la teneur de phénol est plus élevée dans les feuilles.

Des anciens travaux (Alibert *et al.*, 1977) ont montré que les phénols seraient associés à de nombreux processus physiologiques : croissance cellulaire, différenciation, organogénèse, dormance des bourgeons, floraison et tubérisation. Les flavonoïdes sont des pigments responsables de la coloration des fleurs, des fruits et des feuilles. Ils sont universellement présents dans la cuticule foliaire et dans les cellules épidermiques des feuilles, et sont susceptibles d'assurer la protection des tissus contre les effets nocifs du rayonnement UV (Hadi, 2004). Nos résultats montrent que les teneurs de phénol feuilles augmente en fonction que la concentration de NaCl augmente, de même que la proline est plus élevée chez les traitements bactérisé et le témoin non bactérisé (TNB). Le phénol dans la tomate agit comme un antioxydant naturel. Il aide à protéger la tomate contre les dommages oxydatifs, à prolonger sa durée de conservation et à maintenir sa fraîcheur. Le phénol joue également un rôle dans la pigmentation et la saveur de la tomate.

Certaines souches bactériennes de *Pseudomonas* peuvent stimuler significativement la germination de graines de tomate même lorsque les conditions d'environnement ne semblent pas favorables les *Pseudomonas* spp fluorescents sont des micro-organismes rhizosphériques intervenant dans la stimulation de la germination (Digat *et al.*, 1990).

Nous pouvons expliquer nos résultats de manière globale en soulignant que, sous des conditions de stress abiotique, les PGPR, synthétisent ou accumulent certaines molécules appelées "solutés compatibles". Ces molécules, compatibles avec le fonctionnement physiologique de la cellule, permettent à celle-ci de s'adapter à des conditions de stress sévères, telles que le stress salin, thermique, nutritionnel et oxydatif (Caldas *et al.*, 1999; Oren, 2003).

De plus, le stress abiotique stimule chez les PGPR la synthèse de biomolécules actives, lesquelles jouent un rôle crucial dans l'absorption des nutriments. Ces biomolécules facilitent l'adaptation non seulement des microorganismes, mais aussi des plantes co-environnantes aux conditions inhabituelles. En résumé, les PGPR démontrent une capacité remarquable à réagir face aux stress abiotiques, ce qui leur permet de fonctionner efficacement dans des environnements hostiles.

Les PGPR (Plantes Growth-Promoting Rhizobacteria) induisent diverses modifications chez les plantes, tant au niveau physique que moléculaire, principalement par la synthèse

d'enzymes qui favorisent leur croissance. Parmi ces enzymes, la 1-aminocyclopropane-1-carboxylate (ACC) désaminase joue un rôle crucial en régulant la production d'éthylène, une phytohormone de croissance. Cette enzyme réduit la synthèse d'éthylène en conditions stressantes, ce qui est essentiel, car une accumulation d'éthylène inhibe le développement des plantes et limite leur rendement, surtout dans des conditions de stress abiotique (**Saleem *et al.*, 2007; Singh et Singh, 2013**).

De plus, plusieurs bactéries PGPR produisent des auxines, comme l'acide indole-3-acétique (AIA), qui est déterminant pour la régulation de la croissance. L'AIA influence principalement les racines, en modifiant leurs dimensions, en augmentant le nombre de ramifications et en élargissant la surface racinaire qui entre en contact avec le sol (**Jah et Saraf, 2012**). Outre les auxines, d'autres phytohormones comme les cytokinines, les gibberellines et l'acide abscisique jouent également un rôle significatif dans la promotion de la croissance des plantes (**Morrone *et al.*, 2009; Reddy, 2014; Endo *et al.*, 2014**). Ces mécanismes montrent comment l'interaction entre les PGPR et les plantes peut améliorer leur développement et leur résilience face aux stress environnementaux.

Conclusion

L'étude sur les plants de tomate et les rhizobactéries a pour objectif d'évaluer l'effet positif de ces bactéries favorisant la croissance des plantes dans des conditions de stress abiotique salin.

Concernant le premier essai sur la tolérance des souches bactériennes face aux concentrations de NaCl, il apparaît que la majorité d'entre elles se développent correctement à 0% et 2%. Cependant, certains isolats, tels que B8 et B12, commencent à montrer des signes de stress à 5%. À 10%, les souches B4 et B5 ne montrent aucune croissance, tandis que B16 et Rs21 continuent de prospérer jusqu'à 15%, illustrant ainsi leur forte tolérance au sel. Ces résultats mettent en évidence l'importance de sélectionner des souches adaptées aux conditions salines pour des applications spécifiques.

Dans cette étude, nous avons examiné trois souches de bactéries (B4, B9, R2) ainsi qu'un témoin non bactérisé (TNB) Utilisation des concentrations différents (les quatre concentrations 0 g/l ;4 g/l ;8 g/l ;12g/l de NaCl,. D'une manier globale, les résultats indiquent que les bactéries testées ont un effet positif par rapport au témoin non bactérisé. De plus, elles améliorent de manière très significative les paramètres biochimiques, tels que la proline. La quantité de proline dans les feuilles est supérieure à celle trouvée dans les racines, de même pour le phénol. le teneur en eau dans les feuilles et les racines

Utilisation des concentrations différents (les quatre concentrations 0 g/l ;4 g/l ;8 g/l ;12g/l de NaCl, et les concentrations de la proline dans les feuilles et racines , la concentration de phénol dans les feuilles et le teneur en eau dans les feuilles et les racines pour garde est remarque les résultats de chaque effet. Il serait pertinent d'étudier l'effet de la bactérisation des dés graines in vivo et in vitro afin de comparer les résultats obtenus.

Nous pouvons dire que faire face aux défis agricoles nécessite une recherche approfondie pour comprendre les complexités liées à l'environnement rhizosphérique et aux mécanismes d'action des rhizobactéries. Il est également important de réfléchir à la manière d'intégrer ces organismes vivants dans un système d'agriculture durable, que ce soit par le développement de formulations spécifiques ou l'utilisation d'inoculants étudiés pour maximiser leur efficacité..

Pour continuer cette étude, plusieurs pistes de travail peuvent être envisagées. Nous proposons notamment les suivantes :

Il serait intéressant de tester les souches sur la germination des graines de tomate en tant que bio-stimulants, tout en les exposant à d'autres conditions de stress. Cela permettrait d'examiner de près l'impact du NaCl sur les cultures.

Références bibliographiques

- Abraoui, 2016.** Effet de stress salin sur des plantules de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cultivées sur substrat sableux amendé en Bentonite. Thèse doctorat, p 25-26
- Ashraf et al., 2008 ; Saharan et Nehra, 2011 . , M., Hasnain, S., Berge, O., 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.
- Barea et al., 2005 .** Microbial cooperation in the Rhizosphere. *Journal of Experimental Botany*.N° 56 (417) P 1761-1778.
- Benard C., 2009.** Étude de l'impact de la nutrition azotée et des conditions de culture sur le contenu en poly-phenols chez la tomate. Thèse de doctorat. Nancy Université- INRA Agronomie et Environnement, p 265.
- Benazzouk, 2018 .** l'atténuation du stress salin par l'extrait de vermicompost chez *solanum lycopersicum* L. En mobilisant les mécanismes de tolérance au sel. *Revue Agrobiologia* 8(2):1136-1144.
- CHARLOTTE,G 2014 .** catalogue illustré des principaux insectes ravageurs et auxiliaires .RITA GUYANE 49- 57.
- Chaux et Foury (1994).** Cultures légumières et maraichères. Tom 3. légumineuses potagères, légumes fruit. Tec et Doc Lavoisier, Paris, 563 p.
- Cheikh et al., 2020.** Tomate sous serre, Bulletin: transféré de technologie agriculture, n 57 Ed. P.N.T.T.A. Rabat.
- Dommergues et Mangenot, 1970.** ecologie microbienne du sol .Masson et Cie, 2013. *Microbacterium* avec l'uranium. Th doctorat : Microbiologie : Université d'Aix Marseille,, paris, N°72(796) 9p.
- Dumortier et al. (2010).** Biodiversité chez la tomate, stratégie de conservation etvalorisation de collection « lucfichot ». Rapport final, Phytotechnie et horticulture. Gembloux agro bio tech., 105 p.
- Egan et al., 2008.** Unlocking the diversity and biotechnological potential of marine surface associated microbial communities. *Current Opinion in Microbiology*. N° 11 P 219-225.
- FAO, 2010 .** Disponible sur : <http://faostate.fao.org> et <http://ecocrop.fao.org> .P4-5.
- Gallais et Bannerot, 1992.** Amélioration des espèces végétales cultivés objectif et critères de sélection. INRA, Paris, 765p.
- Girard et al.,2005 .** Sol et environnements. Junod, paris, P 306-317.
- Gobat et al., 2003.** Le sol vivant: bases de pédologie biologique des sols. Presses Polytechniques et Universitaires, Lausan. P 5-6.

- Gray et Smith, 2005.** "Intracellular and extracellular PGPR: commonalities and distinctions in the Plant–bacterium signaling processes." *Soil Biology and Biochemistry* N°37(3) P 395-412.
- Hallman et al., 1997.** Bacterial endophytes in Agricultural crops. *Can. J. Microbiol.*, N°43 P 895-914.
- Hallman, J., A. Quadt-Hallman, W.F. Mahaffee et J.W. Kloepper (1997).** Bacterial endophytes in agricultural crops. *Can. J. Microbiol.*, 43: 895-914
- Hamdoud, 2012.** Contribution au suivi phytosanitaire des cultures de tomate sous serre à la willaya de Tipaza. Mémoire de Master en sciences d'Ecologie Microbienne et Environnement à Université de Béjaia, 42 p.
- Judd et al., 2002).** Burkholderia sp. KCTC 11096BP as a newly isolated gibberellin producing bacterium. *J Microbiol.*N° 47 P 167–171.
- Kasdi (1989) .** Suivi de culture de tomate sous serre. Thèse. Ing. Agro. Ins, Agro,Skikda,61p.
- Kloepper et Beauchamp, 1992 ; Glick, 1995.** A review of issues related to measuring colonization of plant roots by bacteria. *Can. J. Microbiol.* N° 38 P 1219–1232.
- Larpent et al., 1989.** Biotechnologie des antibiotiques. Masson. Paris. N°130 p 31-61.
- Lemanceau, 1992.** Beneficial effects of Rhizobacteria on Plants: exemple of Fluorescent Pseudomonas spp. *Agronomie*,N°12 P 413-437.
- Liu et al., 2000.** The Rhizosphere. John Wiley. New York
- Morrone et al., 2009; Reddy, 2014; Endo et al., 2014.** Biological costs and benefits to Plantmicrobe interactions in the Rhizosphere. *Journal of Experimental Botany.* N°56 P 1729-1739.
- Navez et al., 2009.** Tomate :qualité et préférence. Edition Ctifl.Paris.271p.
- Philouze et Hedde, 1993.** Les biopesticides, compléments et alternatives produits phytosanitaires bibliographique).*Biotechnol. Argon* P 220-232. chimiques
- Polese, 2007.** Plante aromatique et condimentaire, flore de France.100-102p.
- Saleem et al., 2007; Singh et Singh, 2013.** Perspective of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) containing ACC deaminase in stress agriculture. *J Ind Microbiol Biotechnol* 34(10):635-64.
- Shabala, 2012 .** Molecular characterization of Plant Growth Promoting Rhizobacteria that enhance peroxidase and phenylalanine ammonia-lyse activité in chile (*Capsicum annum* L) and tomato (*Lycopersicon esculantum* Mill) .*Arch.Microbial.* N°188 P 483-494.
- Shanakra, 2005.** La culture de la tomate : production, transformation et commercialisation 5ème édition AgromisaFoundation, 105p.

Sheshadri et al., 2015. Rhizosphere induced heavy metal (loid) transformation in relation to bioavailability and remediation. *Journal of Soil Science et Plant Nutrition*. N° 15 (2) P 524-548.

Shilpi et Narendra, 2005 . Regulation of expression of the vacuolar NaR/HR antiporter gene ATNHXI by salt stress and ABA. *Plant Molecular Biology*, vol. 50 (3), p.543- 550.

Vittorio et Christoph, 2016. Signaling in the Rhizosphere. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tplants.2016.08.001>. trends in plant science.