

Popular Democratic Republic of Algeria
Ministry of High Education and Scientific Research
Abbes Laghrour University- Khenchela
Natural and life sciences Faculty
Molecular and Cellular Biology Department



N° de série :

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES **DE MASTER ACADEMIQUE**

Domaine : **Sciences de la nature et de la vie**

Filière : **Sciences Biologiques**

Spécialité : **Microbiologie appliquée**

Présenté par :

GHEDIRI Asma

DEHANA Dhaouia

Thème

***Recherche de rhizobactéries capables
d'améliorer la croissance des plantes***

Mémoire soutenu publiquement le 15 /06/ 2025 Devant le jury composé de :

Président :

Dr. BOUTARFA Soumia MCA à l'université Abbes LAGHROUR Khenchela

Encadreur :

Dr. DALLI Youcef MCB à l'université Abbes LAGHROUR Khenchela

Examineur :

Dr. BERTELLA Anis MCA à l'université Abbes LAGHROUR Khenchela

2024 -2025

Remerciements

***Nous remercions Dieu pour Son accompagnement,
ainsi que pour la volonté et l'endurance qu'Il nous a accordées afin de finaliser ce travail.***

À Lui reviennent nos louanges les plus sincères.

***On tient à remercier tout particulièrement notre encadrant, Dr Dali Youcef, pour nous avoir
suivis et conseillés tout au long de la réalisation de ce mémoire.***

***Nous adressons nos sincères remerciements aux enseignants pour leur engagement constant et
leurs conseils avisés durant toute la durée de notre parcours universitaire.***

***Nous remercions l'équipe du laboratoire pédagogique pour leur aide lors du travail pratique
en laboratoire, en particulier Madame Sarra .***

Nous remercions les membres du jury pour l'évaluation de ce travail .

Dédicace

À ceux qui m'ont donné la vie avec amour et dévouement,

À ceux qui ont veillé toute la nuit pour que je puisse réussir,

À mon père... sa tendresse est mon soutien et ses paroles, une lumière qui me guide,

Et à ma mère... ses sacrifices sont infinis et sa générosité est inoubliable.

Cette réussite est le fruit de votre travail acharné et de vos prières sincères.

À vous, je vous adresse tout mon amour et ma loyauté.

À vous, je dédie ma joie et ma fierté.

Vous êtes toujours la raison de tout le bien que j'accomplis.

À mon frère, Oussama,

Mon compagnon de route à chaque instant, mon soutien dans chaque épreuve, celui qui rend ma vie plus joyeuse et plus riche. Cet accomplissement est aussi le tien, car tu as toujours été derrière moi, m'encourageant et me poussant vers l'avant.

À mes sœurs,

mes compagnes de route, mon soutien dans les moments de faiblesse,

et celles qui adoucissent les épreuves par leur présence,

mais du fond du cœur... cet accomplissement fait aussi partie de votre réussite.

À ma chère amie, Dhaouia

ma compagne de détails et de souvenirs,

que j'ai tenue par la main dans tous les moments difficiles et faciles,

merci de faire partie de mon histoire.

Asma

Dédicace

Je dédie ce projet

À ma chère mère, À mon cher père, qui n'ont jamais cessé de prier pour moi, de me soutenir et de m'épauler afin que je puisse atteindre mes objectifs.

À mes chères sœurs ,

Soumia, Loubna, Lamia et Nada, puisse Dieu vous accorder la santé, le bonheur, le courage et surtout la réussite.

À ma chère Asma,

pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet, elle qui m'a accompagnée durant tout mon parcours universitaire.

À ma chère Bouchra,

ma compagne de route, je prie Dieu de t'accorder plein succès et réussite dans ta vie. Merci pour ton soutien, ton aide et ton dévouement sincère envers moi.

Merci d'être présente dans ma vie.

À mes chères amies,

Nada, Myada, Nawara et Rima,

Merci d'avoir fait partie de mes souvenirs.

Dhaouia

Résumé :

Le présent travail examine l'importance des rhizobactéries favorisant l'amélioration de la croissance des plantes en situation de stress salin. Un examen d'isolats bactériens, isolé de la rhizosphère de trois plantes halophytes (*Salicornia fruticosa*, *Suaeda vera* et *Tamarix africana*) a été fait, ainsi que des tests *in vitro* ont été élaborés par la capacité à promouvoir la croissance des plantes grâce à des moyens directes (fixation d'azote, solubilisation du phosphore, production d'auxines) et indirectes (production de sidérophores et lutte contre les agents phytopathogènes). L'intention est de repérer des souches bactériennes favorables à une agriculture durable dans des zones salines.

Les résultats obtenus ont montré que la plupart des isolats sont capables de fixer l'azote, quand à la production d'AIA, les isolats SV6 et TA3 se sont démarqués par leurs taux élevés avec une production de 78µg/ml et 49µg/ml respectivement. Six isolats, y compris TA3 génèrent de l'HCN. Pour la capacité à solubiliser le phosphore, aucun isolat n'a démontré un résultat positif. Cependant la majorité des isolats ont montré un effet antifongique notable, avec une inhibition atteignant 75% face à des champignons phytopathogènes .

Le test sur la germination des graines de blé a démontré que malgré l'inoculation, la croissance des racines a été diminuée par le stress salin. Contrairement aux graines de tomate, leur germination a été améliorée en utilisant l'isolat SF1 ainsi que la combinaison (SF1, SV6, TA3) à 0-50 mM de NaCl. Toutefois, à 150 mM, la germination diminue drastiquement .

Mots-clés : PGPR, stress salin, halophytes, AIA, fixation d'azote, biocontrôle, agriculture durable.

Abstract:

This work examines the importance of rhizobacteria in promoting plant growth under saline stress. A study was conducted on bacterial isolates from the rhizosphere of three halophytic plants (*Salicornia fruticosa*, *Suaeda vera*, and *Tamarix africana*). In vitro tests were developed to assess their ability to promote plant growth through direct (nitrogen fixation, phosphorus solubilization, auxin production) and indirect (siderophore production and control of phytopathogens) means. The aim was to identify bacterial strains that are favorable to sustainable agriculture in saline areas. The results showed that most isolates were capable of nitrogen fixation. Regarding IAA production, isolates SV6 and TA3 were noted for their high levels, with production of 78 µg/ml and 49 µg/ml, respectively. Six isolates, including TA3, were reported to interfere with HCN. No isolate demonstrated a positive result for their ability to solubilize phosphorus. However, the majority of isolates demonstrated a significant antifungal effect, with inhibition reaching 75% against phytopathogenic fungi such as .

The wheat seed germination test demonstrated that despite inoculation, root growth was reduced by salt stress. Unlike tomato seeds, their germination was improved using isolate SF1 and the combination (SF1, SV6, TA3) at 0-50 mM NaCl. However, at 150 mM, germination decreased drastically.

Keywords: PGPR, salt stress, halophytes, AIA, nitrogen fixation, biocontrol, sustainable agriculture.

الملخص

يبحث هذا العمل في أهمية البكتيريا الجذرية في تعزيز نمو النبات تحت الضغط الملحي. أجريت دراسة على عزلات بكتيرية من منطقة جذور ثلاثة نباتات ملحية (*Tamarix africana* و *Suaeda vera* و *Salicornia fruticosa*). تم تطوير اختبارات مخبرية لتقييم قدرتها على تعزيز نمو النبات من خلال الوسائل المباشرة (تثبيت النيتروجين وإذابة الفوسفور وإنتاج الأوكسين) وغير المباشرة (إنتاج السيدير وفور ومكافحة مسببات الأمراض النباتية). كان الهدف هو تحديد السلالات البكتيرية المواتية للزراعة المستدامة في المناطق المالحة. أظهرت النتائج أن معظم العزلات كانت قادرة على تثبيت النيتروجين. فيما يتعلق بإنتاج IAA، لوحظت مستويات عالية من العزلات SV6 و TA3، مع إنتاج 78 ميكروغرام/مل و 49 ميكروغرام/مل على التوالي. تم الإبلاغ عن أن ست عزلات، بما في ذلك TA3، تتداخل مع HCN. لم تُظهر أي عزلة نتيجة إيجابية لقدرتها على إذابة الفوسفور. ومع ذلك، أظهرت غالبية العزلات تأثيرًا مضادًا للفطريات بشكل ملحوظ، حيث وصل تثبيطها إلى 75% ضد الفطريات الممرضة للنباتات مثل .

أظهر اختبار إنبات بذور القمح أنه على الرغم من التلقيح، انخفض نمو الجذور بسبب الإجهاد الملحي. وعلى عكس بذور الطماطم، تحسن إنباتها باستخدام العزلة SF1 والمزيج (SF1، SV6، TA3) عند تركيز 0-50 ملي مولار من كلوريد الصوديوم. ومع ذلك، انخفض الإنبات بشكل كبير عند تركيز 150 ملي مولار...

الكلمات المفتاحية: PGPR، الإجهاد الملحي، النباتات الملحية، AIA، تثبيت النيتروجين، مكافحة الحيوية، الزراعة المستدامة.

Sommaire

Résumé

Abstract

الملخص

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

Table des matières

Liste des photos

Introduction 01

Revue bibliographique

1. Le Stress salin.....02

2. Causes de la salinité du sol.....02

2.1. Les causes naturelles
.....02

2.2. Les causes anthropiques.....02

3. Effets du stress salin sur la plante.....02

3.1. L'impact physiologique.....02

3.2. Modification biochimique.....03

4. Définition et classification des PGPR 03

5. Action des PGPR sur la croissance des plantes 04

5.1 Mécanismes directes.....	05
5.1.1. Fixation biologique de l'azote	05
5.1.2. Solubilisation du phosphore.....	06
5.1.3. Production d'auxines	07
5.2. Mécanismes indirectes	07
5.2.1 Production de sidérophores.....	08
5.2.2 Lutte contre les pathogènes.....	08
5.2.3 Induction de résistance systémique	09
6. Effets des PGPR sur les plantes en conditions de stress salin.....	09
7. Mécanisme d'atténuation du stress salin par les PGPR.....	09
7.1 Maintien de l'équilibre ionique (K^+/Na^+).....	09
7.2 Production d'osmolytes et d'enzymes antioxydantes.....	10
7.3 Régulation hormonal et amélioration de l'absorption des nutriments.....	10
8. État des lieux	10
8.1. Site de prélèvement	10
8.2. Plantes étudiées.....	11
8.2.1. <i>Salicornia frusticosa</i>	11
8.2.2. <i>Suaeda vera</i>	12
8.2.3. <i>Tamarix africana</i>	13

Matériel et méthodes

1. Prélèvement des échantillons	15
2. Analyse physicochimique du sol.....	15
2.1. Mesure du PH	15
2.2. Mesure de conductivité électrique (CE).....	15
2.3. Dosage de la matière organique.....	16
3. Isolement des bactéries rhizosphériques	17
3.1. Préparation de la solution mère et les dilutions décimales.....	17
3.2. Ensemencement et incubation	17
4. Repiquage et purification des isolats.....	18
5. Conservation des isolats.....	18
5.1. Conservation a courte durée	18
5.2. Conservation de longue durée.....	18
6. Mesure de quelques paramètres améliorant la croissance des plantes (PGP).....	18
6.1. Solubilisation du phosphate	18
6.2. Fixation d'azote.....	19
6.3. Production de d'acide indole 3-acétique.....	19
6.4. Production d'HCN	19
6.5. Effet antagoniste	19
7. Analyse phénotypique et identification des isolats bactériens	20
7.1. Analyse macroscopique.....	20

7.2. Analyse microscopique.....	20
7.2.1. Coloration de Gram.....	20
8. Effet des isolats sur les plantes.....	21
8.1. Désinfection des graines de tomate	21
8.2. Inoculation des grainesde tomate	21

Résultats et discussion

1. Analyse physicochimique du sol.....	23
1.1. Mesure du PH	23
1.2. Mesure de conductivité électrique.....	23
1.3 Dosage de la matière organique.....	23
2. Isolement des bactéries rhizosphériques.....	24
2.1 Dénombrements des bactéries.....	24
3. Purification des isolats bactériens.....	25
3.1 Analyse macroscopique.....	26
4. Recherche d'activité améliorant la croissance des plantes.....	27
4.1. Production d'HCN.....	27
4.2 Solubilisation de phosphore.....	28
4.3. Fixation d'azote.....	30
4.4. Production d'acide indole 3-acétique	31
4.2.4. Effet antifongique.....	34
5. Pré-identification des rhizobactéries	36

5.1. Analyse microscopique.....	36
5.1.1. Coloration de Gram.....	36
5.2. Recherche de catalase.....	36
5.3. Recherche d'oxydase.....	37
5.4. Caractérisation des paramètres biochimiques	37
6. Test de la germination des graines en condition de stress salin.....	39
6.1. Effet sur la germination de tomate <i>Solanum lycopersicum</i> var. <i>cerasiforme</i>	39
6.1.1. Effet sur le poids frais et sec	40
6.1.2. Effet sur la longueur racinaire de tomate <i>Solanum lycopersicum</i> var. <i>cerasiforme</i> ...	42
6.1.3. Indice en vigueur de longueur (SLVI) et poids (SWVI) des semis (tomate prégermé.	42
6.2. Effet sur la germination du blé <i>Triticum durum</i> var. <i>Waha</i>	44
6.2.1. Effet sur le taux de germination totale des graines de blé	44
6.2.2. Effet sur le poids frais et sec des graines de blé	45
6.2.3. Effet sur la longueur racinaire des grains de blé pré germées	47
6.2.4. Indice en vigueur de longueur (SLVI) et poids (SWVI) de semis (blé prégermés)....	48

Conclusion

Références bibliographiques

Annexe

Liste des tableaux

Tableau 01 : Dénombrements des bactéries.....	20
Tableau 02 : Analyse physico-chimique des sols	23
Tableau 03 : Description macroscopique des isolats.....	26
Tableau 04 : Production d’HCN.....	27
Tableau 05 : Solubilisation du phosphore.....	28
Tableau 06 : Fixation d'azote.....	30
Tableau 07 : Production d’AIA.....	31
Tableau 08: Tests des paramètres biochimiques chez les isolats sélectionnés (TA3, SF1, SV6).....	38

Liste des figures

Figure 1 : Mécanismes d'amélioration de la croissance des plantes par les PGPR.....	04
Figure 2 : Cycle de l'azote atmosphérique	06
Figure 03 : Concentration d'AIA produite par trois isolats (TA8, TA4, SV6).....	33
Figure 04 : Pourcentage d'isolats bactériens ayant des effets PGP dans trois sols différents (Sol 1, Sol 2, Sol3).....	34
Figure 0 5 : Effets antifongiques des isolats en pourcentages d'inhibitions des champignons phytopathogènes.....	34
Figure 06 : Pourcentage final de la germination des graines de tomates inoculées avec les isolats TA3, SV6, SF1 a (0, 50, 100, 150mM) NaCl.....	39
Figure07 : Poids frais de tomate inoculée avec les isolats TA3, SV6, SF1 en condition de stress salin.....	40
Figure 08 : Poids sec de graines de tomate pré germées et inoculées avec les isolats TA3, SV6, SF1 dans de différentes conditions de stress salin (0, 50, 100,150mM) Na Cl.....	41
Figure 09 : Longueur racinaire de tomate inoculée avec les isolats TA3, SV6, SF1 dans des conditions de stress salin	42
Figure10 : SLVI des graines de tomate inoculées avec les isolats (TA3, SV6, SF1) a (0, 50, 100 et 150mM) NaCL.....	43
Figure11 : SWVI des graines de tomate inoculées avec les isolats (TA3, SV6, SF1) a (0, 50, 100 et 150mM) NaCL.....	43
Figure12 : Effets des isolats (TA3, SV6, SF1) sur la germination des graines de blé en condition de stress salin (0, 150Mm)de NaCl.....	44
Figure 13 : Poids frais du blé inoculé avec les isolats TA3, SV6, SF dans des conditions de stress salin.....	45

Figure 14 : Poids frais du blé inoculé avec les isolats TA3, SV6, SF dans des conditions de stress salin.....46

Figure 15 : Longueur racinaire du blé inoculé avec les isolats TA3, SV6, SF dans des conditions de stress salin.....47

Figure 16 : SLVI des graines de blé inoculées avec les isolats (TA3, SV6, SF1) a (0 et 150mM) de NaCL.....48

Figure 16: SWVI des graines de blé inoculées avec les isolats (TA3, SV6, SF1) a (0 et 150mM) de NaCL.....48

Liste des photos

Photo 01: <i>Salicornia frusticosa</i>	12
Photo 02: <i>Suaeda vera</i>	13
Photo 03: <i>Tamarix africana</i>	14
Photo 04: pH mètre	15
Photo 05: Conductimètre	15
Photo 06 : Échantillons des sols Rhizosphériques	17
Photo 07 : Isolement des bactéries rhizosphériques dans trois types de sols.....	24
Photo 08 : Test de production d'HCN.....	27
Photo 09 : Test de Solubilisation de phosphate.....	29
Photo 10: Test de fixation d'azote.....	30
Photo 11: Test de Production d'AIA.....	32
Photo 12 : présentant l'effet antifongique des isolats bactériennes TA,SV,SF contre les champignons blanche et noire	35
Photo 13 : Test de catalase des isolas SF1, SV6, TA3.....	36
Photo 14 : Test d'oxydase des isolats SF1 et SV6 et TA3.....	37

Liste des abréviations :

SV: *Suaeda vera*

SF: *Salicornia frusticosa*

TA: *Tamarix africana*

AIA: Acide indole-3-acétique

PGP: Plant Growth promoting

HCN: l'acide cyanhydrique

PGPR: Plant Growth Promoting Rhizobacteria

MO : Matière organique

PH: Potentiel d'hydrogène

CE : Conductivité électrique

PDA: Potato Dextrose- Agar

GN : Gélose nutritive

IAM: l'indole-3-acétamide

IPyA : l'acide indole-3-pyruvique

ONPG : Ortho-Nitro Phényl-Galactoside

ADH : Arginine

LDC : Lysine

ODC : Ornithine

CIT : Citrate

H₂S : Thiosulfate de sodium

URE : Urée

TDA : Tryptophane

IND : Tryptophane

VP : Pyruvate de sodium

GEL : Gélatine emprisonnant des particu

GLU : Substrat carboné

MAN : Nitrates (NO_3)

INO : Inositol

SOR : Sorbitol

RHA : Rhamnose

SAC : Saccharose

MEL : Mélibiose

ARA : Arabinose

Introduction :

La salinisation des sols est un facteur environnemental gravement préjudiciable qui affecte la germination des graines, la croissance des cultures et la productivité (Zhou et al. 2024).

En tant que phénomène multifactoriel, la salinisation des sols se produit par des processus géochimiques naturels et des activités anthropiques secondaires (Balasubramaniam, Shen, Esmaili, & Zhang, 2023), elle constitue un problème majeur pour l'agriculture irriguée dans les régions chaudes et sèches du monde, engendrant un faible potentiel agricole, ce qui constitue une menace sérieuse pour la production agricole mondiale (Shrivastava & Kumar, 2014).

Certaines bactéries sélectionnées de la rhizosphère sont bénéfiques pour les plantes, elles agissent en améliorant la croissance de ces dernières, appelées PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria), elles utilisent divers mécanismes dans diverses conditions et atténuent les dommages causés par différents stress tel que la salinité. D'autres caractéristiques tel que la fixation d'azote et l'amélioration de l'absorption des micronutriments sont typiques pour ces bactéries (Zaib et al., 2023), elles sont considérées comme l'une des meilleures alternatives biologiques pour atténuer l'effet de la salinité sur les plantes (Kapadia et al., 2022).

L'objectif de notre étude est d'isoler, cribler et sélectionner des bactéries de la rhizosphère de trois plantes halophytes à savoir : *Salicornia fruticosa*, *Tamarix africana* et *Suaeda vera*, puis, évaluer au laboratoire leurs propriétés promotrices de croissance (PGP), telles que la fixation de l'azote, la solubilisation du phosphore, la production d'acide indole-3-acétique (AIA) et de cyanure d'hydrogène (HCN). Nous examinerons également leurs effets antagonistes contre deux champignons phytopathogènes.

Le test d'inoculation des graines de tomate et de blé prégermés dans différentes conditions de salinité peut confirmer l'innocuité des isolats sélectionnés. Ce qui peut faciliter leurs utilisations comme bio engrais plus tard.

Cette biotechnologie verte permet non seulement de réduire l'utilisation d'engrais chimiques néfastes à l'homme et à l'environnement mais aussi s'inscrit dans les moyens et méthodes durables et respectueuses de l'environnement.

Notre travail donc est divisé en trois parties, La première partie consiste en une revue bibliographique regroupant des informations sur la salinité des sols et l'effet des bactéries promotrices de croissance et le développement du végétal. La deuxième partie décrit la méthode d'isolement des bactéries rhizosphériques ainsi que les tests réalisés pour évaluer leurs propriétés. Enfin, la troisième partie est consacrée à la discussion des résultats obtenus et une conclusion synthétisant les principaux apports de notre étude.

REVUE

BIBLIOGRAPHIQUE

1. Le Stress salin

Le stress salin est un stress environnemental majeur qui affecte la croissance et le développement des plantes. Il augmente la pression osmotique intracellulaire et provoque une accumulation de sodium dans le sol ainsi dans la cellule végétale à des niveaux toxiques **(Hasanuzzaman & Fujita, 2022a)**, ce qui entrave la morphologie, la biomasse et processus biochimiques ainsi inhibe le développement normal des plantes **(Zhang et al. 2013 ; Rahnesan et al., 2018)**.

2. Causes de la salinité du sol

2.1. Les causes naturelles

La principale source de salinité primaire est constituée par les roches ignées intermédiaires telles que les phénolites, les roches ignées basiques telles que les basaltes, les roches volcaniques indifférenciées, les grès, les alluvions et les dépôts lagunaires **(Shahid et al. 2020)**.

La roche mère contient des minéraux carbonatés ou du feldspath, l'altération physique ou chimique opérée par l'eau amène les sels en solution, augmentant leur concentration dans les eaux souterraines et par conséquent, dans la couche arable mouillée **(Otlewska et al. 2020)**.

2.2. Les causes anthropiques

Les sels du sol sont aggravés souvent par la sur utilisation d'engrais chimiques, les mauvaises pratiques d'irrigation, la pollution industrielle, le retrait progressif de l'océan, ainsi que l'altération minérale **(Chele, Tinte, Piater, Dubery, & Tugizimana, 2021)**.

3. Effets du stress salin sur la plante

3.1. L'impact physiologique

Le stress salin produit divers changements physiologiques et métaboliques chez les plantes, notamment au niveau de la germination des graines et la photosynthèse. Parmi les processus de biosynthèses qui sont inhibés la machinerie photosynthétique, la transpiration et les échanges gazeux, la croissance de la plante sera ainsi réduite. **(Hasanuzzaman & Fujita, 2022b, Pan et al., 2020, Arif, Singh, Siddiqui, Bajguz, & Hayat, 2020)**.

3.2. Modification biochimique

L'entrée de Na^+ et de Cl^- dans les cellules provoque un grave déséquilibre ionique et une absorption excessive peut provoquer des troubles physiologiques importants. Une concentration élevée en Na^+ inhibe l'absorption des ions K^+ , élément essentiel à la croissance et au développement, ce qui entraîne une baisse de productivité et peut même entraîner la mort (**B. Gupta & Huang, 2014**).

Certaines réponses initiales, telles que la rupture de la membrane, l'accumulation de solutés compatibles et la réduction de l'assimilation du carbone, sont stimulées par le stress osmotique. De même, Na^+ et Cl^- sont absorbés par les plantes par l'intermédiaire de transporteurs et de canaux ioniques, ce qui entraîne une toxicité ionique et un déséquilibre nutritionnel (**Peng et al., 2022**).

4. Définition et classification des PGPR

Les rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR) sont des bactéries bénéfiques qui colonisent les racines des plantes et stimulent leur croissance par divers mécanismes. Leur utilisation est en constante augmentation en agriculture et constitue une solution intéressante pour remplacer les engrais chimiques, les pesticides et les compléments alimentaires (**Ashrafuzzaman et al., 2009**).

Les PGPR peuvent être extracellulaires (ePGPR, extracellulaires – **rhizobactéries** favorisant la croissance des plantes) ou intracellulaires (iPGPR, intracellulaires - rhizobactéries favorisant la croissance des plantes), ils résident dans les cellules du cortex racinaire ou du rhizoplan. À titre d'exemple les ***Bacillus* et *Pseudomonas*** sont les ePGPR les plus importantes et les plus utilisées, les autres genres inclus dans ce groupe sont ***Agrobacterium*, *Azotobacter*, *Azospirillum*** et ***Chromobacterium***.

Par contre les **iPGPR** sont présentes dans les nodules racinaires et appartiennent à la famille des ***Rhizobacteriaceae*** (**Bordoloi, 2022**).

5. Action des PGPR sur la croissance des plantes

Les rhizobactéries sont des bactéries stimulatrices de la croissance végétale. Leurs effets positifs sur la plante se réalisent par des mécanismes d'actions directs ou indirects (Madjida, 2022).

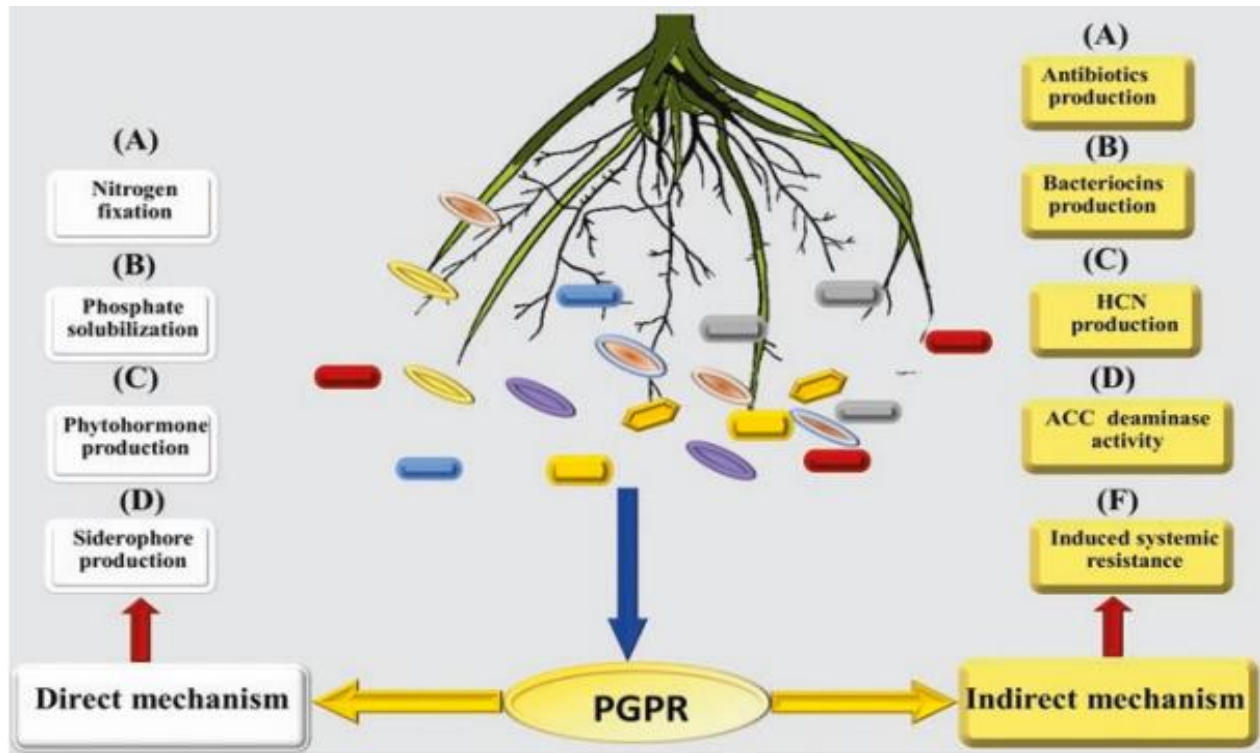


Figure 1 : Mécanismes de croissance et d'amélioration de la santé des plantes basés sur les PGPR (Gao, Zou, Wang, & Yuan, 2022)

5.1 Mécanismes directes

5.1.1. Fixation biologique de l'azote

L'azote est un élément essentiel à toute forme de vie et le nutriment le plus vital pour la croissance et la productivité des plantes, bien que présent à 78 % dans l'atmosphère, l'azote reste inaccessible aux plantes (**G.Gupta, Parihar, Ahirwar, Snehi, & Singh, 2015**).

La fixation de l'azote désigne le processus par lequel l'azote atmosphérique (N_2) est converti en une forme utilisable, telle que l'ammoniac (NH_3^+) ou le nitrate (NO_3^-), par des bactéries dites PGPR (**Iqbal, Singh, & Chandra, 2024**).

Les souches bactériennes ayant la propriété de fixer l'azote sont classées en deux catégories. La première catégorie comprend les bactéries symbiotiques associées aux racines et aux légumineuses, possédant la capacité à infecter les racines en formant des nodules, le genre *Rhizobium* est le plus connu dans ce type d'associations (**Goswami, Thakker, & Dhandhukia, 2016**). La deuxième catégorie comprend la fixation non symbiotique de l'azote, assurée par des diazotrophes libres, ce qui peut stimuler la croissance des plantes non légumineuses telles que le radis et le riz... etc. Les bactéries du genre *Azotobacter*, *Acetobacter*, *Azospirillum*, *Burkholderia*, *Diazotrophicus*, *Enterobacter*, *Gluconacetobacter*, *Pseudomonas* et cyanobactéries sont les plus caractéristiques dans ce type d'associations (**G. Gupta et al., 2015**).

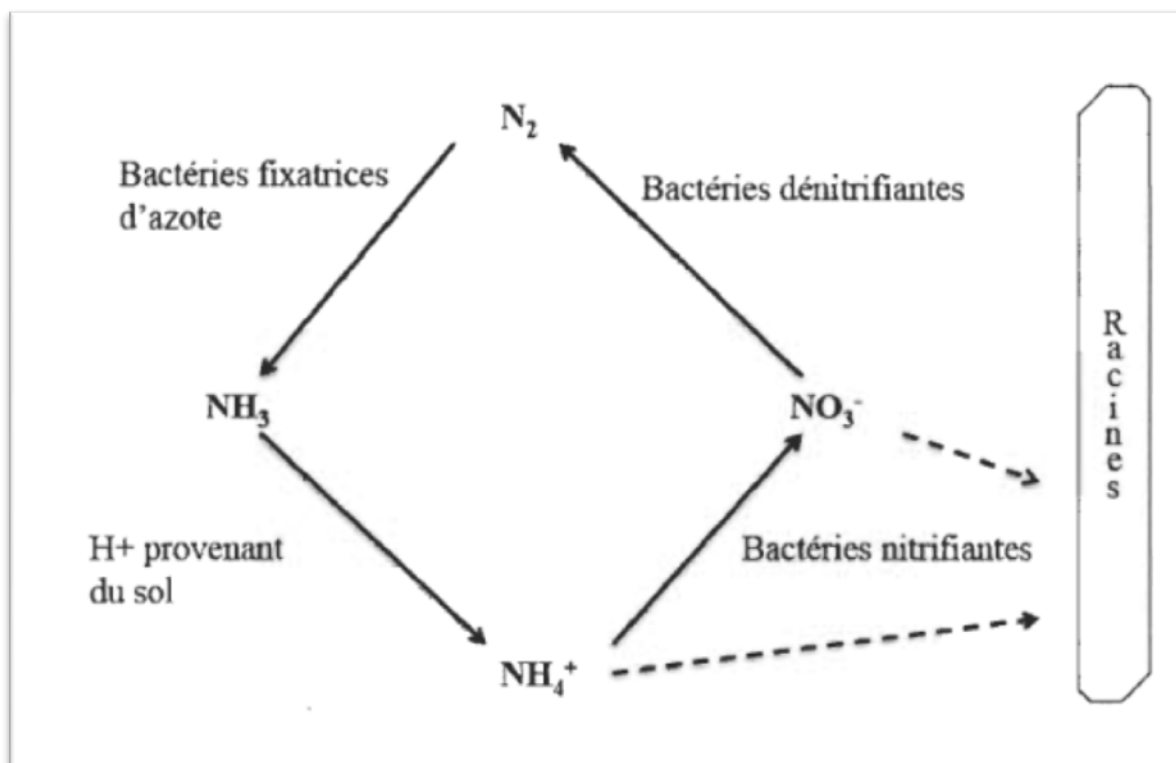


Figure 2 : Cycle d'azote atmosphérique (Khan et al., 2009)

5.1.2. Solubilisation du phosphore

Après l'azote, le phosphore est le nutriment le plus limitant pour les plantes (Jha & Saraf, 2015). La solubilisation du phosphore est essentielle à la synthèse des acides nucléiques, de l'adénosine triphosphate (ATP) et du nicotinamide adénine dinucléotide phosphate (NADPH), il est un macronutriment crucial pour le développement des plantes (Tariq et al., 2017 ; Kour et al., 2023., El-Saadony et al., 2024).

Les PGPR fournissent le phosphate accessible aux plantes par trois mécanismes : (1) en libérant de l'acide organique et (2) en modifiant la mobilité du phosphore par des interactions ioniques ; et (3) en utilisant des phosphatases, qui facilitent la séparation des groupes phosphate de la matière organique (Kundan et al., 2015Khalid, Arshad, Shaharoona, & Mahmood, 2009 Solano, Maicas, & Mañero, 2008).

Parmi les genres majoritairement impliqués : les *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Rhizobium*, *Burkholderia*, *Achromobacter*, *Agrobacterium*, *Micrococcus*, *Aerobacter*, *Flavobacterium*, *Chryseobacterium* et *Erwinia* (Jha & Saraf, 2015).

5.1.3. Production d'auxines

Les auxines sont parmi les premières phytohormones découvertes et les plus étudiées. Elles ont été isolées par **Went en 1926. En 1931, Kögl et Haagen-Smit**. Ces derniers ont purifié les molécules et ont établies leurs compositions chimiques (**Djebaili, Kitouni, & Del Gallo**).

Certains PGPR peuvent produire des auxines, notamment l'acide indole-3-acétique (AIA), l'auxine la plus courante et la plus biologiquement active chez les plantes. (**Zaib et al., 2023**).

Cette phytohormone, produite par la voie métabolique du tryptophane, joue un rôle central dans le développement des racines en stimulant l'extension cellulaire et la création de poils absorbants (**Spaepen et al., 2007**).

Des bactéries telles que *Pseudomonas putida*, *Azospirillum brasilense* et *Bacillus subtilis* ont démontré leur efficacité dans la production d'AIA, contribuant de manière significative à l'amélioration de l'absorption en eau et en minéraux des plantes (**Dobbelaere, Croonenborghs, Thys, Vande Broek, & Vanderleyden, 1999**). Outre ses conséquences sur la croissance, l'AIA généré par les PGPR contribue de manière significative à la rhizogenèse et améliore la résilience des plantes face aux stress abiotiques tels que la sécheresse et la salinité (**Egamberdieva, Wirth, Alqarawi, Abd_Allah, & Hashem, 2017**).

5.2. Mécanisme indirecte

En créant des substances chimiques répressives qui renforcent la résistance intrinsèque de l'hôte, les PGPR utilisent des moyens efficaces pour protéger les plantes des phytopathogènes ou en atténuant leur l'impact. Les rôles des PGPR dans ce processus incluent la production d'enzymes hydrolytiques (chitinases, cellulases, etc.), la production d'antibiotiques et COV ainsi que d'exsudats par photosynthèse (**Hasan, Tabassum, Hashim, & Khan, 2024**).

5.2.1 Production de sidérophores

Le sidérophore est un chélateur naturel du fer, produit par plusieurs PGPR, Il joue un rôle essentiel dans la compétitivité des PGPR et leurs capacités à résider dans la région rhizosphérique, ce qui exclut plusieurs agents pathogènes des plantes qui dépendent principalement du fer pour leur croissance et leur survie. **(Singh, 2023).**

Plusieurs espèces de rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR), dont *Enterobacter*, *Pseudomonas*, *Azotobacter*, *Bacillus*, *Serratia* et *Rhizobium* produisent des sidérophores extracellulaires ou intracellulaires, hydrosolubles, capables de solubiliser le fer, des minéraux ou des molécules organiques dans des conditions limitantes en fer, ainsi de former des complexes stables avec les métaux lourds et les particules radioactives **(de Andrade, Santos, Frezarin, Sales, & Rigobelo, 2023)**

5.2.2 Lutte contre les pathogènes

Les PGPR ont été identifiés comme des agents de lutte biologique capable de supprimer un large éventail d'organismes susceptibles de provoquer des maladies chez les plantes **(Kenneth, Nwadike, Kalu, & Unah, 2019).**

Ces bactéries bénéfiques interviennent de manière antagoniste principalement par la concurrence pour les habitats écologiques et les nutriments vitaux comme le fer grâce à la production de sidérophores **(Kloepper, Leong, Teintze, & Schroth, 1980)** et la synthèse de métabolites antimicrobiens tels que les antibiotiques (2,4-diacétylphloroglucinol), les enzymes lytiques (chitinases) et les composés volatils **,(Ongena & Jacques, 2008)** et l'initiation de la résistance systémique induite (ISR) chez la plante hôte, qui active ses mécanismes défensifs via les voies du jasmonate et de l'éthylène **(Pieterse et al., 2014).**

Des souches telles que *Pseudomonas fluorescens* et *Bacillus subtilis* ont prouvé leur efficacité notable contre divers agents pathogènes comme *Fusarium oxysporum* et *Pythium spp* **(Haas & Défago, 2005).**

5.2.3 Induction de résistance systémique

La résistance systémique induite (RSI) est l'état de capacité défensive développé par la plante lorsqu'elle est stimulée par divers agents, dont les rhizobactéries. Une fois la résistance induite chez la plante, elle entraîne une protection non spécifique contre les champignons, bactéries et virus pathogènes (Ashrafuzzaman et al., 2009).

Le déclenchement de l'RSI s'effectue par la production d'éliciteurs tels que les lipopolysaccharides, la flagelline et les lipopeptides cycliques. Ces derniers sont reconnus par les récepteurs végétaux et activent les voies de signalisation conduisant à l'expression de gènes liés à la défense (Choudhari & Birari, 2024).

Des souches PGPR telles que *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Serratia*, *Azospirillum* et *Trichoderma* induisent une résistance systémique (Chandran, Meena, & Swapnil, 2021)

6. Effets des PGPR sur les plantes en conditions de stress salin

En conditions de salinité, la croissance des plantes pourrait être accélérée par les PGPR en facilitant l'acquisition de ressources (azote, phosphore, potassium) et en modérant les niveaux d'hormones végétales par la production de l'enzyme ACC désaminase ou indirectement par la production d'exopolysaccharides, de biofilm, d'osmoprotecteurs, d'enzymes antioxydantes et de composés organiques volatils (COV) (Shultana et al., 2022).

7. Mécanisme d'atténuation du stress salin par les PGPR

7.1 Maintien de l'équilibre ionique (K^+/Na^+)

Les PGPR aident à maintenir l'homéostasie ionique et les rapports K^+/Na^+ élevés dans les pousses en réduisant l'accumulation de Na^+ et Cl^- dans les feuilles, en augmentant l'exclusion de Na^+ par les racines et en stimulant l'activité des transporteurs K^+ à haute affinité (Pan et al., 2019)

Ces dernières contribuent à augmenter le taux de K^+ et à maintenir le rapport K^+/Na^+ en éliminant l'excès de Na^+ hors de la cellule chez les plantes stressées par la salinité (Mishra, Mishra, & Arora, 2021).

Les PGPR peuvent également réduire l'absorption de Na^+ par les plantes en libérant des polysaccharides extracellulaires pour restreindre la libre circulation du Na^+ du sol, **(Gao, Zou, Wang, & Yuan, 2022)**. Les PGPR aident les plantes dans des conditions de salinité en augmentant la capacité d'absorption d'eau, en améliorant l'absorption des nutriments essentiels, en accumulant les osmolytes tel que (par la proline (Pro), le glutamate (Glu), la glycine bêtaïne, les sucres solubles, la choline, l'O-sulfate et les polyols dans les tissus végétaux **(Gao et al., 2022)**).

7.2 Production d'osmolytes et d'enzymes antioxydantes

Les osmolytes produits par le PGPR peuvent améliorer le potentiel hydrique et la conductivité hydraulique, ce qui affecte positivement l'ouverture stomatique et le taux de transpiration dans la plante **(Mishra et al., 2021)**. Les PGPR induisent le système antioxydant de la plante pour protéger les plantes du stress oxydatif **(Gao et al., 2022)**.

7.3 Régulation hormonal et amélioration de l'absorption des nutriments

Le rhizo-microbiome synthétise des phyto-hormones en faible concentration, qui agissent comme des messagers chimiques pour réguler les voies métaboliques des stimulateurs de croissance chez les plantes et modifier la morphologie des racines lorsqu'elles sont exposées au stress salin **(Kumawat et al., 2023)**.

8. État des lieux

8.1. Site de prélèvement

La région de Guerrah et Tarf est un espace naturel caractérisé par la présence d'un chott (ou sebkha), situé à la frontière entre les wilayas de Khenchela et d'Oum El Bouaghi, dans l'est de l'Algérie. Ce site fait partie des nombreux écosystèmes semi-arides typiques des Hauts Plateaux algériens, et il se distingue par sa richesse écologique, son importance hydrologique et son potentiel pour le développement local.

Le chott Guerrah et Tarf abrite une biodiversité spécifique adaptée aux conditions salines et arides. On y trouve une flore halophile (plantes tolérant le sel) ainsi qu'une avifaune migratrice, ce qui en fait un site d'intérêt écologique,

8.2. Plantes étudiées

8.2.1 *Salicornia fruticosa*

La *Salicornia fruticosa* fait partie de la famille des *Amaranthaceae*, plus spécifiquement de la sous-famille *Salicornioideae* (Kadereit et al., 2007). Cette plante est catégorisée comme une halophyte pérenne semi-ligneuse, créant des buissons épais (**Davy et al., 2001**). Morphologiquement, elle possède des tiges succulentes et articulées qui sont vertes (tendant au rouge en automne), avec des feuilles qui se réduisent à des écailles (**Chapman, 1974**). Se retrouve surtout dans les marais salés côtiers (**Adam, 1990**).

Concernant la distribution géographique, on la retrouve dans la région méditerranéenne en particulier sur les rivages méridionaux de l'Europe et de l'Afrique du Nord (**Quézel & Santa, 1962**). Sur le versant atlantique du Portugal à la France (**Costa et al., 2009**).

Cette plante occupe une place centrale dans la fixation des sols : en évitant l'érosion dans les écosystèmes côtiers (**Silvestri et al., 2005**). Aussi de soutenir la biodiversité : en fournissant un habitat pour les oiseaux migrateurs et les invertébrés (**Green et al., 2018**).

La *Salicornia fruticosa* a de nombreuses applications. Utilisation alimentaire D'abord, elle est consommée en tant que légume marin riche en minéraux tels que le sodium, le potassium et le magnésium (**Ventura & Sagi, 2013**). Elle est employée dans la cuisine traditionnelle méditerranéenne (**López et al., 2018**) et à des fins médicales. De plus, elle a des qualités de diurétique et d'antioxydant (**Ksouri et al., 2012**).

On connaît aussi *Salicornia fruticosa* sous le nom d'*Arthrocnemum fruticosum* (**Mabberley, 2017**). À l'inverse de *Salicornia europaea*, qui est une plante annuelle non ligneuse (**Ball & Tutin, 1959**).



Photo 1 : *Salicornia frusticosa*

8.2.2. *Suaeda vera*

Suaeda vera fait partie de la famille des *Amaranthaceae*(sous-famille *Suaedoideae*) (**Kadereit, Borsch, Weising, & Freitag, 2003**). Cette plante est distinctive par sa forme buissonnière qui peut monter jusqu'à 1 mètre de hauteur (**Freitag et al., 2001**). Ses feuilles de forme cylindrique et charnue exhibent une teinte vert glauque qui peut prendre une nuance rougeâtre (**Chapman & Foot, 1976**). Ses fleurs, de petite taille et de teinte verte, se rassemblent en glomérules distinctifs (**Ball & Akeroyd, 1993**).

Cette espèce a une préférence pour les marais salés côtiers et les vasières salées (**Davy et al., 2006**). Par ailleurs, sa distribution géographique est extrêmement large, sur le continent européen et tout le bassin méditerranéen et même en Asie (**Bosser, 2003**).

Suaeda vera, en colonisant les sols hypersalés (**Ungar, 2023**), joue un rôle précurseur, elle contribue de manière significative à la biodiversité en hébergeant des insectes spécialisés (**Pétillon et al., 2008**). Aussi elle aide à la protection des côtes en stabilisant les sédiments

(Silvestri et al., 2005). et offre une opportunité prometteuse pour la phytoremédiation (Manousaki & Kalogerakis, 2011).



Photo 2 : *Suaeda vera*

8.2. 3. *Tamarix africana* :

La *Tamarix africana* fait partie de la famille des *Tamaricaceae*. On parle spécifiquement d'un arbuste ou d'un petit arbre qui atteint généralement 4 à 5 mètres de hauteur (**Baum, 1978**). Pour ce qui est de ses attributs morphologiques, d'une part, ses feuilles sont très petites (1-2 mm) et écaillées. Par ailleurs, il génère des fleurs allant du rose au blanc, qui s'agencent en grappes de forme cylindrique typiques. De plus, son système racinaire profond représente une adaptation impressionnante aux environnements arides (**Boulos, 1999**).

Cette espèce est caractérisée par une distribution qui englobe le bassin méditerranéen occidental (**Villar & David, 2014**).

Cette espèce occupe plusieurs fonctions essentielles, elle contribue à la stabilisation des dunes .Puis, elle joue le rôle d'espèce pionnière pour l'écologie et constitue un refuge pour la biodiversité **(Gaskin & Schaal, 2002)**, C'est une espèce qui a des applications dans la médecine traditionnelle. Elle représentait une ressource précieuse pour l'apiculture et son bois est toujours exploité **(Bellakhdar, 1997) (Cabi et al., 2019)** .



Photo 3 :*Tamarix africana*

MATÉRIEL ET MÉTHODES

1. Prélèvement des échantillons de sol

Nos travaux ont été réalisés au laboratoire pédagogiques d'E LHAMMA. Des prélèvements de sols rhizosphériques ont été effectués dans le site Guerrah Et Tarf. Ce site fait partie des nombreux écosystèmes semi-arides typiques des Hauts Plateaux algériens, et il se distingue par sa richesse écologique, son importance hydrologique et son potentiel pour le développement local.

Le chott Guerrah et Tarf abrite une biodiversité spécifique adaptée aux conditions salines et arides. On y trouve une flore halophile (plantes tolérant le sel) ainsi qu'une avifaune migratrice, ce qui en fait un site d'intérêt écologique,

Ce travail vise à étudier comment les bactéries rhizosphériques contribuent à améliorer la croissance des plantes dans des conditions de stress salin, en utilisant le sol provenant de la rhizosphère de trois espèces végétales halophytes à savoir *Salicornia frusticosa*, *Suaeda vera* et *Tamarix africana* présente d'une façon naturelle

Chaque prélèvement a été effectué à une profondeur à la surface dans la partie rhizosphérique des plantes en utilisant une tarière stérilisée pour garantir la représentativité et éviter toute contamination externe, trois échantillons pour chaque plante ont été effectués, puis homogénéiser en un seul lot et mis immédiatement dans des boîtes de conservation hermétiques, stériles, et sèches, afin de préserver leurs propriétés physico-chimiques.

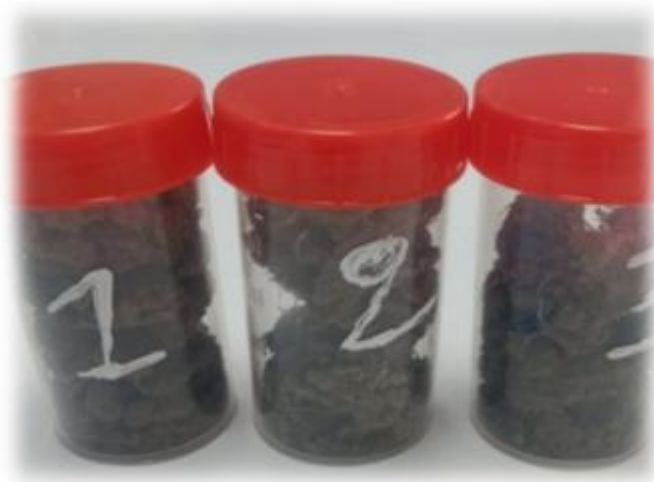


Photo 06: Échantillons de sols salins conservés dans des boîtes hermétiques, numérotés pour les analyses.

2. Analyse physicochimique du sol

2.1 Mesure du PH

Le pH du sol est déterminé à l'aide d'un pH-mètre après suspension du sol dans l'eau distillée selon (AFNOR, 1999).



Photo 04: pH mètre

2.2. Mesure de conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique a été mesurée à l'aide d'un conductimètre, après préparation d'une suspension sol-eau a un rapport 1:5, conformément à la méthode décrite par Rhoades et al. (1996).



Photo05 : Conductimètre

3.3. Dosage de la matière organique

Pour évaluer la teneur en matière organique, la méthode d'incinération par four à moufle a été utilisée, les trois échantillons du sol prélevés, ont été testés. 10 grammes de chaque échantillon ont été placés dans des creusets puis chauffés à haute température (environ 550 °C) pendant plusieurs heures à l'aide d'un four à moufle. La perte de masse observée après chauffage correspond à la décomposition des matières organiques volatiles présentes dans le sol (**Nelson & Sommers, 1996**).

4. Isolement des bactéries rhizosphériques

L'isolement des bactéries rhizosphériques a été effectué en utilisant un milieu nutritif gélosé en utilisant une série de dilution décimale (**Berg & Smalla, 2009**)

4.1. Préparation de la solution mère et les dilutions décimales

Pour chaque échantillon de sol, 1 gramme de sol a été prélevé et introduit dans un tube à essai stérilisé contenant 9 millilitres de solution physiologique stérile préalablement préparée. Les tubes sont ensuite agités doucement pour garantir une parfaite homogénéité entre le sol et la solution. Cette préparation constitue une dilution de 10^{-1} . A partir de cette dilution des dilutions successives ont été élaborées jusqu'à 10^{-4} . Chaque tube est ensuite agité soigneusement pour garantir l'homogénéité des dilutions successives.

4.2 Ensemencement et incubation

Les dilutions décimales de chaque sol (10^{-1} à 10^{-4}) ont étéensemencées à l'aide d'une micropipette. 0,1 ml de chaque dilution a été prélevée et étalée sur la surface du milieu GN à l'aide d'un râteau stérile. Les boîtes de Pétri ont ensuite été incubées à 30°C pendant 24 heures pour permettre le développement des colonies bactériennes (**Baikeche & Boudjemai, 2023**)

5. Repiquage et purification des isolats

Après l'incubation des boîtes de Pétri, les colonies isolées de chaque échantillon de sol ont été purifiées sur le milieu GN. Huit colonies présentant des caractéristiques morphologiques différentes par échantillon de sol ont été prélevées et ensemencées à l'aide d'une anse de platine, selon la méthode des stries successives sur la surface du milieu GN. Les boîtes de Pétri ainsi

préparées ont été ensuite incubées à 30°C pendant 24 heures pour permettre une croissance optimale des colonies purifiées (**Lemmen, Häfner, Zolldann, Stanzel, & Lütticken, 2004**)

6. Conservation des isolats

6.1. Conservation a courte durée

Les isolats ont été conservés à court terme en les ensemençant sur un milieu solide de gélose nutritive (GN) incliné, suivi d'une incubation à 30 °C pendant 3 jours, les tubes ont été stockés à 4 °C (**Perrin, 2020**).

6.2. Conservation de longue durée

Les isolats ont été repiqués dans des cryotubes contenant du bouillon nutritif stérile additionné de glycérol à 50 % (v/v), qui agit comme agent cryoprotecteur. Les cryotubes ont ensuite été conservés à – 4 °C (**Trsic-Milanovic et al., 2001**).

7. Mesure de quelques paramètres améliorant la croissance des plantes (PGP)

7.1. Solubilisation de phosphate

Les isolats bactériens obtenus à partir de trois échantillons de sol différents ont été ensemençés sur le milieu NBRIP (National Botanical Research Institute's Phosphate), enrichi en bleu de bromophénol agissant comme indicateur de pH, afin d'évaluer leur capacité à solubiliser le phosphate. Après une incubation à 30 °C pendant 48 heures, la formation d'un halo clair autour des colonies accompagnée d'une acidification visible du milieu a été considérée comme un indicateur positif de l'activité de solubilisation du phosphate (**Singh & Jha, 2017**).

7.2. Fixation d'azote

Pour tester la fixation d'azote, les isolats bactériens issus de trois échantillons de sol ont été ensemençés sur le milieu Winogradsky (WS), un milieu solide dépourvu d'azote. Les boîtes ont été incubées à 30 °C pendant 48 heures (**Chakravarty & Purkayastha, 1984**).

7.3. Production d'acide indole 3-acétique

Pour évaluer la production d'acide indole-3-acétique (AIA), les isolats bactériens ont été ensemencés dans des tubes à essai contenant 5 mL de milieu nutritif LB (Luria-Bertani) additionné au tryptophane 1% et incubés à 30 °C pendant 72 heures. Après incubation, le surnageant a été récupéré après centrifugation, et la quantité d'AIA produite a été déterminée par spectrophotométrie à une longueur de 530 nm, en présence du réactif de Salkowski, selon la méthode décrite par **Patten et Glick (2002)**.

7.4. Production d'HCN

La production de cyanure d'hydrogène (HCN) par les isolats bactériens a été évaluée selon la méthode décrite par **Cherif-Silini et al. (2019)**. Les souches ont été cultivées sur un milieu spécifique contenant du tryptic soy broth (30 g/L), de la glycine (4,4 g/L) et de l'agar (15 g/L). Un papier filtre Whatman N°40, préalablement imbibé d'une solution d'acide picrique à 0,5 % et de Na₂CO₃ à 2 %, a été placé sur le couvercle des boîtes de Petri, lesquelles ont été scellées hermétiquement à l'aide de parafilm pour éviter la fuite des gaz. Après une incubation de quatre jours à 28 ± 2 °C, le développement d'une coloration orange-brun sur le papier indiquait la production de HCN (**Kerbab et al., 2021**).

7.5. Effet antagoniste

L'évaluation de l'effet antagoniste de bactéries sur des champignons phytopathogènes a été réalisée sur milieu PDA (Potato Dextrose Agar). Deux boîtes de Pétri ont été ensemencées chacune avec deux champignons différents couleur noire et l'autre blanche. Des isolats bactériens ont ensuite été inoculés à proximité des champignons sur le même milieu en utilisant la technique de disques d'agar (**Lee et al., 2012**). Les boîtes ont été incubées à 30 °C pendant plusieurs jours. La croissance mycélienne des champignons a été mesurée régulièrement afin d'évaluer l'effet inhibiteur potentiel des bactéries, notamment par comparaison avec un témoin non traité (**Smith & Jones, 2020**).

8. Analyse phénotypique et identification des isolats bactériens

Les isolats bactériens montrant un ou plusieurs effets PGP testés ont été caractérisés par leurs aspects microscopiques et macroscopiques.

8. 1 Analyse macroscopique

8.1.1 Dénombrements des bactéries

Un comptage des colonies bactériennes a été effectué pour chaque dilution préparée à partir des trois échantillons de sol, ce comptage a permis de réaliser un dénombrement des bactéries, exprimé en unités formant colonie par gramme (UFC/g), afin d'estimer la concentration microbienne présente dans chaque sol.

8.2. Analyse microscopique

8.1.1. Coloration de Gram

La coloration de Gram a été réalisée, conformément au protocole décrit par **StatPearls (2024)**. Un frottis bactérien est d'abord préparé sur une lame propre, puis fixé à la chaleur par passage rapide dans la flamme.

Le frottis est ensuite recouvert de violet de gentiane pendant 1 minute, puis rincé doucement à l'eau. Après cette étape, la lame est traitée avec une solution de lugol pendant 1 minute pour fixer le colorant primaire. Puis une décoloration a été effectuée en appliquant de l'alcool ou un mélange alcool-acétone pendant 15 à 30 secondes, jusqu'à ce que l'écoulement devienne incolore.

La préparation est immédiatement rincée, puis contre-colorée avec de la fuchsine pendant 30 secondes à 1 minute. Après un dernier rinçage et séchage, une observation microscopique à différents grossissements a été établie. Ces observations ont permis de déterminer la forme, la taille et la coloration des cellules bactériennes, Gram positif en violet ou Gram négatif en rose.

9. Effet des isolats sur les plantes tests

Des graines de blé dur (*Triticum turgidum* subsp. *Durum*) variété Waha et de tomate cerise (*Solanum lycopersicum*) var. *cerasiforme* ont été utilisées pour évaluer l'effet des isolats sélectionnés sur leurs paramètres de germinations.

9.1. Désinfection des graines de tomate

Les graines de tomate ont été désinfectées par immersion dans une solution d'hypochlorite de sodium (eau de Javel) à 0,25 % pendant une minute, suivie de plusieurs rinçages avec de l'eau distillée stérile **(Trabelsi et al., 2011)**.

Les graines de blé ont été désinfectées à l'aide d'une solution d'hypochlorite de sodium, suivie de plusieurs rinçages à l'eau distillée stérile, puis inoculées séparément avec les trois isolats bactériens sélectionnés à savoir (SV6, TA3, SF1) ainsi qu'avec leur combinaison (SV6+TA3+SF1).

9.2. Inoculation des graines Graines de tomate

Après la désinfection, les grains de tomate ont été mis dans des boîtes de Petri qui contiennent un milieu GN contenant différentes concentrations de NaCl (0, 50, 100, 150 mM). Ensuite, les graines ont été inoculées avec trois isolats sélectionnés (SV6, TA3, SF1) ainsi qu'avec leur association. Elles ont été incubées à 30°C pendant plusieurs jours **(Trabelsi et al., 2011)**.

Après inoculation, les grains de blé ont été placés dans des boîtes contenant un support humide (papier filtre) stérile et soumis à un stress salin par application de solutions de NaCl stérile à des concentrations de 0 mM et 150 mM puis incubation à 30°C, afin d'évaluer leur germination et leur croissance **(Huang et al., 2022)**.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

1. Analyse physicochimique du sol

Le tableau démontre les résultats de l'analyse physico-chimique de quatre échantillons de sol ont été obtenus. Le taux de chaque paramètre a été déterminé comme suit :

Tableau 02 : Résultats de l'analyse physico-chimique de trois échantillons de sol.

	pH	C.E (mS/cm)	MO (%)	Corg (%)
Sol 1 (<i>Suaeda vera</i>)	7,80	9,78	15	8,7
Sol 2 (<i>Salicornia frusticosa</i>)	7,92	9,39	15,3	8,874
Sol 3 (<i>Tamarix Africana</i>)	8,67	9,59	11	6,38

1.1. Mesure du PH

Les pH mesurés des sols, variant entre 7,80 et 8,67, indiquent que les sols sont modérément à fortement alcalins, selon la classification du **Soil Survey Staff (2017)**. Le sol rhizosphérique de *Tamarix africana* présente une alcalinité plus marquée (pH = 8,75), ce qui peut favoriser le développement de bactéries alcalophiles. Ces résultats sont en accord avec ceux de Lauber et al. (2009), qui ont montré que le pH est l'un des principaux facteurs structurant les communautés bactériennes, avec une richesse maximale observée autour d'un pH de 7 à 8.

1.2. Mesure de conductivité électrique(C.E)

Selon **Rhoades et al. (1996)**, un sol est considéré comme salin lorsque la conductivité électrique de l'extrait saturé dépasse 4 mS/cm. Dans cette étude, les quatre sols présentent des valeurs supérieures à ce seuil, notamment le sol 2 (7,92 mS/cm), indiquant une forte salinité susceptible d'influencer la disponibilité des nutriments et la composition microbienne de la rhizosphère.

1.3 Dosage de la matière organique (MO)

Les résultats révèlent une teneur en matière organique élevée, pour les trois sols (jusqu'à 15%), indiquant une bonne fertilité potentielle. Selon **Walkley et Black (1934)**, une forte concentration en matière organique favorise l'activité microbienne et améliore la structure du sol.

2. Isolement des bactéries rhizosphérique

Pour l'isolement des bactéries rhizosphériques à partir de trois échantillons de sols différents, le milieu GN a été utilisé, après 24 heures d'incubation à 30 °C, une diversité morphologique marquée a été observée au niveau des colonies, notamment en termes de forme, de couleur, de taille et d'aspect de surface. Cette diversité traduit une richesse microbienne probablement liée aux caractéristiques spécifiques de chaque sol (**Sylvia, Fuhrmann, Hartel, & Zuberer, 2005**)



Photo 07: Isolement des bactéries rhizosphérique de trois sols.

2.1 Dénombrements des bactéries

Tableau 01 : Dénombrements des bactéries

Sol	Concentration (UFC/g)
Sol 1	3.11×10^5
Sol 2	4.8×10^4
Sol 3	2.8×10^5

3. Purification des isolats bactériens

Nous avons purifié 8 colonies provenant de chaque échantillon de sol, après une incubation à 30 °C pendant 24 heures, nous avons obtenu 17 colonies purifiées.

Aucune croissance n'a été observée pour les isolats SV1, SV5, SV7, SV8, TA7 et TA8

Une observation macroscopique des isolats a ensuite été réalisée, comme indiqué dans le tableau ci-dessous:

Tableau 03: Analyse macroscopique

Isolat	La forme	couleure	Texture	taille	Elevation	Bourdure	Opacite
SV2	Circulaire	Blanc	Lisse	Quelque millimetre	centre surélevé	lisse	Transparent
SV3	Circulaire	Orange	Lisse	Quelque millimetre	convexes	Lisse	opaques
SV4	Circulaire	Blanc	Lisse	Quelque millimetre	Plates	irréguliers	opaques
SV6	Circulaire	joune	Lisse	Quelque millimetre	Plates	irréguliers	opaques
SF1	Circulaires	Blanc	Lisse	Lisse	quelques millimètres	Lisse	Plates
SF2	Circulaires	Blanc	Lisse	quelques millimètres	Plates	Lisse	opaques
SF3	Circulaires	Blanc	Lisse	Petite taille	Plates	Lisse	Transparent
SF5	Circulaires	Blanc	Lisse	Petite taille	Plates	Lisse	Transparent
SF6	Circulaires	Blanc	Lisse	Petite taille	Plates	Lisse	Transparent
SF7	Circulaires	Blanc	Lisse	Petite taille	Plates	Lisse	Transparent
SF8	Circulaires	Jane	Lisse	Petite taille	Plates	Lisse	Jaune
TA1	Circulaires	Transparent	visqueuse	Petite taille	Plates	Lisse	Transparent
TA2	Circulaires	Transparent	visqueuse	Petite taille	Plates	Lisse	Transparent
TA3	Circulaires	Transparent	visqueuse	Petite taille	Plates	Lisse	Transparent
TA4	Circulaires	Transparent	visqueuse	Petite taille	Plates	Lisse	Transparent
TA5	Circulaires	Jaune Claire	mucoïde	Petite taille	Plates	Lisse	Transparent
TA6	Circulaire	Jaune Claire	mucoïde	Petite taille	Plates	Lisse	Transparent

4. Recherche d'activité améliorant la croissance des plantes

4.1. Production d'HCN

Parmi les isolats obtenus, 6 colonies ont produit du HCN, le résultat se manifeste par une coloration orange, dont l'intensité varie en fonction du taux de HCN produit (Photo 08)

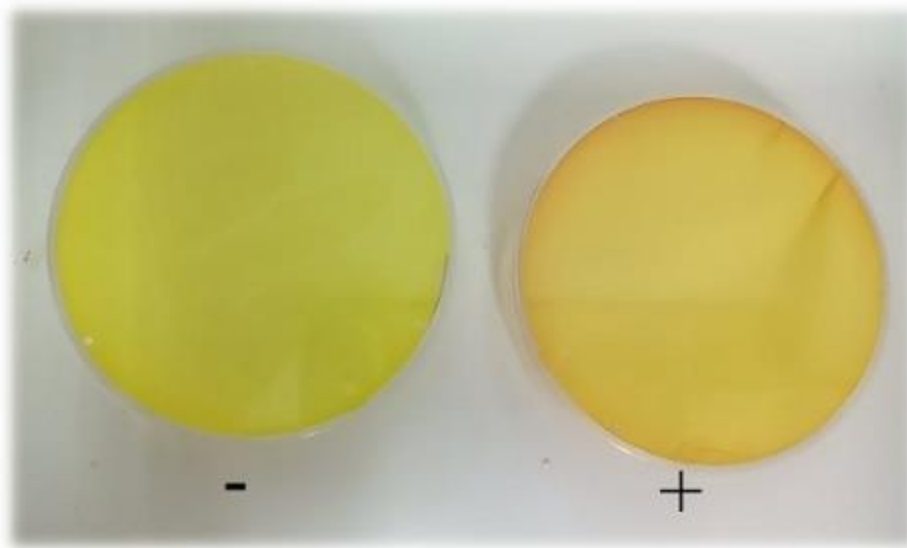


Photo 08: Test de production de HCN

Tableau 04 : Résultats de production d'HCN

		<i>Suaeda vera</i>				
Isolats		SV2	SV3	SV4	SV6	SV8
Production HCN		+	-	-	-	-

		<i>Tamarix africana</i>					
Isolats		TA1	TA2	TA3	TA4	TA5	TA6
Production HCN		-	+	+	+	+	+

	<i>Salicornia fruticosa</i> ,							
Isolats	SF1	SF2	SF3	SF4	SF5	SF6	SF7	SF8
Production HCN	-	-	-	-	-	-	-	-

À partir des résultats obtenus, il ressort que les isolats purifiés de la rhizosphère de *Tamarix africana* présentent une activité notable de production de HCN, contrairement aux bactéries rhizosphériques isolées de *Salicornia fruticosa* et *Suaeda vera*, dont la majorité n'a pas exprimé cette capacité. Ces observations suggèrent que *Tamarix africana* favorise l'établissement de communautés microbiennes plus actives en termes de biocontrôle, notamment via la synthèse de cyanure d'hydrogène ces résultats sont similaires avec ceux rapportés par **Bakelli et al. (2022)**, qui ont mis en évidence des souches endophytes associées à *Tamarix gallica* capables de produire du HCN et d'exercer un effet promoteur sur la croissance des plantes. De plus, la production de HCN présente des variations importantes selon les types de sol. Ces fluctuations sont probablement le reflet de la diversité des communautés microbiennes existantes. Il est possible que la forte production dans le Sol 3 (rhizosphère de *Tamarix africana*) soit due à une adaptation aux stress biotiques, ce qui correspond aux constatations de **Kumar et al. (2020)**.

4.2. Solubilisation du phosphore

À partir des résultats obtenus, nous avons observé que tous les isolats testés ne possèdent pas la capacité de solubilisation du phosphate, quel que soit le type de plante d'origine (*Salicornia fruticosa*, *Tamarix africana* ou *Suaeda vera*). Cette absence d'activité pourrait s'expliquer par plusieurs facteurs, notamment les conditions environnementales spécifiques aux milieux salins d'où proviennent ces plantes.

Nos résultats montrent une absence de solubilisation du phosphate, révélée par l'absence de formation d'un halo autour des colonies sur le milieu NBRIP. Ces observations concordent partiellement avec les travaux de **Gil et al. (2023)**, qui ont isolé 29 souches bactériennes de la

rhizosphère de *Salicornia fruticosa* dans des environnements hypersalins au Brésil, certaines ont démontré une activité de solubilisation du phosphate, tandis que d'autres en étaient totalement dépourvues.

Cependant ces résultats sont en fort décalage comparé aux recherches démontrant l'efficacité de souches telles que *Pseudomonas* dans la solubilisation du phosphore (Khan et al., 2014).

Selon Sritongon et al. (2022), la salinité élevée, caractéristique des milieux halophytes comme ceux de *Salicornia*, *Suaeda* et *Tamarix*, peut inhiber l'activité enzymatique des bactéries, en particulier celle des phosphatases, ce qui limite considérablement leur capacité à solubiliser le phosphate.

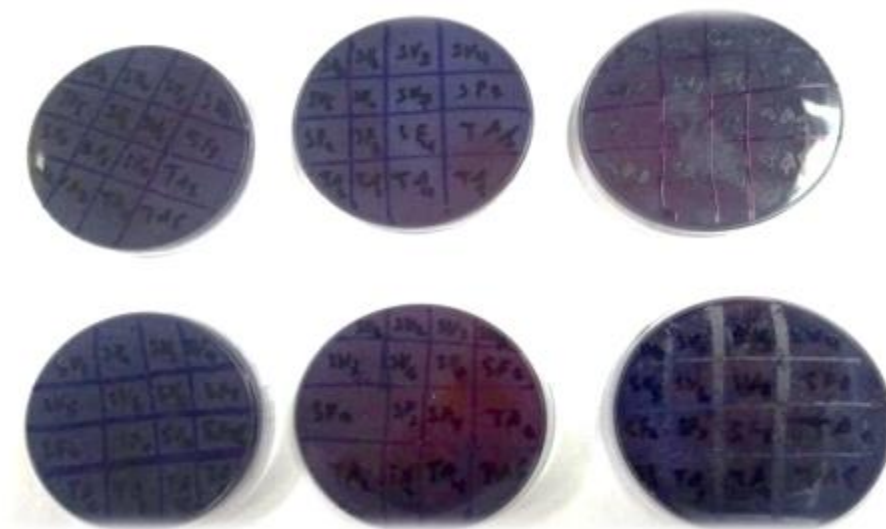


Photo 09: Test de solubilisation de phosphate.

Tableau 05: Résultats de solubilisation du phosphate

Isolats	<i>Suaeda vera</i>				
	SV2	SV3	SV4	SV6	SV8
Solubilisation du phosphate	-	-	-	-	-

	<i>Tamarix africana</i>					
Isolats	TA1	TA2	TA3	TA4	TA5	TA6
Solubilisation du phosphate	-	-	-	-	-	-

	<i>Salicornia fruticosa,</i>							
Isolats	SF1	SF2	SF3	SF4	SF5	SF6	SF7	SF8
Solubilisation du phosphate	-	-	-	-	-	-	-	-

4.3. Fixation d'azote :

D'après les résultats obtenus sur le milieu de Winogradsky, la majorité des isolats présentent une capacité de fixation de l'azote, à l'exception de quelques isolats qui se sont révélés négatifs.

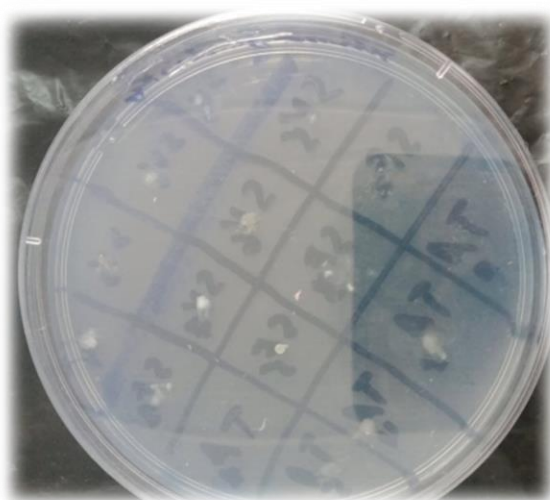


Photo 10: Test de fixation d'azote.

Tableau 06: Résultats de fixation d'azote

<i>Suaeda vera</i>				
Isolats	SV2	SV3	SV4	SV6
Fixation d'azote	+	+	+	+

<i>Tamarix africana</i>						
Isolats	TA1	TA2	TA3	TA4	TA5	TA6
Fixation d'azote	+	+	+	-	-	-

<i>Salicornia fruticosa</i>							
Isolats	SF1	SF2	SF3	SF4	SF5	SF6	SF7
Fixation d'azote	-	-	-	-	-	-	-

Nos résultats indiquent que la majorité des isolats rhizosphériques obtenus à partir de *Salicornia fruticosa*, *Suaeda vera* et *Tamarix africana* présentent une capacité de fixation de l'azote, comme en témoigne leur croissance sur le milieu de Winogradsky ces résultats sont en accord avec les travaux de **Esmailzadeh et al. (2019)** concernant *Suaeda vera*, isolant 316 bactéries endophytes fixatrices d'azote à partir des racines de différentes espèces de *Suaeda*, mettant en évidence la diversité des diazotrophes associés à ce genre.

4.4. Production d'acide indole 3-acétique

Concernant la production d'acide indole-3-acétique (AIA), deux souches, à savoir SV6 et TA3, se sont révélées positives, tandis que les autres isolats se sont montrés négatifs, comme indiqué dans le tableau ci-dessous.



Photo 11: Test de production d'AIA

Tableau 07 : Résultats de la Production d'AIA

<i>Suaeda vera</i>				
Isolats	SV2	SV3	SV4	SV6
Production d'AIA	-	-	-	+

<i>Tamarix africana</i>						
Isolats	TA1	TA2	TA3	TA4	TA5	TA6
Production d'AIA	-	-	+	-	-	-

<i>Salicornia fruticosa</i>							
Isolats	SF1	SF2	SF3	SF4	SF5	SF6	SF7
Production d'AIA	-	-	-	-	-	-	-

La production d'acide indole-3-acétique (AIA) a été observée chez deux isolats issus de plantes différentes, à savoir *Tamarix africana* et *Suaeda vera*. Ces résultats sont similaires à ceux rapportés par **Jha et al. (2012)** et concordent avec les travaux de **Kondrasheva et al. (2022)**, qui ont démontré la capacité de certaines bactéries rhizosphériques associées à ces plantes halophytes à produire de l'AIA.

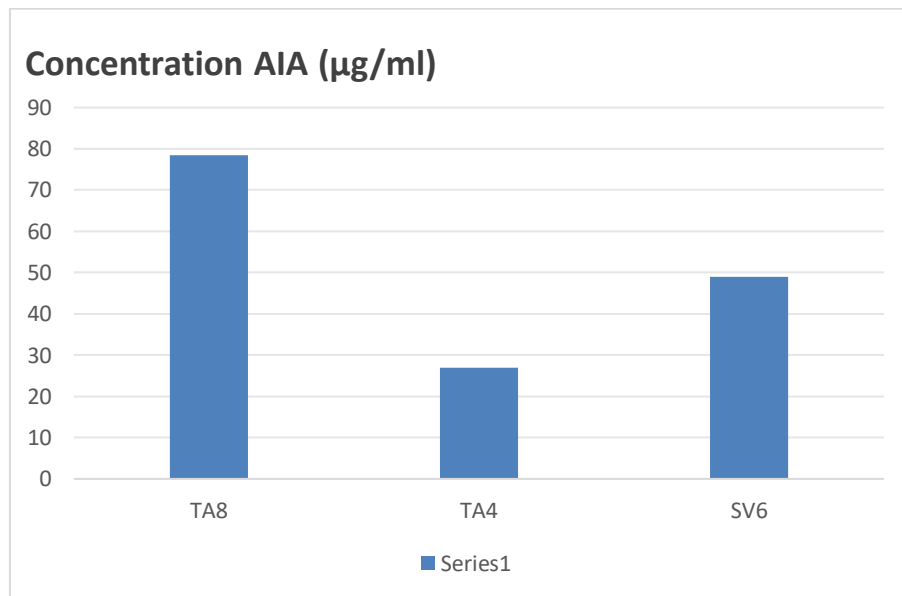


Figure 03: Concentration d'AIA produite par trois isolats (TA8, TA4, SV6).

Les résultats indiquent des divergences de concentration d'AIA produite par les trois souches (TA8 = 78.5 µg/ml, TA4 = 25 µg/ml, SV6 = 49 µg/ml). Selon **Duca et al. (2014)**, l'AIA est une hormone végétale vitale pour le développement des plantes. Cependant, selon les recherches de

Spaepen et Vanderleyden (2011), l'absence de celui-ci dans le Sol 2 pourrait être due à un déficit en précurseurs comme le tryptophane.

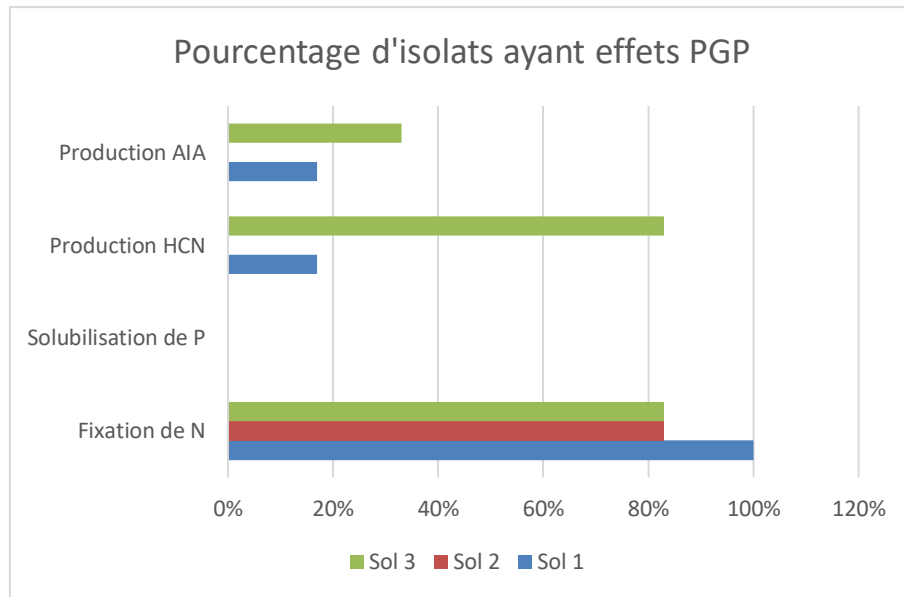


Figure 04 : Le graphique présente les pourcentages d'isolats bactériens ayant des effets PGP (Plant Growth Promotion) dans trois sols différents (Sol 1, Sol 2, Sol 3).

4.2.4. Effet antifongique

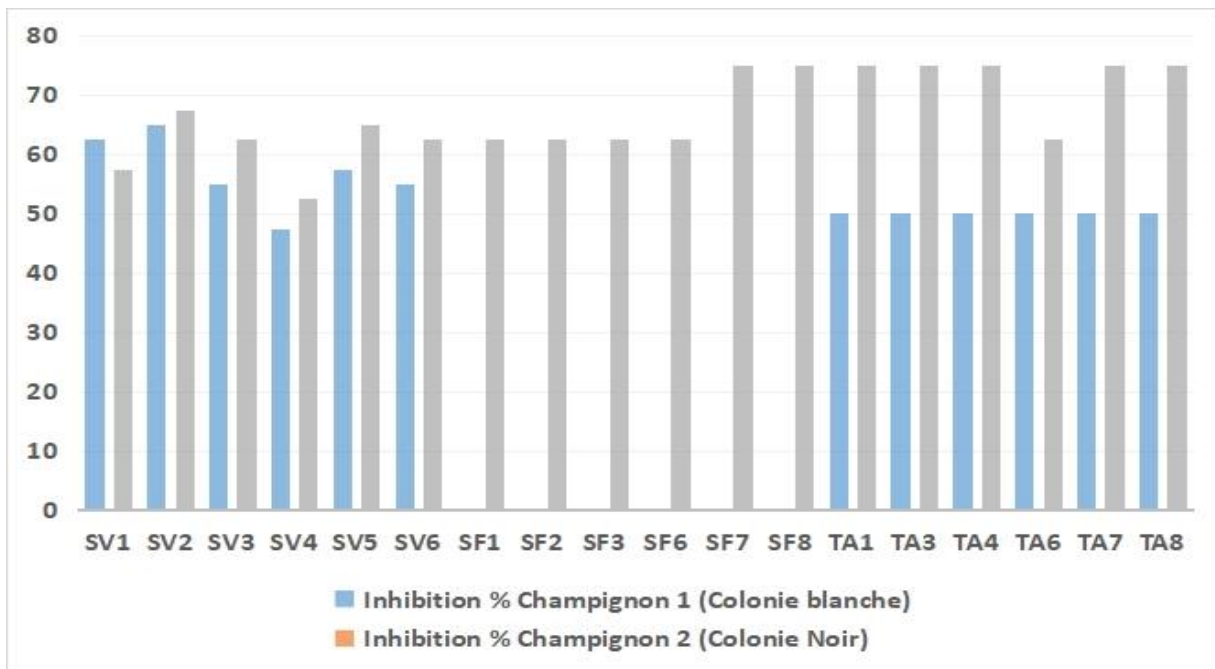


Figure 05 : Effets antifongiques des isolats en pourcentages d'inhibitions des champignons phytopathogènes.

En premier lieu, le diagramme met en évidence des profils d'inhibition spécifiques qui varient en fonction des isolats de champignons testés. En ce qui concerne les échantillons SV (de SV1 à SV6), on note une inhibition nette contre les deux types de champignons (35-67,5%), particulièrement avec SV2 qui affiche l'activité la plus élevée (65% et 67,5%). En revanche, les échantillons SF (SF1 à SF8) ne montrent aucun effet inhibiteur sur le Champignon 1 (0%), tandis qu'ils affichent une efficacité allant de modérée à élevée contre le Champignon 2 (62,5-75%). Cette caractéristique d'action fait écho aux constatations de **Khan et al. (2018)** concernant certains agents antifongiques à spectre restreint.

En ce qui concerne les échantillons TA (TA1 à TA8), ils montrent une inhibition stable (50% pour Champignon 1, 75% pour Champignon 2). Il convient de souligner que ces résultats sont similaires à ceux mentionnés pour certains fongicides naturels **Pinto et al., 2020** et pour des antifongiques synthétiques **FRAC, 2021**.

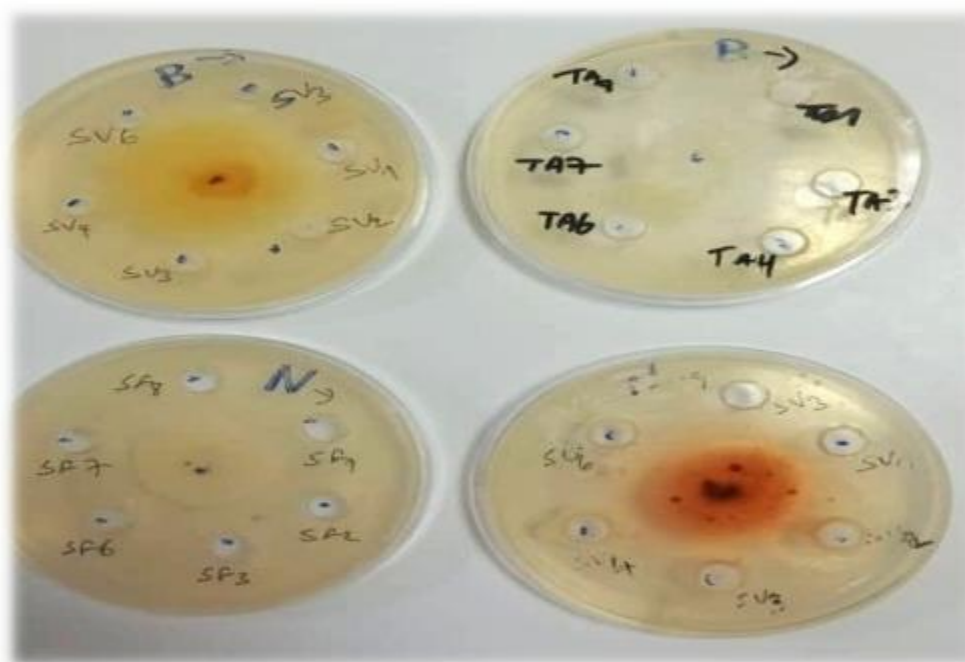


Photo 12 : photos présentant l'effet antifongique des isolats bactériennes TA,SV,SF contre les champignons blanc et noir .

5. Pré-identification des rhizobactéries

5.1. Analyse microscopique

5.1.1. Coloration de Gram

La coloration de Gram a été réalisée sur trois souches présentant un effet PGP (TA3, SF1, et SV6). L'observation au microscope optique, à l'objectif $\times 100$ à immersion, a révélé que les isolats SF1 et SV6 sont à Gram positif, tandis que TA3 est à Gram négatif.

5.2. Recherche de catalase

Le test de la catalase a été réalisé sur les trois souches TA3, SV6 et SF1. Les résultats ont montré que les isolats SV6 et SF1 sont catalases positives, tandis que TA3 est catalase négative.

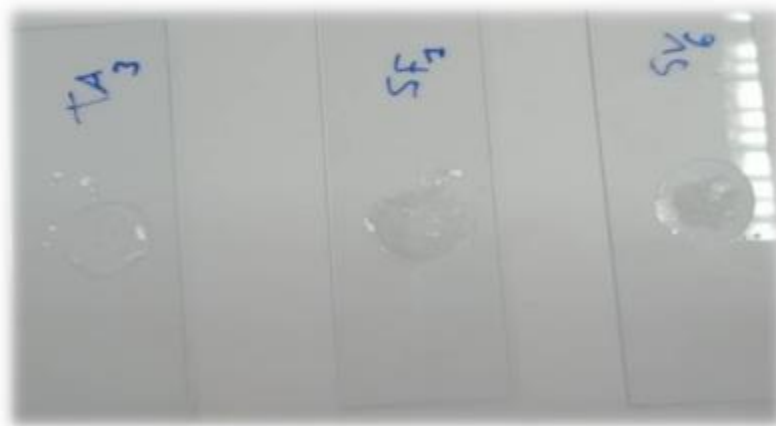


Photo 13: Test de catalase chez isolats (SF1,SV6 et TA3).

Isolat	Test catalase
SF1	+
SV6	+
TA3	-

5.3. Recherche d'oxydase

La recherche de l'enzyme oxydase a été réalisée sur les trois souches. Les résultats ont montré que les souches SV6 et SF1 sont oxydase positives, tandis que la souche TA3 est oxydase négative.



Photo 14 : Test d'oxydase sur les isolats SF1, SV6 et TA3

Isolat	Test oxydase
SF1	+
SV6	+
TA3	-

5.4. Caractérisation des paramètres biochimique

Pour l'identification des isolats ayant un effet PGP, une galerie biochimique a été utilisée.

Les résultats sont présentés dans le (**Tableau 8**)

Tableau 08: Tests des paramètres biochimiques chez les isolats sélectionnés (TA3, SF1, SV6)

Test Biochimique	TA3	SF1	SV6
ONPG	-	-	+
ADH	+	+	+
LDC	+	+	+
ODC	+	+	+
CIT	+	-	-
H ₂ S	-	-	-
URE	-	-	+
TDA	-	-	-
IND	-	-	-
VP	-	-	-
GEL	+	+	-
GLU	+	+	-
MAN	-	-	+
INO	-	-	-
SOR	-	+	+
RHA	+	+	+
SAC	-	-	-
MEL	+	+	-
AMY	+	+	+
ARA	+	+	+

L'analyse biochimique des souches isolées à partir des trois plantes halophytes a révélé des associations spécifiques avec des bactéries tolérantes au sel. Pour le sol de *Tamarix africana*, l'isolat TA3 présente des caractères se rapprochant de l'espèce *Pantoea agglomerans*, une

bactérie connue pour ses capacités à solubiliser le phosphate et à favoriser la croissance des plantes dans des sols arides et salins. Selon Zhao et al. (2021), *P. agglomerans* améliore la nutrition des plantes en conditions salines, ce qui la rend particulièrement adaptée aux environnements extrêmes. Cependant l'isolat prélevé de *Salicornia fruticosa* (SF1), correspond aux caractères du genre *Arthrobacter*. Ghnaya et al. (2023) ont montré que certaines espèces de *Arthrobacter* provenant de la rhizosphère de *Salicornia* sont capables de tolérer des concentrations élevées de sel tout en stimulant la croissance végétale. Enfin, pour *Suaeda vera*, l'isolat SV6 a été pré identifié comme appartenant au *Leifsonia*, une actinobactérie que Shao et al. (2019) ont également isolée à partir de plantes halophytes, démontrant ses capacités à fixer l'azote et à s'adapter aux environnements salins.

6. Test de la germination des graines en condition de stress salin :

6.1. Effets sur la germination des graines de tomate

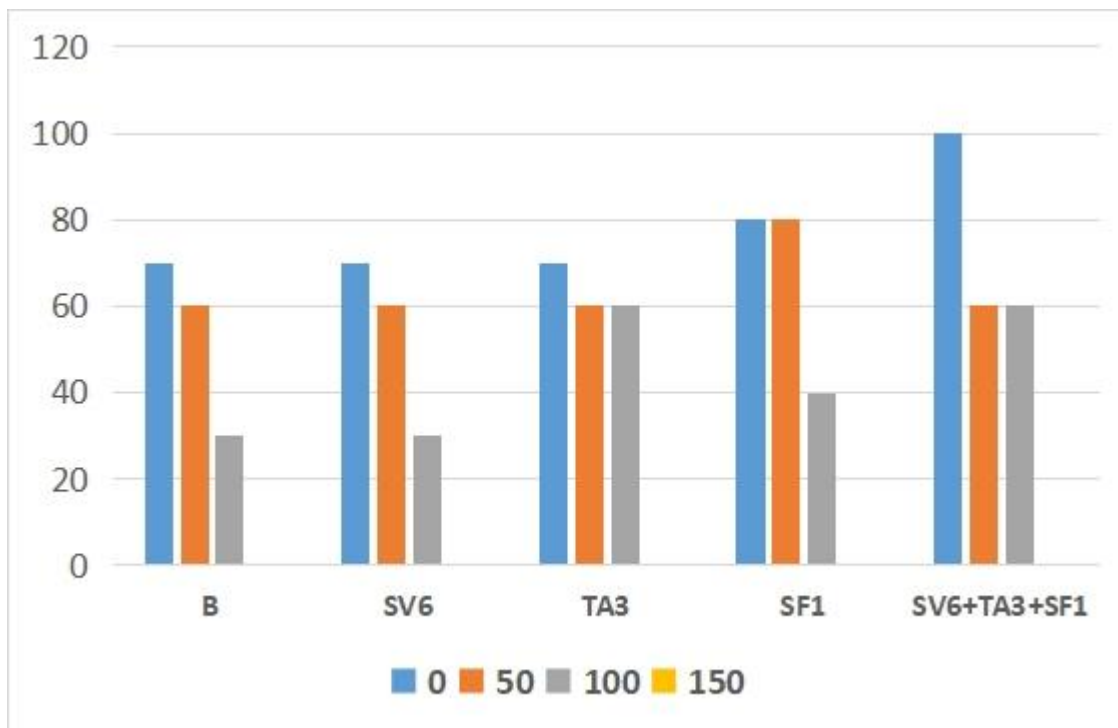


Figure 06: Pourcentage final de la germination des graines de tomate inoculée avec les isolats TA3, SV6, SF1

Les résultats ont démontré que comparativement avec le témoin (B), à 0 mM de NaCl l'isolat SF1 et la combinaison (SV6+TA3+SF1) ont montré un meilleur taux de germination. Cependant à une concentration de salinité modérée 50mM l'isolat SF1 à améliorer le taux de germination comparativement au témoin (B) et les autres traitements. Pour une concentration plus élevée 150mM une absence de germination totale des graines dans tous les traitements.

Des recherches comparables sur la tomate telle que celle de, **Alzahrani et al., 2019** démontrent que le stress salin (>100 mM NaCl) freine considérablement la germination. Cependant, l'emploi de bio-stimulants (tels que des bactéries PGPR ou des extraits d'algues) pourrait modérer cette influence. Par exemple, **Zhang et al. (2020)** ont observé une amélioration de 20 à 30 % de la germination sous contrainte saline grâce à l'utilisation de combinaisons de micro-organismes favorables.

L'association de SV6+TA3+SF1 paraît plus performante dans les conditions normales, indiquant une synergie entre ces éléments, ce qui soutient les recherches de **Ruzzi et Aroca (2015)** sur les consortiums microbiens.

6.1.1. Effets sur le poids frais et poids sec

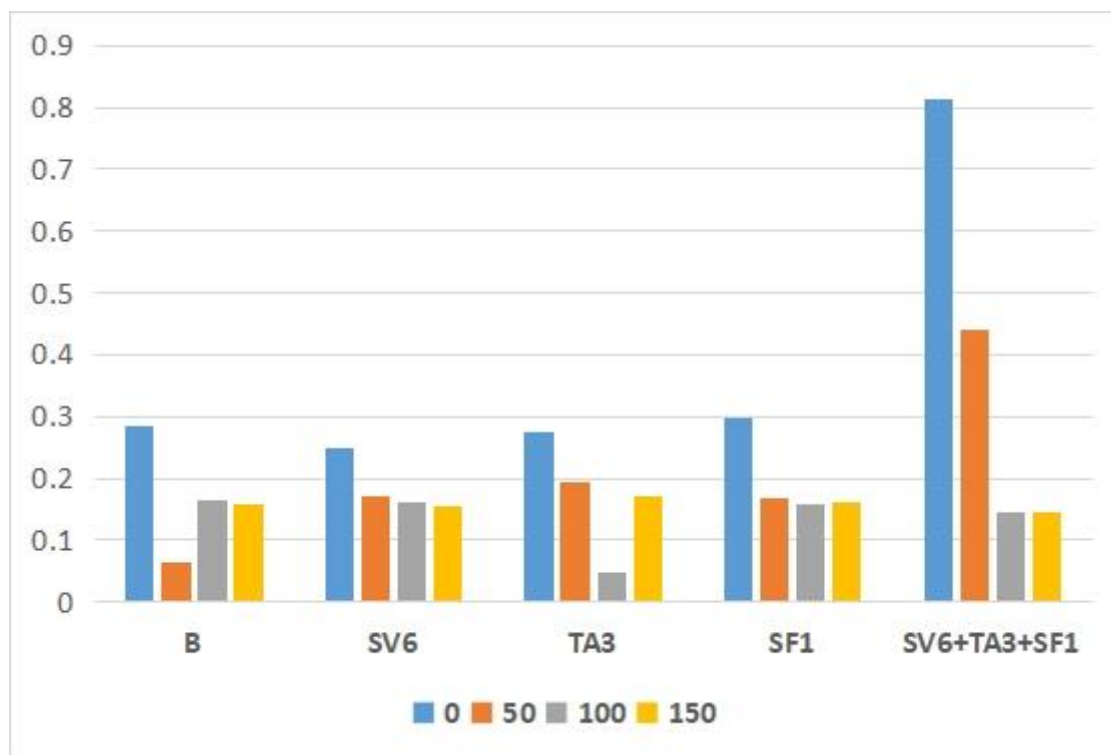


Figure 07 : Poids frais (g) de germination de graines de tomate inoculée avec les isolats TA3, SV6, SF1 dans différents conditions de stress salin

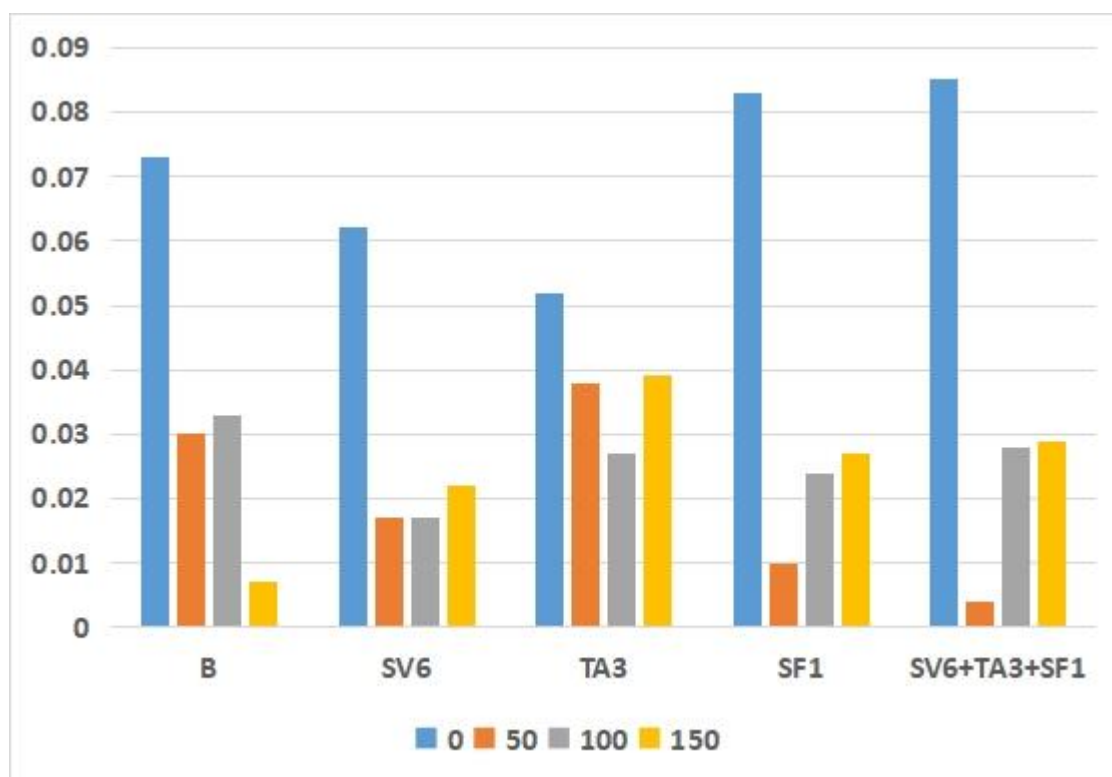


Figure 08 : Poids sec de graines de tomate pré germées et inoculées avec les isolats TA3, SV6, SF1 dans de différentes conditions de stress salin

Comparativement avec le témoin (B), l'inoculation avec les différents isolats ainsi que leur combinaison à améliorer le poids frais des graines prégermées dans les conditions normales (0 mM) NaCl ainsi que dans des conditions de stress modérés (50mM). Cependant pour une concentration plus élevée de NaCl pas de grande amélioration contestable. La combinaison de différents isolats a donné un meilleur résultat pour ce paramètre.

Cependant dans les conditions normales (0mM) NaCl, uniquement l'isolat SF1 ainsi que la combinaison d'isolats ont données une amélioration du poids sec. L'isolat TA3 a permis une augmentation du poids sec des graines dans un stress modéré (50mM) de NaCl. Par contre tous les isolats ainsi que leurs combinaisons ont donné un meilleur résultat dans des conditions importante de salinité (150mM) NaCl. Selon **Etesami et Beattie (2018)**, les bio-stimulants sont généralement bénéfiques pour la croissance végétative en cas de stress modéré, mais leur

performance décroît à mesure que la salinité s'accroît. La réduction significative du poids sec à 50 mM pour SV6+TA3+SF1 pourrait être attribuée à un coût métabolique élevé lié à la résistance au stress, comme l'ont signalé **Calvo et al. (2014)**.

6.1.2. Effets sur la longueur racinaire de tomate

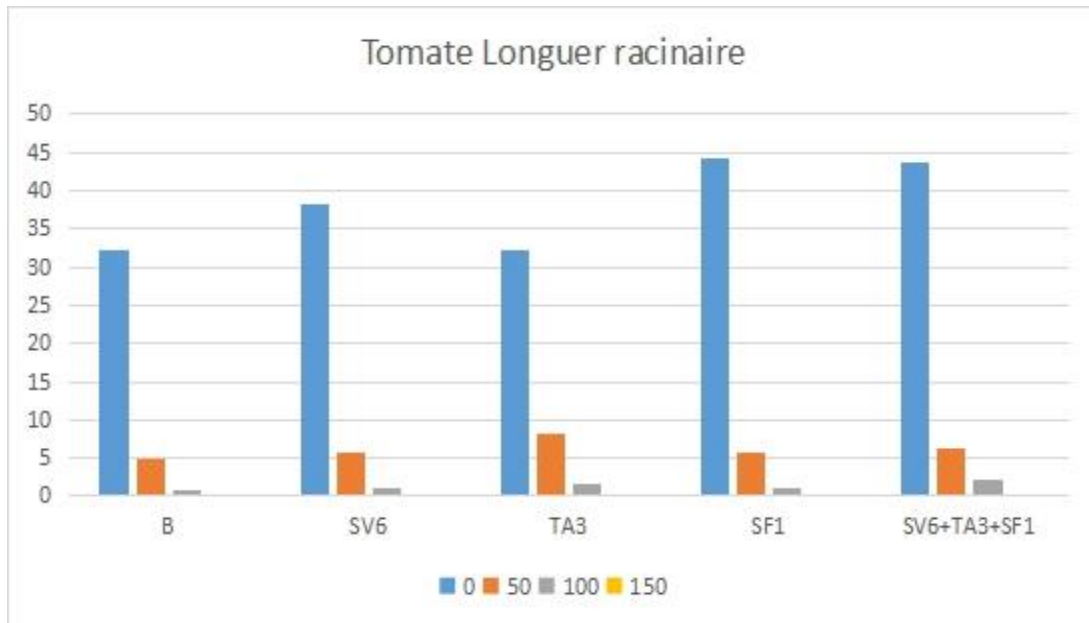


Figure09 : Longueur racinaire de tomate inoculée avec les isolats TA3 , SV6 , SF1 dans des conditions de stress salin différents.

Les résultats exprimés dans la figure démontrent qu'à 0 mM, l'inoculation avec SV6+TA3+SF1 présente la plus grande longueur racinaire (43,56 cm), suivie de près par SF1 seul (44,28 cm). À une concentration de 50 mM, toutes les valeurs diminuent (4.96–8.19 cm), cependant TA3 affiche une résilience relative (8.19 cm), la longueur des racines est un indice crucial de la résistance au stress. **Hasegawa** et ses collaborateurs (2000) soulignent que la salinité impacte d'abord les racines. La performance de TA3 à 50 mM peut indiquer une production d'auxines plus importante, comme le démontrent **Spaepen et Vanderleyden (2011)** pour certaines souches de bactéries.

6.1.3. Indice en vigueur de longueur (SLVI) et poids (SWVI) des semis (tomate pré germés)

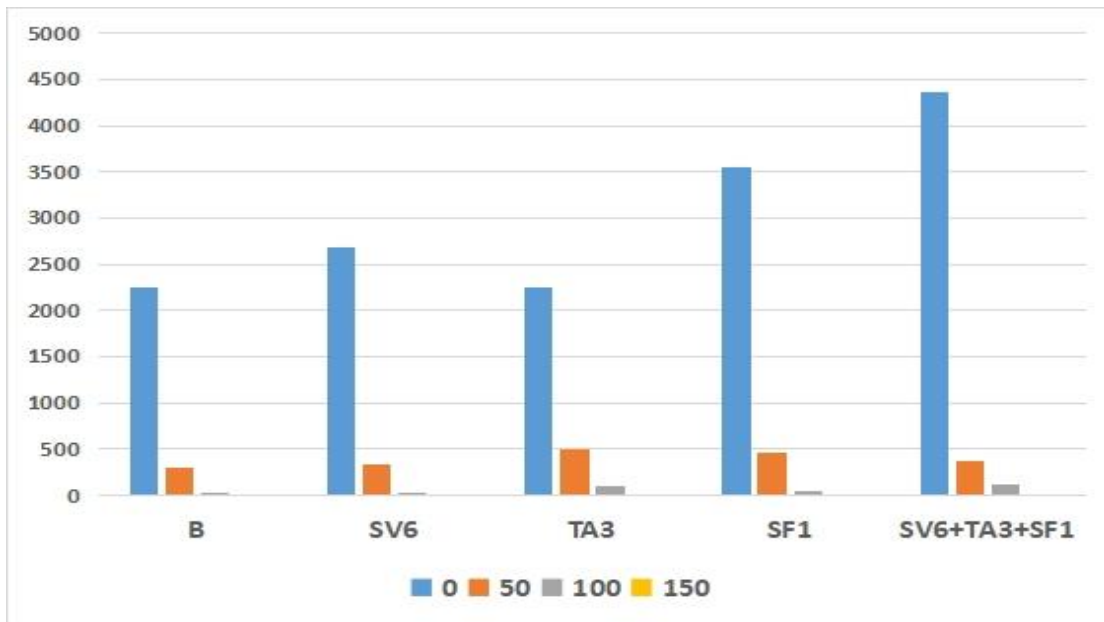


Figure10 : SLVI des graines de tomate inoculées avec les isolats (TA3, SV6, SF1)

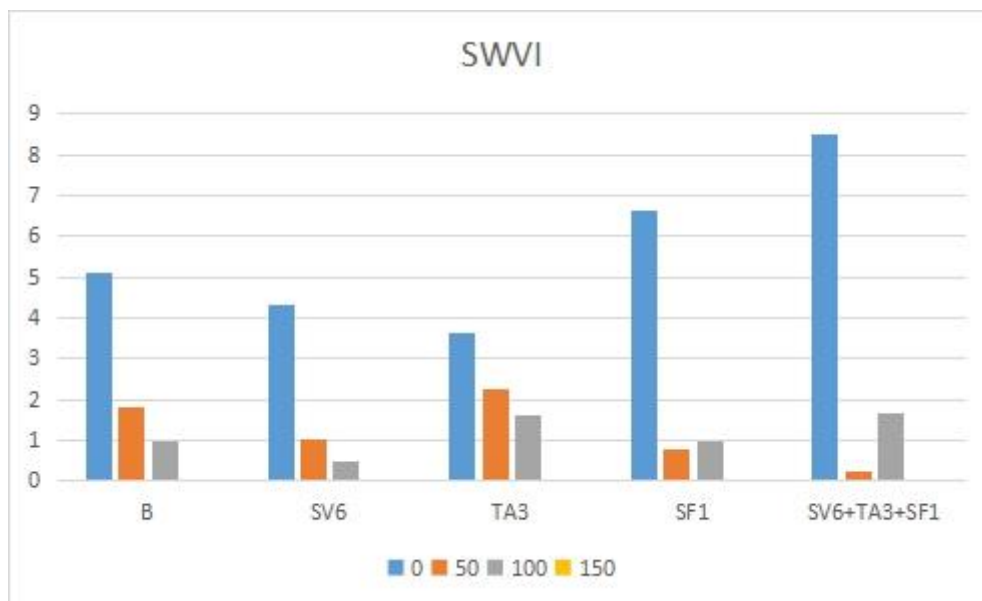


Figure11: SWVI des graines de tomate inoculées avec les isolats (TA3, SV6, SF1) différents conditions de stress salin

Les résultats montrent une variation significative de la vigueur des jeunes plants en fonction des conditions de salinité. D'une part, l'association de traitements affiche des résultats optimaux à 0 mM, attestant de son efficacité dans des conditions standards. Par ailleurs, on remarque un effondrement notable sous une forte pression saline (150 mM), excepté à 100 mM où elle dépasse légèrement les autres traitements, indiquant une plage d'efficacité dans des situations de stress modéré.

En ce qui concerne l'Indice de Vigueur du Poids Sec des Semis (SWVI), les résultats recueillis correspondent de près aux mesurages du poids sec, confirmant une fois de plus l'effet défavorable de la salinité sur l'accumulation de biomasse. Cette relation confirme les constatations de **Farhoudi et al. (2012)**, qui ont établi une connexion évidente entre les indices de robustesse et la capacité de survie dans des conditions difficiles.

6.2. Effet des isolats bactériens sur la germination des graines de blé

6.2.1 Effet sur le taux de germination total des graines de blé

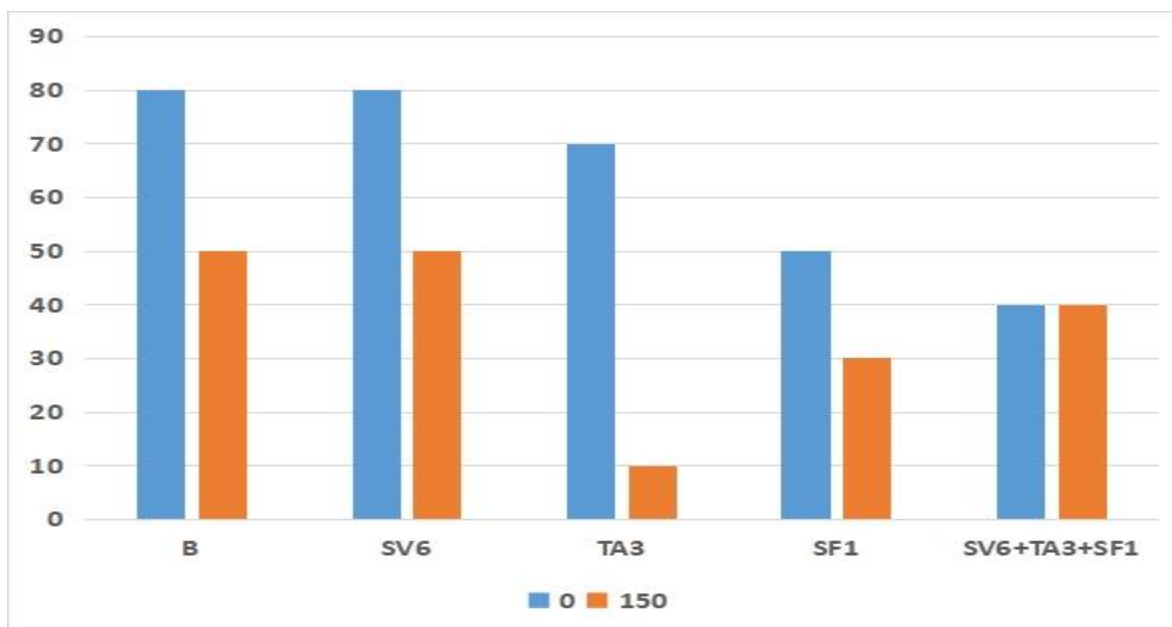


Figure12 : Effets des isolats (TA3, SV6, SF1) sur la germination des graines de blé dans différents conditions de stress salin

Les résultats ont montré que de manière générale, un stress salin de 150 mM diminue considérablement la germination, ce qui est cohérent avec les études précédentes comme celle d'**Almansouri et al. (2001)**, qui montrent que le stress osmotique entrave la germination. Néanmoins, à l'encontre de ce qui était anticipé, l'association SV6+TA3+SF1 ne stimule pas la germination, ce qui indique possiblement des interactions à la fois complexes et même antagonistes entre ces inoculations. Ce constat est en accord avec les résultats d'autres recherches similaires, comme celles de **Zhang et al. (2020)**, qui mettent en évidence que l'impact des combinaisons de bio-stimulants peut varier considérablement en fonction des souches utilisées.

6.2.2. Effet sur le poids frais et sec des graines de blé prégermées

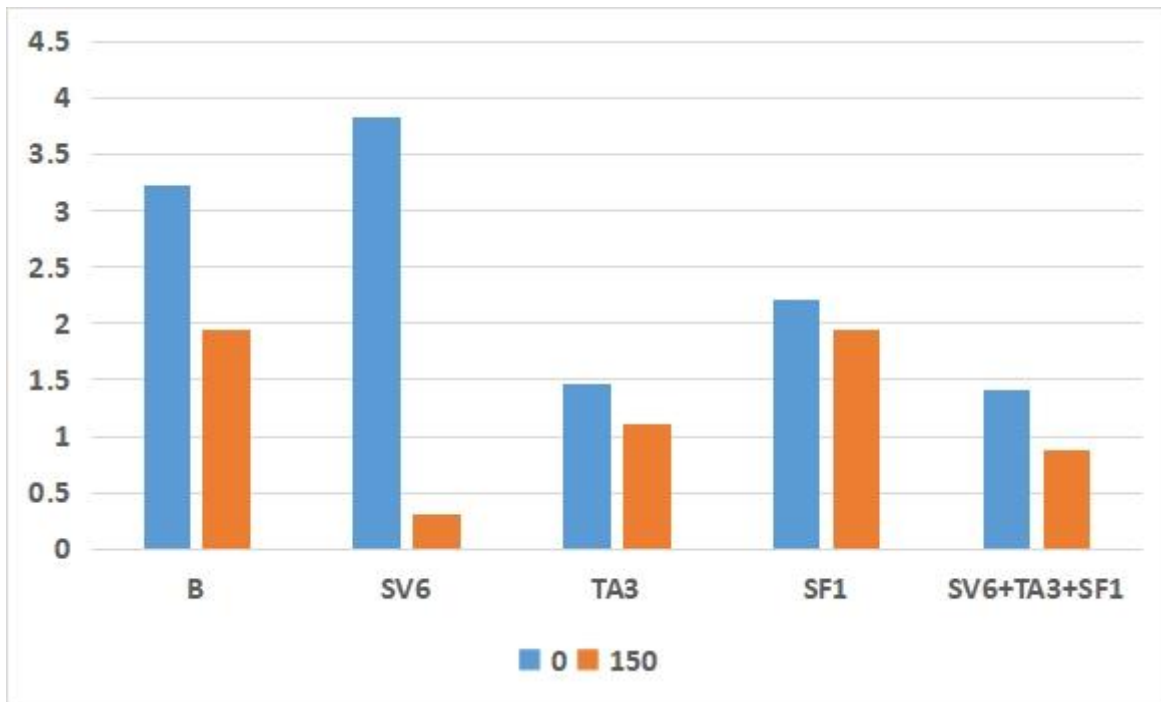


Figure 13 : Effets des isolats (TA3, SV6, SF1) sur le poids frais (g) des graines de blé prégermées dans différentes conditions de stress salin

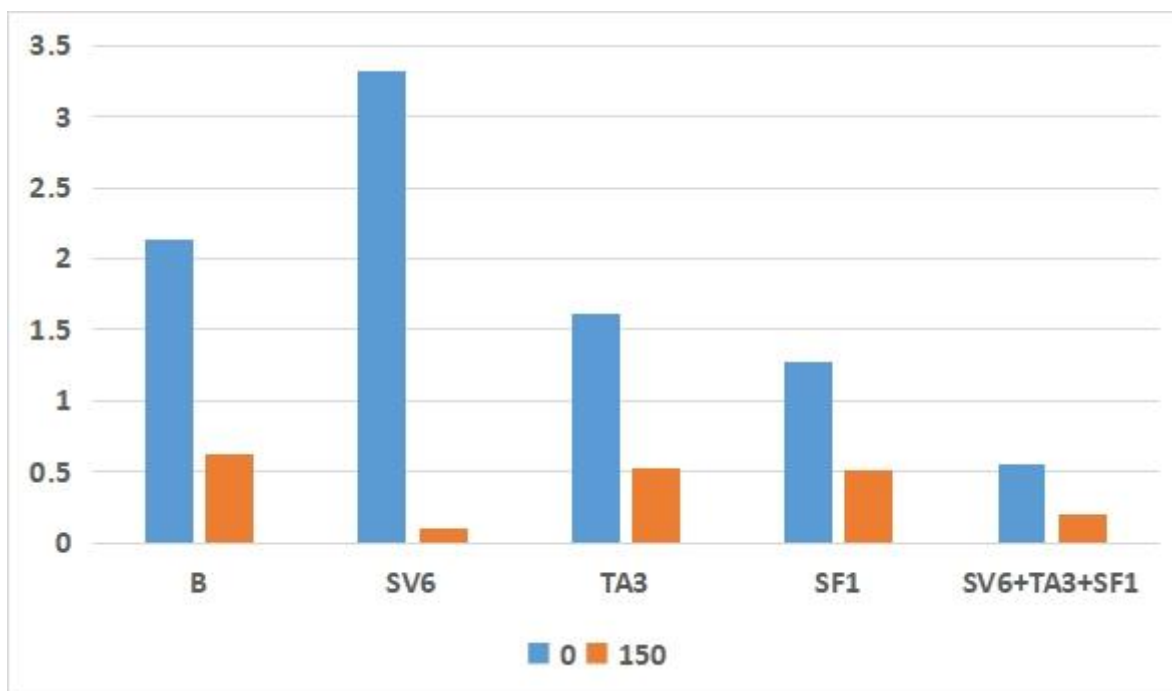


Figure 14 : Effets des isolats (TA3, SV6, SF1) sur le poids sec (g) des graines de blé pré germées dans différentes conditions de stress salin

L'inoculation des graines de blé avec les trois isolats (SV6, TA3, SF1) ainsi qu'à leurs combinaisons à donner une diminution du poids sec des graines par rapport au témoin que ce soit en présence ou en absence du stress salin. En outre, la performance supérieure modérée de SV6 pourrait suggérer un rôle stimulant pour la croissance, comparable à celui mentionné pour certaines PGPR en absence de stress salin. Effectivement, ces constatations soutiennent les conclusions de **Raza et al. (2021)** concernant l'effet du stress salin sur la biomasse.

6.2.3. Effet sur la longueur racinaire des graines de blé pré germées

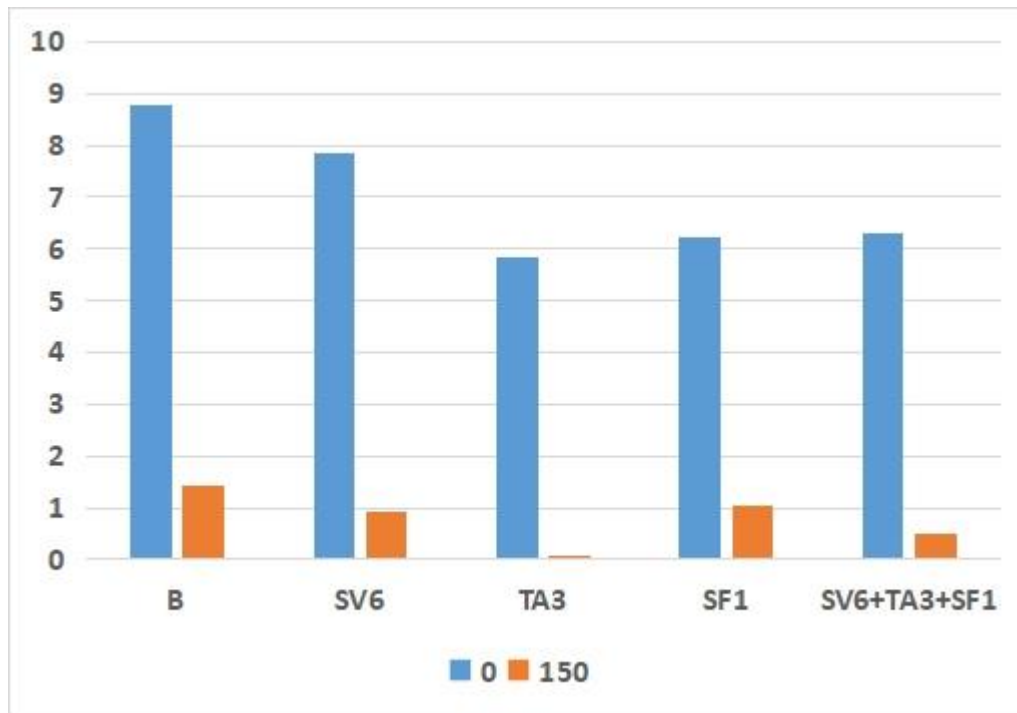


Figure 15 : Effets des isolats (TA3, SV6, SF1) sur la longueur racinaire (cm) des graines de blé pré germées dans différentes conditions de stress salin

Les résultats montrent une réduction importante de la longueur des racines en situation de stress salin. Pour illustrer, le témoin B voit sa mesure descendre de 104.973 mm à 0 mM alors qu'elle ne parvient qu'à 23.765 mm à 150 mM, mettant en évidence l'effet dévastateur du NaCl sur la croissance des racines.

De plus, on observe des différences marquées entre les différents traitements. Avec des diminutions de la longueur racinaire des graines de blé inoculées, ce qui explique un effet négatifs contestable pour ces isolats sur la germination des graines de blé par rapport au témoin Effectivement, la littérature atteste bien de cette sensibilité différentielle des racines au stress salin le démontrent les recherches de **Munns & Tester (2008)**.

6.2.4. Indice en vigueur de longueur (SLVI) et poids (SWVI) des semis (blé pré germés)

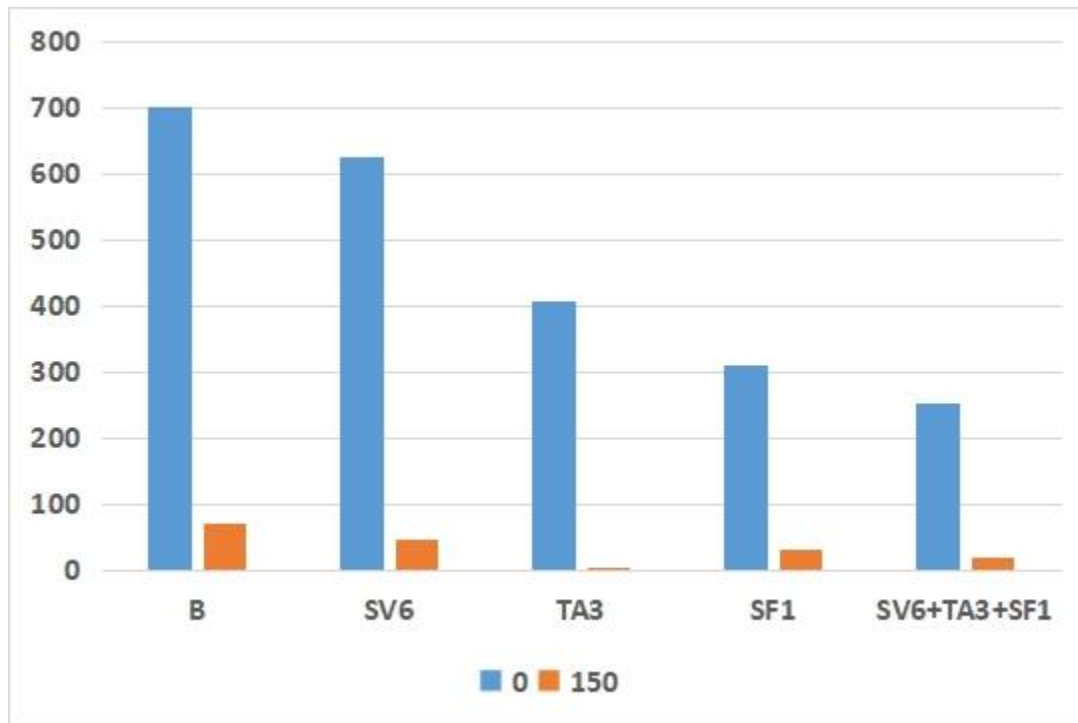


Figure 16 : SLVI des graines de blé inoculées avec les isolats (TA3, SV6, SF1) dans différents conditions de stress salin

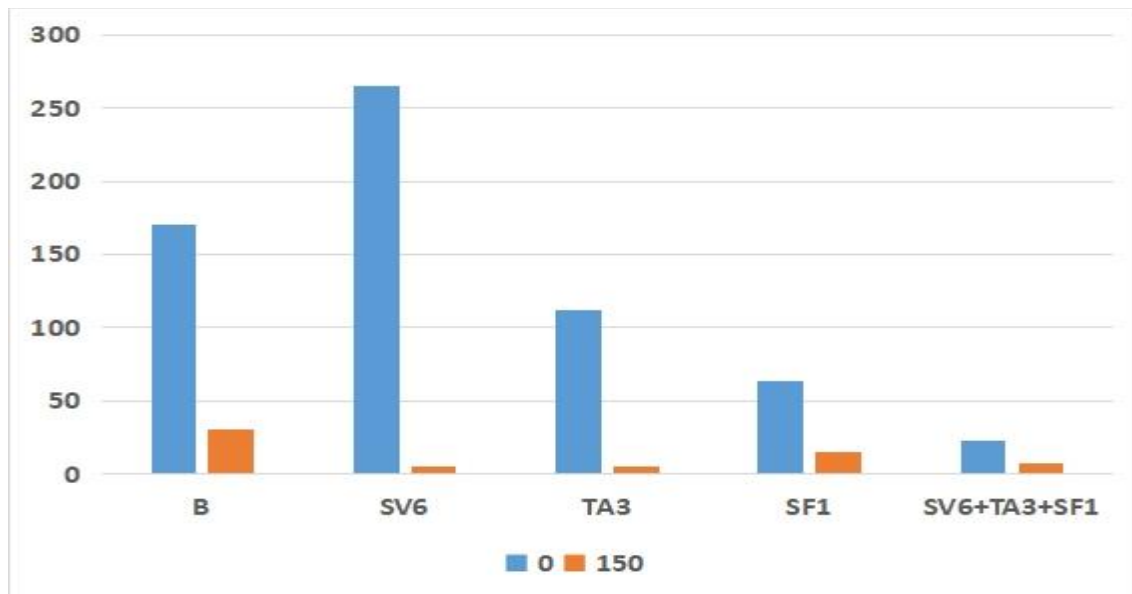


Figure 17: SWVI des graines de blé inoculées avec les isolats (TA3, SV6, SF1) dans différents conditions de stress salin

En ce qui concerne l'indice SLVI (Seedling Length Vigor Index), il illustre clairement la vitalité des jeunes plants. En effet, les taux particulièrement bas notés à 150 mM et valeur de 0 pour l'isolat TA3) indiquent un sérieux stress physiologique, attestant de l'effet néfaste du NaCl sur la croissance initiale des semis.

En même temps, l'étude de l'Indice de Vigueur du Poids des Semis (SWVI), qui établit un lien entre l'accumulation de matière sèche et le taux de germination, met en évidence des tendances notables. En particulier, l'association SV6+TA3+SF1 présente une résilience accrue, avec des valeurs variant de 6.3158 à 0 mM à 0.50169 à 150 mM. Ces observations s'opposent avec les recherches de **Hussain et al. (2019)**. Ce qui met en exergue la complexité des interactions entre divers agents biostimulants.

CONCLUSION

Conclusion :

Ce travail de recherche a examiné l'influence des rhizobactéries promotrices de la croissance des plantes sur la réduction du stress salin chez les végétaux, avec un focus particulier sur les bactéries rhizosphériques de trois espèces halophytes : *Salicornia fruticosa*, *Suaeda vera* et *Tamarix africana*. Les résultats de l'étude ont montré que ces bactéries, disposent de divers moyens pour stimuler la croissance des plantes, comme la fixation de l'azote, la synthèse d'acide indole-3-acétique (AIA), et la lutte contre les agents pathogènes grâce à la génération du cyanure d'hydrogène (HCN). Toutefois, leur aptitude à solubiliser le phosphate a montré des limites, probablement en raison des conditions de salinité extrêmes.

Des études sur la germination et la croissance de la tomate inoculée avec les isolats (TA3, SV6, SF1) et leur combinaison a (0, 50, 100 et 150mM) de NaCl, ainsi que du blé a (0.150mM) de NaCl , démontrent que ces derniers peuvent considérablement améliorer la résistance des plantes en condition de salinité notamment chez la tomate contrairement au blé. Le mélange des souches (SV6, TA3 et SF1) et la souche SF1 a révélé des résultats encourageants dans des conditions normales et a une salinité modérée, bien que leur efficacité soit réduite à 150 mM de NaCl . Ces découvertes mettent en évidence le potentiel des bactéries rhizosphérique comme outil biologique pour favoriser une agriculture durable surtout pour la tomate plantée dans les régions touchées par la salinité.

Pour résumer, cette recherche aide à mieux comprendre les interactions entre les plantes et les microorganismes en situation de stress abiotique. Les bactéries rhizosphériques isolée des plantes halophytes constituent une solution écologique aux produits chimiques, toutefois, des études supplémentaires s'imposent pour perfectionner leur emploi. Cela comprend l'analyse de leurs mécanismes d'action au niveau moléculaire et de tester d'autres plantes à intérêt agricole. Les futures applications envisagent aussi l'utilisation de ces bactéries dans des conditions pratiques (au champ) pour confirmer leur efficacité et leur stabilité dans divers environnements agricoles

RÉFÉRENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

Référence :

- Adam, A. (2008). Elicitation de la résistance systémique induite chez la tomate et le concombre et activation de la voie de la lipoxigénase par des rhizobactéries non-pathogènes. Université de Liege (Belgium).
- Arif, Y., Singh, P., Siddiqui, H., Bajguz, A., & Hayat, S. (2020). Salinity induced physiological and biochemical changes in plants: An omic approach towards salt stress tolerance. *Plant Physiology and Biochemistry*, 156, 64-77.
- Ashrafuzzaman, M., Hossen, F. A., Ismail, M. R., Hoque, A., Islam, M. Z., Shahidullah, S., & Meon, S. (2009). Efficiency of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) for the enhancement of rice growth. *African Journal of Biotechnology*, 8(7).
- Bhadreacha, P., & Bhawana. (2023). Metabolomics and Proteomics Behind Plant Growth-Promoting Potential of Rhizobacteria Metabolomics, Proteomes and Gene Editing Approaches in Biofertilizer Industry (pp. 289-323): Springer.
- Bhat, M. A., Kumar, V., Bhat, M. A., Wani, I. A., Dar, F. L., Farooq, I., . . . Jan, A. T. (2020). Mechanistic insights of the interaction of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) with plant roots toward enhancing plant productivity by alleviating salinity stress. *Frontiers in microbiology*, 11, 1952.
- Bordoloi, N. (2022). Role of Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) in Disease Management. *Organic Disease Management in Agricultural and Horticultural Crops*, 1.
- Chele, K. H., Tinte, M. M., Piater, L. A., Dubery, I. A., & Tugizimana, F. (2021). Soil salinity, a serious environmental issue and plant responses: A metabolomics perspective. *Metabolites*, 11(11), 724.
- Desrut, A. (2019). Mécanismes moléculaires impliqués dans les interactions entre *Arabidopsis thaliana* et des rhizobactéries bénéfiques: Implication du transport de sucres? , Université de Poitiers.
- El-Saadony, M. T., Saad, A. M., Mohammed, D. M., Fahmy, M. A., Elesawi, I. E., Ahmed, A. E., . . . Mosa, W. F. (2024). Drought-tolerant plant growth-promoting rhizobacteria alleviate drought stress and enhance soil health for sustainable agriculture: A comprehensive review. *Plant Stress*, 100632.
- Gao, Y., Zou, H., Wang, B., & Yuan, F. (2022). Progress and applications of plant growth-promoting bacteria in salt tolerance of crops. *International journal of molecular sciences*, 23(13), 7036.
- Goswami, D., Thakker, J. N., & Dhandhukia, P. C. (2016). Portraying mechanics of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): a review. *Cogent Food & Agriculture*, 2(1), 1127500.
- Gupta, B., & Huang, B. (2014). Mechanism of salinity tolerance in plants: physiological, biochemical, and molecular characterization. *International journal of genomics*, 2014(1), 701596.
- Gupta, G., Parihar, S. S., Ahirwar, N. K., Sneh, S. K., & Singh, V. (2015). Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): current and future prospects for development of sustainable agriculture. *J Microb Biochem Technol*, 7(2), 096-102.

- Hasan, A., Tabassum, B., Hashim, M., & Khan, N. (2024). Role of Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) as a Plant Growth Enhancer for Sustainable Agriculture: A Review. *Bacteria*, 3(2), 59-75.
- Hasanuzzaman, M., & Fujita, M. (2022a). Plant Responses and Tolerance to Salt Stress: Physiological and Molecular Interventions. *International Journal of Molecular Sciences*, 23, 4810. doi: 10.3390/ijms23094810
- Hasanuzzaman, M., & Fujita, M. (2022b). Plant responses and tolerance to salt stress: physiological and molecular interventions (Vol. 23, pp. 4810): Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- Iqbal, M. Z., Singh, K., & Chandra, R. (2024). Recent advances of Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) for eco-restoration of polluted soil. *Cleaner Engineering and Technology*, 100845.
- Jha, C. K., & Saraf, M. (2015). Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): a review. *Journal of Agricultural Research and Development*, 5(2), 108-119.
- Kenneth, O. C., Nwadike, E. C., Kalu, A. U., & Unah, U. V. (2019). Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): a novel agent for sustainable food production. *Am J Agric Biol Sci*, 14(35), 54.
- Khalid, A., Arshad, M., Shaharoona, B., & Mahmood, T. (2009). Plant growth promoting rhizobacteria and sustainable agriculture. *Microbial strategies for crop improvement*, 133-160.
- Kumawat, K. C., Sharma, B., Nagpal, S., Kumar, A., Tiwari, S., & Nair, R. M. (2023). Plant growth-promoting rhizobacteria: Salt stress alleviators to improve crop productivity for sustainable agriculture development. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1101862.
- Larbi, D., & Zourdani, S. (2022). Caractérisation des PGPR «Bactéries Promotrices de la Croissance des Plantes» isolées de la rhizosphère du blé dur (*Triticum durum*). *Université Mouloud Mammeri*.
- Madjida, B. (2022). PGPR et leur action sur les mécanismes de tolérance au stress abiotiques. *university center of abdalhafid boussouf-MILA*.
- Mishra, P., Mishra, J., & Arora, N. K. (2021). Plant growth promoting bacteria for combating salinity stress in plants—Recent developments and prospects: A review. *Microbiological Research*, 252, 126861.
- Otlewska, A., Migliore, M., Dybka-Stępień, K., Manfredini, A., Struszczyk-Świta, K., Napoli, R., . . . Pinzari, F. (2020). When salt meddles between plant, soil, and microorganisms. *Frontiers in Plant Science*, 11, 553087.
- Peng, Z., Wang, Y., Geng, G., Yang, R., Yang, Z., Yang, C., . . . Li, Z. (2022). Comparative analysis of physiological, enzymatic, and transcriptomic responses revealed mechanisms of salt tolerance and recovery in *Triticum*. *Frontiers in Plant Science*, 12, 800081.
- Shultana, R., Zuan, A. T. K., Naher, U. A., Islam, A. M., Rana, M. M., Rashid, M. H., . . . Hasan, A. K. (2022). The PGPR mechanisms of salt stress adaptation and plant growth promotion. *Agronomy*, 12(10), 2266.

- Singh, P. (2023). Plant growth promoting-rhizobacteria (PGPR): their potential as biofertilizer and biopesticide agents: A review. *Asian J. Adv. Agric. Res*, 22(1), 25-37.
- Solano, B. R., Maicas, J. B., & Mañero, F. G. (2008). Physiological and molecular mechanisms of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR). *Plant-bacteria interactions: Strategies and techniques to promote plant growth*. Weinheim: Wiley, 41-52.
- Zaib, M., Sandhu, M., Zar, M., Ghani, U., Rehman, A., Musharraf, M., . . . Raza, I. (2023). A Brief Review on Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR): A Key Role in Plant Growth. *Int Res J Educ Technol*, 5(07), 104-126.
- Baïkeche, A., & Boudjemai, A. (2023). *Etude de la microbiologie des sols contaminées par les hydrocarbures cas de la station-service de fréha*. Université Mouloud Mammeri.
- Baum, B. R. (1978). Taxonomy of the tribe Triticeae (Poaceae) using various numerical taxonomic techniques. III. Synoptic key to genera and synopses. *Canadian journal of botany*, 56(4), 374-385.
- Bellakhdar, J. (1997). *Contribution à l'étude de la pharmacopée traditionnelle au Maroc: la situation actuelle, les produits, les sources du savoir (enquête ethnopharmacologique de terrain réalisée de 1969 à 1992)*. Université Paul Verlaine-Metz.
- Berg, G., & Smalla, K. (2009). Plant species and soil type cooperatively shape the structure and function of microbial communities in the rhizosphere. *FEMS microbiology ecology*, 68(1), 1-13.
- Bosser, J. (2003). *Flore des Mascareignes: la Réunion, Maurice, Rodrigues. Pandanacées* (Vol. 190): IRD Editions.
- Boulos, M. S. (1999). *Chemins pour une approche poétique du monde: le roman selon JMG Le Clézio*: Museum Tusculanum Press.
- Cabi, S., Colmenarejo, S. G., Novikov, A., Konyushkova, K., Reed, S., Jeong, R., . . . Vecerik, M. (2019). Scaling data-driven robotics with reward sketching and batch reinforcement learning. *arXiv preprint arXiv:1909.12200*.
- Chandran, H., Meena, M., & Swapnil, P. (2021). Plant growth-promoting rhizobacteria as a green alternative for sustainable agriculture. *Sustainability*, 13(19), 10986.
- Chapman, A. J., & Foot, H. C. (1976). *Humour and laughter: Theory, research and applications*: Transaction publishers.
- Choudhari, R., & Birari, B. (2024). Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) in Disease Suppression (pp. 135-158).
- Davy, A., Bishop, G., Mossman, H., Redondo-Gómez, S., Castillo, J., Castellanos, E., . . . Figueroa, M. (2006). Biological flora of the British isles: *Sarcocornia perennis* (Miller) AJ Scott. *Journal of Ecology*, 94(5), 1035-1048.
- de Andrade, L. A., Santos, C. H. B., Frezarin, E. T., Sales, L. R., & Rigobelo, E. C. (2023). Plant growth-promoting rhizobacteria for sustainable agricultural production. *Microorganisms*, 11(4), 1088.

- Djebaili, R., Kitouni, M., & Del Gallo, M. *Criblage des souches d'actinobactéries pour leurs pouvoirs PGPR*. Université Frères Mentouri-Constantine 1.
- Dobbelaere, S., Croonenborghs, A., Thys, A., Vande Broek, A., & Vanderleyden, J. (1999). Phytostimulatory effect of *Azospirillum brasilense* wild type and mutant strains altered in IAA production on wheat. *Plant and soil*, 212(2), 153-162.
- Egamberdieva, D., Wirth, S. J., Alqarawi, A. A., Abd_Allah, E. F., & Hashem, A. (2017). Phytohormones and beneficial microbes: essential components for plants to balance stress and fitness. *Frontiers in microbiology*, 8, 2104.
- Gao, Y., Zou, H., Wang, B., & Yuan, F. (2022). Progress and applications of plant growth-promoting bacteria in salt tolerance of crops. *International journal of molecular sciences*, 23(13), 7036.
- Gaskin, J. F., & Schaal, B. A. (2002). Hybrid *Tamarix* widespread in US invasion and undetected in native Asian range. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(17), 11256-11259.
- Haas, D., & Défago, G. (2005). Biological control of soil-borne pathogens by fluorescent pseudomonads. *Nature reviews microbiology*, 3(4), 307-319.
- Jha, C. K., & Saraf, M. (2015). Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): a review. *Journal of Agricultural Research and Development*, 5(2), 108-119.
- Kadereit, G., Borsch, T., Weising, K., & Freitag, H. (2003). Phylogeny of *Amaranthaceae* and *Chenopodiaceae* and the evolution of C4 photosynthesis. *International journal of plant sciences*, 164(6), 959-986.
- Kerbab, S., Silini, A., Chenari Bouket, A., Cherif-Silini, H., Eshelli, M., El Houda Rabhi, N., & Belbahri, L. (2021). Mitigation of NaCl stress in wheat by rhizosphere engineering using salt habitat adapted PGPR halotolerant bacteria. *Applied Sciences*, 11(3), 1034.
- Kloepper, J. W., Leong, J., Teintze, M., & Schroth, M. N. (1980). *Pseudomonas* siderophores: a mechanism explaining disease-suppressive soils. *Current microbiology*, 4, 317-320.
- Ksouri, R., Ksouri, W. M., Jallali, I., Debez, A., Magné, C., Hiroko, I., & Abdelly, C. (2012). Medicinal halophytes: potent source of health promoting biomolecules with medical, nutraceutical and food applications. *Critical reviews in biotechnology*, 32(4), 289-326.
- Ongena, M., & Jacques, P. (2008). *Bacillus* lipopeptides: versatile weapons for plant disease biocontrol. *Trends in microbiology*, 16(3), 115-125.
- Pieterse, C. M., Zamioudis, C., Berendsen, R. L., Weller, D. M., Van Wees, S. C., & Bakker, P. A. (2014). Induced systemic resistance by beneficial microbes. *Annual review of phytopathology*, 52(1), 347-375.
- Shahid, M. A., Sarkhosh, A., Khan, N., Balal, R. M., Ali, S., Rossi, L., . . . Garcia-Sanchez, F. (2020). Insights into the physiological and biochemical impacts of salt stress on plant growth and development. *Agronomy*, 10(7), 938.
- Singh, R. P., & Jha, P. N. (2017). The PGPR *Stenotrophomonas maltophilia* SBP-9 augments resistance against biotic and abiotic stress in wheat plants. *Frontiers in microbiology*, 8, 1945.

- Spaepen, S., Versées, W., Gocke, D. r., Pohl, M., Steyaert, J., & Vanderleyden, J. (2007). Characterization of phenylpyruvate decarboxylase, involved in auxin production of *Azospirillum brasilense*. *Journal of Bacteriology*, 189(21), 7626-7633.
- Ungar, I. (2023). *Ecophysiology of Vascular Halophytes*.
- Ventura, Y., & Sagi, M. (2013). Halophyte crop cultivation: The case for *Salicornia* and *Sarcocornia*. *Environmental and Experimental Botany*, 92, 144-153.
- Villar, C., & David, M. (2014). La résilience, un outil pour les territoires. *Séminaire IT-GO Rosko*, 68.
- Lee, J., Huh, N., Hong, J. H., Kim, B. S., Kim, G.-H., & Kim, J.-J. (2012). The antagonistic properties of *Trichoderma* spp. inhabiting woods for potential biological control of wood-damaging fungi. *Holzforschung*, 66(7), 883-887.
- Lemmen, S., Häfner, H., Zolldann, D., Stanzel, S., & Lütticken, R. (2004). Distribution of multi-resistant Gram-negative versus Gram-positive bacteria in the hospital inanimate environment. *Journal of Hospital Infection*, 56(3), 191-197.
- Pan, J., Peng, F., Xue, X., You, Q., Zhang, W., Wang, T., & Huang, C. (2019). The growth promotion of two salt-tolerant plant groups with PGPR inoculation: a meta-analysis. *Sustainability*, 11(2), 378.
- Sylvia, D. M., Fuhrmann, J. J., Hartel, P. G., & Zuberer, D. A. (2005). *Principles and applications of soil microbiology*: Pearson.

ANNEXE

Annexe 01 : les milieux de culture et réactifs

Milieu NBRIP:

Glucose	2,5 g
MgCl ₂ ·6H ₂ O	1,25 g
KCl	0,05 g
Agar	3,75 g (gélose)
pH 7	7
Glucose	2,5 g
Ca ₃ (PO ₄) ₂	1,25 g
MgSO ₄ ·7H ₂ O	0,0625 g
(NH ₄) ₂ SO ₄	0,025 g
Eau distillée	250 mL
Ca ₃ (PO ₄) ₂	1,25 g

Winogradsky N-free

Matière organique (saccharose ou glucose)	10g/l
Agar	20g/l
CaCO ₃	Trace
Solution de sel concentrée	5ml/l

Milieu TSA pour isolement

Tryptone	15 g
Soytone (ou peptone de soja)	5 g
Chlorure de sodium (NaCl)	5 g
Agar	15 g
Eau distillée	500 ml

Milieu pour la production de HCN :

Préparez	1L de Gélose nutritive dans un flacon de 1 litre
Ajoutez Glycine	4,4 g/L
Ajuster pH	7

Composition du milieu pour tester la production d'AIA

Bouillon Luria-Bertani (LB) 500ml liquide	500ml liquide
Peptone	5 g
extrait de levure,	2,5 g
NaCl	5 g
l'eau distillée.	500 ml
Tryptophane	50 mg
Ajuster pH	7

Annexe 02 : Analyse physicochimiques du sol

	PH			C.E			m2	MO(%)	Corg (%)
Sol 1	7.70	7.85	7.84	9.96	9.65	9.74	8,501	15	8,7
Sol 2	7.90	7.93	7.94	9.22	9.41	9.53	8,47	15,3	8,874
Sol 3	8.75	8.64	8.63	10.06	8.84	9.87	8,9	11	6,38
Sol 4	7.83	7.83	7.83	16.31	17.37	17.37	7,9	21	12,18

Calcul de la matière organique (MO) :

$$MO(\%) = (m1 - m2) / m1 \times 100$$

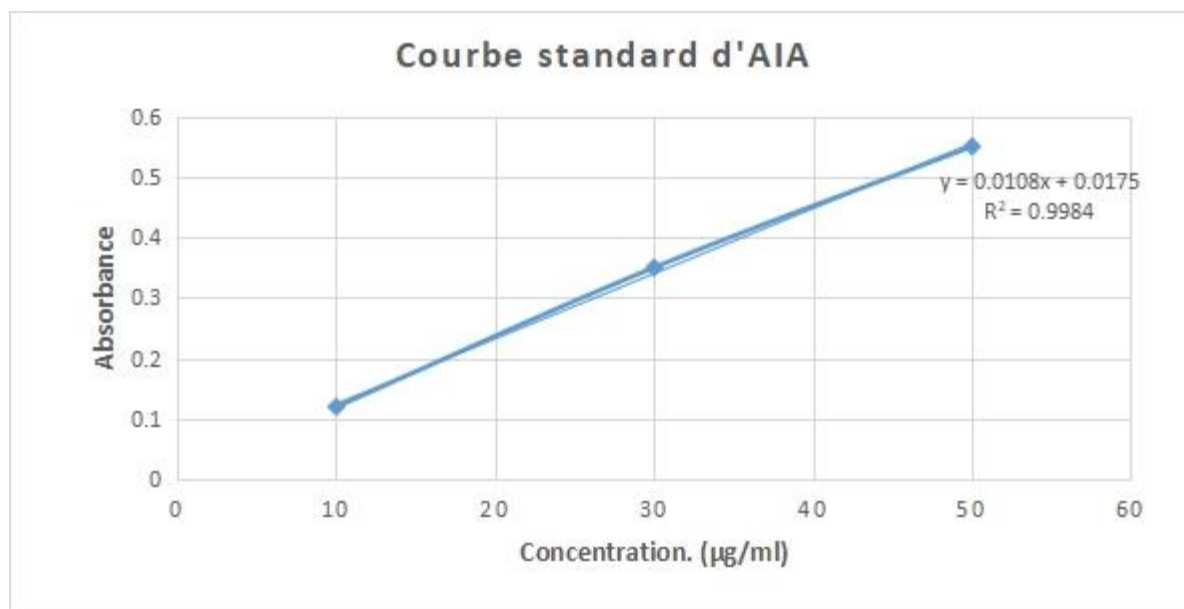
m1 = masse de l'échantillon sec avant calcination (g) = 10g

m2 = masse de l'échantillon après calcination (g)

$$Corg(\%) = MO(\%) \times 0.58$$

Annexe 03 :

Le dosage de l'acide indole-3-acétique (AIA) a été réalisé par spectrophotométrie, et les résultats ont été organisés sous forme de courbe d'étalonnage afin de déterminer la concentration recherchée (x).



La courbe montre une relation linéaire entre la concentration (X) et l'absorbance, indiquant que l'absorbance augmente avec l'augmentation de la concentration de la substance. L'équation obtenue $=0.0115X+0.05$, permet d'analyser des échantillons inconnus en calculant leur concentration à partir des valeurs d'absorbance mesurées. Par exemple, lorsque l'absorbance est de 0.25, la concentration correspondante est calculée à 21.30ug/ml . Cette méthode est une approche efficace et précise pour déterminer les concentrations de divers composés dans les analyses chimiques ou biologiques

Annexe 04 : Paramètres de germination

Germination du blé : le jour 4

Pourcentage de germination finale : FGP

Souche	0	150
B	10/10	5/10
SF1	5/10	2/10
SV6	7/10	5/10
TA3	7/10	2/10
SF1 + SV6 +TA3	3/10	5/10

Le jour 6 :

Souche	0	50
B	10/10	7/10
SF1	5/10	3/10
SV6	7/10	5/10
TA3	7/10	2/10
SF1+SV6+TA3	3/10	5/10

$$\text{GRI (B)} = 17/4 + 17/6 = 7.08$$

$$\text{GRI (SF1)} = 7/4 + 8/6 = 3.08$$

$$\text{GRI (SV6)} = 12/4 + 12/6 = 5$$

$$\text{GRI (TA3)} = 9/4 + 9/6 = 3.75$$

$$\text{GRI (SF1 + SV6 +TA3)} = 8/4+8/6 =3.33$$

$$\text{SLVI (B)} = 65490$$

$$\text{SLVI (SF1)} =13552$$

$$\text{SLVI (SV6)} = 29500$$

$$\text{SLVI (TA3)} = 18000$$

$$\text{SLVI (SF1 + SV6 +TA3)} = 14319$$

$$\text{SWVI (B)} = 1947.708$$

$$\text{SWVI (SF1)} =655.116$$

$$\text{SWVI (SV6)} = 1709$$

$$\text{SWVI (TA3)} = 797.625$$

$$\text{SWVI (SF1 + SV6 +TA3)} = 251.748$$

Germination de la tomate : le jour2

Pourcentage de germination finale : FGP

Souche	0	50	100	150
B	10/10	8/10	6/10	0/10
SF1	7/10	4/10	2/10	0/10
SV6	5/10	4/10	0/10	0/10
TA3	4/10	5/10	2/10	0/10
SF1 + SV6 +TA3	10/10	4/10	1/10	0/10

Le jour 6

Souche	0	50	100	150
B	10/10	6/10	2/10	0/10
SF1	8/10	7/10	2/10	0/10
SV6	5/10	6/10	3/10	0/10
TA3	6/10	6/10	2/10	0/10
SF1 + SV6 +TA3	10/10	6/10	5/10	0/10

$$\text{GRI (B)} = \text{G2/2} + \text{G6/6} = 18/2 + 18/6 = 12$$

$$\text{GRI (SF1)} = 13/2 + 17/6 = 9.33$$

$$\text{GRI (SV6)} = 9/2 + 14/6 = 6.83$$

$$\text{GRI (TA3)} = 11/2 + 14/6 = 7.83$$

$$\text{GRI (SF1 + SV6 + TA3)} = 14/2 + 21/6 = 10.5$$

$$\text{SWVI (B)} = 171.7$$

$$\text{SWVI (SF1)} = 134.352$$

$$\text{SWVI (SV6)} = 80.594$$

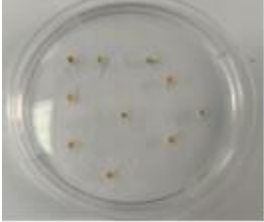
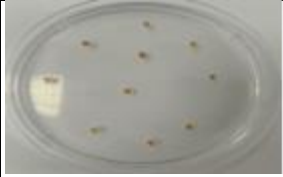
$$\text{SWVI (TA3)} = 396.981$$

$$\text{SWVI (SF1 + SV6 + TA3)} = 153.3$$

Annexe 05: Résultats de l'Effet des souches bactériennes sur la germination en condition de stress salin

Impact des souches bactériennes sur la germination de la tomate :

			
B(0)	B(50)	B(100)	B(150)
			
Combine(0)	Combine (50)	Combine (100)	Combine (150)

			
TA3(0)	TA3(50)	TA3(100)	TA3(150)
			
SF1(0)	SF1(50)	SF1(100)	SF1(150)
			
SV6(0)	SV6(50)	SV6(100)	SV6(150)

Impact des souches bactériennes sur la germination du blé :

			
B(0)	B(150)	Combine (0)	Combine(150)



SF1(0)



SF1(150)



SV6(0)



SV6(150)



TA3(0)



TA3(150)

