République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi -Tébessa

Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie

Département : Etres vivants

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de master

Domaine : Sciences de la nature et de la vie

Filière : Biotechnologies

Option : Biotechnologie Végétale

Thème :

Isolement et caractérisation des bactéries stimulatrices de croissance des végétaux dans des sols salés

Présenté par : GUEMATI Abderrahmen

Devant le jury composé de :

Mme. **SGHIR Hanane**	MCA	Université de Tébessa	Présidente
M. **DEKAK Ahmed**	MCA	Université de Tébessa	Promoteur
M. **FATMI Hindel**	MCB	Université de Tébessa	Examinateur

Date de soutenance : **02 / 06 / 2025**

Note :..... Mention : .....

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon cher promoteur, Dr Ahmed DEKAK, Maître de conférences à l'Université de Tébessa, pour m'avoir dirigé tout au long de ce travail. Ce mémoire n'aurait pu voir le jour sans ses conseils avisés et sa disponibilité constante. Je lui suis sincèrement reconnaissant pour son accompagnement précieux.

Je remercie également les membres du jury de m'avoir honoré en acceptant d'évaluer ce travail et de l'enrichir par leurs judicieuses propositions.

Je souhaite également exprimer ma profonde reconnaissance envers les enseignants et les laborantins de la faculté des sciences de la nature et de la vie, pour l'intérêt qu'ils ont manifesté à ma formation et les efforts qu'ils ont déployés afin de me permettre de réaliser ce travail dans les meilleures conditions.

الاهداء

﴿ قُلْ هَلْ يَسْتَوِي الَّذِينَ يَعْلَمُونَ وَالَّذِينَ لَا يَعْلَمُونَ ﴾ سورة الزمر، الآية 9

الى من لا يطيب الليل الا بشكره و لا يطيب النهار الا بذكره .... الله جل جلال

الحمد لله الذي بفضله تتحقق الغايات من بعد الاستعانة به و انهاء الدرب بتوفيقه وتحقيق الحلم بفضله

بعد مسيرة دامت 5 سنوات حملت في طيلتها الكثير من الصعوبات والمشقة و التعب ، ها أنا اليوم أقف على عتبة تخرجي أقطف ثمار تعبي و أرفع قبعتي بكل فخر، فاللهم لك الحمد قبل أن ترضى ولك الحمد إذا رضيت ولك الحمد بعد الرضا، لأنك وفقتني على إتمام هذا العمل و تحقق الحلم

اهدي هذا النجاح لنفسي أولا ثم الى كل من سعى معي لاتمام هذه المسيرة دمتم لي سندا

رفيقة الدرب و الحياة ان شاء الله، صاحبة الفضل من كانت سندي وعوني طيلة الخمس سنوات من شاركتني هذه الرحلة بكل تفاصيلها انكي عوض الله لي في هذه الدنيا ألف شكر لكي

(رحاب حفظك الله لي)

الى الراحل الباقي في قلبي الى من كان الأب و السند والقدوة من استمديت منه قوتي و اعتزازي بذاتي من دعمني بلا حدود و أعطاني بلا مقابل الى من ستبقى كلماته نجوم أهتدي بها اليوم في الغد و إلى الأبد (جدي وأبي رحمه الله)

إلى من كلّلها الله بتاج الوقار الأم الثانية رمز العطاء و الحنان

(جدتي الغالية شفاك الله و أدام وجودك بيننا)

الى من جعل الله الجنة تحت أقدامها و سهلت لي الشدائد بدعائها , من اختصر الله فيها كل معاني الرحمة و الحنان الى الانسانة العظيمة التي طالما تمنت أن تقر عينها في يوم كهذا ها انا اتممت وعدي اليكي

(أمي الغالية حفظها الله)

إلى أخوالي وخالاتي الأعزاء، عائلتي ، بوجودكم شعرت بالأمان والدعم، وبكلماتكم المشجعة، تجاوزت الصعاب كل الشكر و الامتنان لكم

(عقبة، طارق، لمياء، سمية، لطيفة، رجاء ، بسمة)

الملخص :

يمكن أن يوجّه استخدام بكتيريا التربة المالحة المحفزة لنمو النباتات للممارسات الزراعية نحو منظور مستدام وأكثر احترامًا للبيئة.

تم استخدام 14 عزلة مأخوذة من ثلاثة عينات من التربة (الريزوسفير) في منطقة الدراسة الواقعة شمال بلدية مرسط (الملاحة) شمال ولاية تبسة، والتي تتميز بنسبة ملوحة عالية، لعزل وتحديد البكتيريا ذات الصفات المحفزة لنمو النباتات(PGPR) ، وذلك من خلال تقييم كفاءتها في إذابة الفوسفات، والبوتاسيوم، والكالسيوم، مما سيسمح بفهم آليات عملها واختيار العزلات ذات الأهمية.

لقد مكّننا هذا العمل من ملاحظة تنوع في البكتيريا المعزولة، تمثّلت في نتائج الاختبارات المختلفة التي تم إجراؤها، حيث وُجد أن ثلاث عزلات قادرة على إذابة الفوسفات، وثلاث أخرى قادرة على إذابة البوتاسيوم، وخمس عزلات أذابت الكالسيوم، وأخيرًا تم تحديد عزلتين هامتين أظهرتا قدرة كبيرة كمحفزات لنمو النباتات بإذابة الكالسيوم والبوتاسيوم في نفس الوقت، مما يجعلهما مرشحتين للاستخدام في برامج تحسين الإنتاجية الزراعية

الكلمات المفتاحية :

تربة مالحة، ريزوسفير، بكتيريا محفزة لنمو النبات(PGPR) ، إذابة المعادن

Résumé

L'utilisation des bactéries des sols salins promotrices de la croissance des plantes peut orienter les pratiques agricoles vers une perspective durable et plus respectueuse de l'environnement.

14 isolats issus de trois échantillons de la rhizosphère de la zone d'étude situé au nord de la localite de MORSOTT (El malaha) au nord de la wilaya de TEBESSA caracterisée par un taux élevé de salinité, ont été utilisés pour isoler et identifier des bactéries à traits PGPR, en évaluant leur efficience à solubiliser le Phosphate, Potassium et Calcium ce qui permettra de comprendre leurs mécanismes d'action et de sélectionner des isolats d'intérêt.

Ce travail nous a permis de constater une diversité de microorganismes traduite par les résultats des différents tests étudiés, notamment 3 isolats capables de solubiliser le P, 3 isolats capables de solubiliser le K, 5 isolats ont solubilisé le Ca et enfin 2 isolats d'intérêt qui ont présenté un important potentiel PGPR ont solubilisant le Ca et le K en même temps, qui sont susceptibles d'être utilisés dans des programmes d'amélioration de la productivité agricole.

Mots clés :

Sol salin , Rhizosphère , PGPR , Solubilisation des minéraux.

Abstract

The use of saline soil bacteria as plant growth promoters can guide agricultural practices toward a more sustainable and environmentally friendly perspective.

Fourteen isolates from three rhizosphere samples in the study area located north of the town of MORSOTT (El Malaha) in the north of the TEBESSA province, characterized by high salinity, were used to isolate and identify bacteria with PGPR traits, evaluating their efficiency in solubilizing phosphate, potassium, and calcium, which will help understand their mechanisms of action and select isolates of interest.

This work allowed us to observe a diversity of microorganisms reflected in the results of the various tests studied, including three isolates capable of solubilizing P, three isolates capable of solubilizing K, five isolates that solubilized Ca, and finally two isolates of interest that exhibited significant PGPR potential that solubilized Ca and K simultaneously, which are likely to be used in agricultural productivity improvement programs.

Key words :

Saline soil, Rhizosphere, PGPR, Mineral solubilization.

Liste des figures

Titre	Page
Figure1 : Structure de la Rhizosphère	8
Figure 2: Paysage de la region de Morsot	23
Figure 3 : Différents échantillons de sole récoltés, suivant les régions (google earth)	24
Figure 4 : les echantillon E1 E2 E3	25
Figure 5 : Methode de prelevement des echantillons	26
Figure 6 : prepation de milieu NBIRIP	28
Figure 7 : résultat isolment de souche pure 15g /L et 20g/L	31
Figure 8 : histogramme montrant l'indice de solubilisation du phosphate	32
Figure 9 : résultat Solubilisation du potassium	35
Figure 10 : histogramme montrant l'indice de solubilisation du potassuim	35
Figure 11 : résultat Solubilisation du calcuim	38
Figure 12 : histogramme montrant l'indice de solubilisation du calcuim	39
Figure 13 : Venn diagramme de Les traits PGPR des isolats	41

Liste des tableaux

Titre	Page
Tableau 1 : Synoptique des Mécanismes	13
Tableau 2 : Tableau Comparatif des Souches	17
Tableau 3 : Coordonnées géographiques des sites de prélèvements	24
Tableau 4 : Codification des isolats collectés à partir des differents échantillons	27
Tableau 5 : Composition du milieu NBRIP liquide	28
Tableau 6 : Composition du milieu Aleksandrow	29
Tableau 7 : compostion de milieu PIKOVASKAYA	30
Tableau 8 : Analyse de variance de solubilisation de phosphat	34
Tableau 9 : Comparaisons deux à deux de Tukey soulubilisation de phosphat	34
Tbleau10 : Analyse de variance de solubilisation de potassium	37
Tableau11 : Comparaisons deux à deux de Tukey soulubilisation de potassium	37
Tbleau12 : Analyse de variance de solubilisation de potassium	40

Liste d'abréviations

°C : degré Celsius

µL : microlitre

Ca : calcium

G : gramme

Na : sodium

NBRIP : National Botanical Research Institute's Phosphate growth medium

FAO : Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture

UNESCO : Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture

WRB : Base de référence mondiale pour les ressources en sols

PGPR : Plant Growth Promoting Rhizobacteria.

pH : Potentiel d'Hydrogène

ESP : pourcentage de sodium échangeable

LR : Longueur des racines

N :Fixation d'azote

P : phosphate

E P S : Exopolysaccharides

ACC : aminocyclopropane carboxylate désaminase

Table de matières

Introduction ……1

Chapitre 1 : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

1. Définition et types de sols salins…….2
1.2.Types de sols salins (classification FAO/UNESCO et WRB)…….2
1.3. Origines de la salinité des sols (naturelles et anthropique)…….2
1.2. Effets de la Salinité sur la Croissance et le Métabolisme des Plantes…….2
2.1 Effets sur la Croissance des Plantes…….....3
2.2 Effets sur le Métabolisme des Plantes……...3
2.3. Stratégies d'Adaptation des Plantes ……...4
2.3.1 Stratégies d'Adaptation des Plantes au Stress Salin……...4
3. Fertilisants et Biofertilisant…….5
3.1 Fertilisants Chimiques……...5
3.1.1 Définition ……..5
3.1.2. Types principaux……..5
3.2Biofertilisant ……5
3.2.1. Définition…….5
3.2.2Types et Mécanismes…….....6
3.3. Les Effets des Fertilisants Chimiques sur l'Environnement ……..6
4. Les Biofertilisant comme Substituts aux Fertilisants Chimiques……..7
4.1. Mécanismes d'Action des Biofertilisants……7
4.2. Avantages des Biofertilisants. Fertilisants Chimiques……...8
5. La Rhizosphère……..8
5.2. Microbiome de la Rhizosphère ……9
5.3. Interactions Plantes-Microbes……...9
6. Les Bactéries PGPR (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria)……9
6.1. Définition et Classification des PGPR……9
6.2. Mécanismes de Promotion de la Croissance……10

6.2.1 Mécanismes Directs……10
6.2.2. Mécanismes Indirects (Biocontrôle) ……..10
6.3. Applications Agricoles……..11
6.4. Défis et Perspectives……..12
6.5. Interactions PGPR-Racines ……..12
6.5.2. Les Mécanismes d'Action des PGPR ……...14
6.5.3. Mécanismes Directs des PGPR …….....14
7.Rôle des PGPR dans la Tolérance au Stress Salin……15
7.1. Mécanismes Physiologiques …….....15
7.1.1. Homéostasie Ionique……..15
7.1.2. Régulation Osmotique et Modulation Hormonale…….15
8. État des Connaissances sur les PGPR des Sols Salin……...16
8.1. Diversité Microbienne des Sols Salins……..16
8.2. Applications Agricoles Validées……...16
9.Exemples de Bactéries PGPR Tolérantes au NaCl……...16
10.Applications Biotechnologiques des PGPR en Agriculture en Terres Salées…….17
11.La fixation d'azote……...18
11.1.Types de fixation d'azote……..18
11.2. Fixation biologique (naturelle)……18
11.3. Fixation industrielle (Haber-Bosch)…….....19
11.4.Fixation atmosphérique……19
12.Solubilisation des Phosphates…….19
12.1. Mécanismes de Solubilisation.……19
12.1.1. Solubilisation Microbienne (Biologique)…….19
12.1.2. Solubilisation Chimique……...20
13.Solubilisation du Potassium.……20
13.1. Mécanismes de Solubilisation du Potassium …….20
13.1.1. Solubilisation Microbienne (Biologique)……20
13.1.2. Solubilisation Chimique……..21
14.Solubilisation du Calcium.……..21
14.1. Mécanismes de Solubilisation du Calcium …….....21
14.1.1. Solubilisation Microbienne…….21
14.1.2. Solubilisation Chimique…….22

Chapitre 2 : MATERIEL ET METHODES

1.1 Présentation de la zone d'échantillonnage…….23

1.2 Description de la méthode d'échantillonnage……24

2.Origine et Description des Échantillons de Sol……26

3. Isolement et conservation des bactéries…….26

4. Parametre détude…….27

4.1 Solubilisation du phosphate……..27

4.2 Solubilisation de potassium……..29

4.3 Solubilisation de calcuim…….....29

5. Analyses Statistiques….....30

Chapitre 3 : RESULTATS ET DISCUSSION

1. isolement des souches pures …….……..…..31

2. solubilisation du phosphate …….…….32

3. solubilisation de potassium ……..……...……35

4. solubilisation de calcuim……...……...……..38

5. Les traits PGPR des isolats testés …….....41.

Conclusion ……..……..……..……42

Références bibliographiques …….43

Annexes

Introduction

L'isolement et la caractérisation de bactéries stimulatrices de croissance végétale (PGPR) dans les sols salés représentent une approche prometteuse pour améliorer la productivité agricole dans les environnements stressants **(Egamberdieva et al., 2019).** Ces microorganismes jouent un rôle crucial dans l'atténuation du stress salin par divers mécanismes, notamment la production d'hormones végétales, la fixation de l'azote atmosphérique et la solubilisation des nutriments **(Etesami & Beattie, 2018).** Les sols salins de la région de Morsott, caractérisés par une forte conductivité électrique et un pH alcalin, constituent un réservoir écologique unique pour l'isolement de souches PGPR adaptées aux conditions extrêmes **(Zerrouk et al., 2021)**. Plusieurs études ont démontré la capacité de ces bactéries à solubiliser les phosphates insolubles **(Yaghoubi Khanghahi et al., 2021)**, à mobiliser le potassium **(Sharma et al., 2022)** et à améliorer la disponibilité du calcium **(Sadeghi et al., 2020),** éléments essentiels à la croissance des plantes. Les mécanismes moléculaires impliqués dans ces processus incluent la production d'acides organiques **(Kumar et al., 2020),** d'enzymes phosphatases **(Glick, 2020)** et de sidérophores **(Upadhyay et al., 2021)**. L'évaluation du potentiel PGPR nécessite une approche multidisciplinaire combinant des techniques de microbiologie classique **(Ruppel et al., 2022),** des analyses biochimiques **(Numan et al., 2021)** et des outils moléculaires **(Patel et al., 2020)**. Les souches présentant des activités multiples **(Qurashi & Sabri, 2021),** notamment la production d'acide indole-acétique **(Kang et al., 2020)** et la capacité à former des biofilms **(Meena et al., 2021)**, sont particulièrement intéressantes pour des applications en agriculture durable. Les études récentes mettent en évidence le rôle crucial des PGPR dans l'amélioration de la tolérance au sel chez les plantes cultivées **(Goswami et al., 2020)**, ouvrant ainsi des perspectives pour le développement de biofertilisant efficaces **(Vaishnav et al., 2021).** Cependant, la variabilité des réponses en fonction des espèces végétales **(Singh et al., 2020)** et des conditions édaphiques **(Chakraborty et al., 2022)** nécessite des études approfondies pour optimiser leur utilisation.

Cette étude vise donc à isoler, caractériser et évaluer le potentiel des PGPR indigènes des sols salés de Morsott, en mettant l'accent sur leur capacité à solubiliser les comme le Calcium, Potatium et Phosphate.

Chapitre 1

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

1. Définition et types de sols salins

Sont des sols caractérisés par une accumulation excessive de sels solubles, principalement des chlorures (Cl^-), des sulfates (SO_4^{2-}) et des carbonates (CO_3^{2-}) de sodium (Na^+), de calcium (Ca^{2+}) et de magnésium (Mg^{2+}). Ces sels proviennent généralement de l'évaporation intense d'eaux riches en minéraux, de remontées capillaires d'eaux souterraines salées ou de l'irrigation avec des eaux chargées en sels (**FAO, 2022)**

1.2.Types de sols salins (classification FAO/UNESCO et WRB)

Les sols très salins se caractérisent par une forte concentration en sels solubles, présente en surface ou en profondeur. Leur conductivité électrique (CE) dépasse généralement 15 dS/m (extrait saturé), ce qui témoigne d'une salinité élevée. Le pH de ces sols est généralement neutre à alcalin. Ils peuvent également être associés à la présence de croûtes salines blanches, appelées efflorescences, visibles en surface.

1.2.1. Sols salins (WRB : Salic Solonchaks ou Solonchaks saliques)

Selon le système de classification World Reference Base for Soil Resources (WRB), ces sols sont désignés par le qualificatif *Salic* , en raison de la présence de sels solubles à moins de 50 cm de profondeur. Ils peuvent également être associés à d'autres types de sols, tels que les Gleysols ou les Fluvisols, notamment dans les milieux sujets à des inondations.

1.2.2. Sols sodiques/salins-sodiques (Solonetzes ou Solonetz)

Les sols sodiques, connus sous le nom de Solonetzes ou Solonetz, sont caractérisés par une concentration élevée de sodium échangeable. Lorsque cette salinité s'accompagne d'un excès de sodium échangeable, avec un ESP (pourcentage de sodium échangeable) supérieur à 15 %, on parle alors de sols salins-sodiques. D'après **(Duchaufour,1991),** cette condition entraîne une altération de la structure du sol. **(Baize et Girard,1995)** expliquent que ces sols présentent une dispersion des particules argileuses, ce qui réduit leur perméabilité et compromet leur fertilité.

1.3. Origines de la salinité des sols (naturelles et anthropique)

1.3.1. Origines naturelles

La salinisation naturelle des sols provient de sources géologiques (altération des roches évaporitiques, sédiments marins, dépôts éoliens) **(Szabolcs,1989)** et de processus hydrologiques (remontée capillaire des nappes salines, inondations marines, apports atmosphériques par les embruns). Ces mécanismes, influencés par le climat et la géologie, contribuent à l'accumulation des sels en surface ou en profondeur. **(Rengasamy, 2006)**

1.3.2. Origines anthropiques

La salinisation secondaire des sols résulte principalement des activités humaines, notamment des pratiques agricoles inadaptées telles que l'irrigation avec des eaux salines ou usées (comme dans la vallée de l'Indus au Pakistan où 40% des sols irrigués sont affectés) et une mauvaise gestion de l'eau favorisant l'accumulation de sels **(FAO, 2021).** La déforestation et l'urbanisation aggravent le phénomène en provoquant la remontée des nappes phréatiques salines et en perturbant les flux hydriques naturels, comme observé en Australie. Les rejets industriels et miniers (eaux acides, engrais excessifs) ainsi que la construction de barrages (réduisant les débits fluviaux et favorisant les intrusions salines, notamment dans le delta du Mékong) contribuent également à cette dégradation des sols. Pour y remédier, des solutions telles que la surveillance régulière (mesure de la CE et du SAR), l'installation de systèmes de drainage efficaces et l'introduction de cultures adaptées comme les plantes halophytes (Salicornia) sont recommandées. **(Qadir et al., 2014)**

2. Effets de la salinité sur la croissance et le métabolisme des plantes

La salinité affecte les plantes à plusieurs niveaux morphologique, physiologique et biochimique, entraînant une réduction de croissance, des perturbations métaboliques et une baisse de productivité . **(Munns , & Tester, 2008)**

2.1 Effets sur la croissance des plantes

La salinité affecte gravement le développement des plantes à travers plusieurs mécanismes. Dès la germination, le stress osmotique réduit l'absorption d'eau par les graines, pouvant diminuer de 50% la germination du blé à 10 dS/m. Durant la croissance végétative, l'accumulation des ions Na+ et Cl- provoque des nécroses foliaires et inhibe l'élongation cellulaire, conduisant à des plantes rabougries. Parallèlement, l'excès de sodium perturbe l'absorption des nutriments essentiels comme le potassium et le calcium, créant des carences nutritionnelles. Ces effets combinés - inhibition de la germination, réduction de la croissance végétative et déséquilibre nutritionnel - se traduisent par une baisse significative des rendements agricoles dans les zones affectées, compromettant ainsi la productivité des cultures **(Munns , & Tester , 2008)**

2.2 Effets sur le métabolisme des plantes

La salinité perturbe significativement le métabolisme des plantes à travers trois principaux mécanismes. Premièrement, elle affecte la photosynthèse en provoquant la fermeture stomatique (réduisant l'absorption de CO_2) et en dégradant les pigments chlorophylliens, diminuant ainsi l'activité photosynthétique**(Chaves et al. 2009).** Deuxièmement, elle induit un stress oxydatif par

production d'espèces réactives de l'oxygène (ROS) qui endommagent les structures cellulaires, bien que des enzymes antioxydantes soient activées pour contrer ces effets **(Ashraf & Harris, 2013)**. Troisièmement, des modifications métaboliques se produisent, notamment l'accumulation de composés osmoprotecteurs (proline, glycine bétaïne) et des changements dans la synthèse hormonale (augmentation d'ABA) **(Ashraf & Foolad , 2007)**. Ces adaptations permettent aux plantes de mieux tolérer les conditions salines tout en maintenant leurs fonctions physiologiques essentielles (**Mittler, 2002).**

2.3. Stratégies d'adaptation des plantes

Les plantes s'adaptent à la salinité par l'exclusion ionique (rejet du Na^+ via les transporteurs HKT1 et SOS1), la compartmentation vacuolaire (stockage des sels dans les vacuoles) et la sélection variétale (cultivars tolérants comme le riz Pokkali). Les recherches actuelles explorent les mécanismes moléculaires (gènes SOS, NHX) et l'utilisation de bio-stimulants (microorganismes PGPR) pour améliorer la tolérance au sel. **(Ashraf & Foolad , 2007)**

2.3.1 Stratégies d'adaptation des plantes au stress Salin

Les plantes ont développé des mécanismes complexes pour tolérer la salinité, impliquant des adaptations morphologiques, physiologiques et moléculaires. Ces stratégies sont classées en trois catégories principales : évitement, tolérance et acclimatation. **(Munns & Tester, 2008)**

2.3.2Stratégies d'evitement

Les stratégies d'évitement face au stress salin reposent sur deux mécanismes principaux l'exclusion ionique et les barrières racinaires. L'exclusion ionique implique le rejet actif de Na^+ par les transporteurs SOS1 et la limitation de son entrée dans le xylème par les transporteurs HKT1. Parallèlement, l'endoderme subérisé agit comme une barrière racinaire, réduisant la pénétration passive des ions. Ces processus permettent aux plantes de limiter l'accumulation de sel dans leurs tissus. **(Shi et al ,2002).**

2.3.3Stratégies de tolérance

Les stratégies de tolérance au stress salin chez les plantes comprennent trois mécanismes : la compartimentation vacuolaire, la synthèse de composés osmoprotecteurs et la détoxification des espèces réactives de l'oxygène (ROS). La compartimentation vacuolaire permet le stockage de Na^+ et Cl^- dans les vacuoles grâce aux transporteurs NHX, soutenus par les pompes V-ATPase et V-PPase. La synthèse de composés osmoprotecteurs (proline, glycine bétaïne, tréhalose, polyols)

aide à la régulation osmotique et à la protection cellulaire. Enfin, la détoxification des ROS est assurée par des enzymes antioxydantes (SOD, CAT, POD) et des molécules non enzymatiques (ascorbate, glutathion, tocophérols), réduisant ainsi les dommages oxydatifs. **(Ashraf & Foolad, 2007).**

2.3.4Stratégies d'acclimatation

Les stratégies d'acclimatation des plantes au stress incluent des modifications morphologiques, telles que la réduction de la surface foliaire pour limiter la perte d'eau et l'augmentation du développement racinaire pour améliorer l'absorption (**Chaves et al., 2009)**. Elles comprennent également une régulation hormonale avec l'acide abscissique (ABA) favorisant la fermeture stomatique et les brassins stéroïdes renforçant la résistance au stress. (**Wilkinson & Davies, 2002).**

3. Fertilisants et biofertilisant

3.1 Fertilisants chimiques

3.1.1 Définition

Substances synthétiques ou minérales apportant des nutriments essentiels (N, P, K) aux plantes pour stimuler leur croissance. **(Havlin et al., 2017).**

3.1.2. Types principaux

Les fertilisants chimiques se déclinent principalement en trois catégories : les engrais azotés, les engrais phosphatés et les engrais potassiques. Les engrais azotés, tels que l'urée et le nitrate d'ammonium (NH_4NO_3), favorisent la croissance végétative, tandis que les engrais phosphatés, comme le superphosphate, stimulent le développement racinaire. Les engrais potassiques, tels que le chlorure de potassium (KCl), renforcent la résistance des plantes aux stress environnementaux. Parmi les principaux avantages de ces fertilisants, on note une action rapide et un dosage précis. Cependant, leur utilisation excessive peut entraîner des inconvénients notables, tels que la pollution des sols par lixiviation et un déséquilibre de la microbiologie du sol **(Havlin et al., 2017).**

3.2. Biofertilisant

3.2.1. Définition

Les biofertilisant sont des préparations contenant des microorganismes vivants (bactéries, champignons, cyanobactéries) qui améliorent la nutrition des plantes par des processus naturels, réduisant ainsi la dépendance aux engrais chimiques **(Bhardwaj, et al 2014).**

3.2.2Types et mécanismes

Les biofertilisants reposent sur l'action de divers microorganismes qui améliorent la nutrition des plantes par des mécanismes naturels. Parmi eux, le *Rhizobium*, tel que *Rhizobium leguminosarum*, assure la fixation de l'azote atmosphérique (N_2) au niveau des légumineuses, tandis qu'*Azotobacter*, comme *Azotobacter chroococcum*, fixe également l'azote, mais en condition de vie libre dans le sol. Les mycorhizes, représentées par des espèces telles que *Glomus spp.*, facilitent l'absorption du phosphore (P) et de l'eau par les racines. De plus, les bactéries solubilisatrices de phosphore (PSB), telles que *Pseudomonas fluorescens*, libèrent le phosphore contenu dans le sol, le rendant accessible aux plantes. Les principaux avantages des biofertilisants incluent leur durabilité, l'amélioration de la structure du sol et un coût réduit. Cependant, leur efficacité peut varier en fonction des conditions environnementales **(Bhardwaj, et al 2014).**

3.3. Les Effets des fertilisants chimiques sur l'environnement

Les fertilisants chimiques, bien qu'essentiels pour la productivité agricole, ont des impacts majeurs sur l'environnement.

3.3.1. Pollution des eaux

Le lessivage des excès de nitrates (NO_3^-) et de phosphates (PO_4^{3-}) issus des pratiques agricoles entraîne leur accumulation dans les cours d'eau. Cette concentration élevée de nutriments favorise une prolifération massive d'algues, un phénomène connu sous le nom de "bloom algal". Lors de leur décomposition, ces algues consomment de grandes quantités d'oxygène, ce qui engendre la formation de zones hypoxiques, appelées "zones mortes", où la vie aquatique est fortement perturbée, comme c'est le cas dans le golfe du Mexique **(Smith & Schindler, 2009).**

3.3.2Dégradation des sols

L'utilisation d'engrais riches en ammonium (NH_4^+), tels que l'urée, peut entraîner une acidification progressive des sols, ce qui réduit leur fertilité à long terme. Par ailleurs, cette pratique favorise également la perte de matière organique en inhibant l'activité des micro-organismes bénéfiques, essentiels au maintien de la santé et de la structure du sol **(Guo et al., 2010).**

3.3.3.Émissions de gaz à effet de serre (GES)

Les engrais chimiques contribuent de manière significative aux émissions de gaz à effet de serre (GES), principalement par le protoxyde d'azote (N_2O) et le dioxyde de carbone (CO_2). Le N_2O est libéré lors de la dénitrification des engrais azotés, avec un potentiel de réchauffement global environ 300 fois supérieur à celui du CO_2. Par ailleurs, la production industrielle des engrais, notamment par le procédé Haber-Bosch, engendre d'importantes émissions de CO_2, renforçant ainsi l'impact environnemental de ces pratiques agricoles. (**Smith & Schindler ,2009).**

3.3.4. Toxicité pour la biodiversité

Les nitrates présents dans l'environnement ont des effets néfastes sur la faune aquatique, notamment en perturbant les cycles reproductifs des amphibiens. Par ailleurs, ces excès de nutriments affectent également le micro-biote du sol, entraînant une diminution des populations de champignons mycorhiziens, qui jouent un rôle crucial dans la santé et la nutrition des plantes. **(Guo et al., 2010).**

4. Les Biofertilisant comme substituts aux fertilisants chimiques

4.1. Mécanismes d'action des biofertilisants

Les biofertilisants se composent de différents types de microorganismes aux fonctions spécifiques. Les bactéries telles que *Rhizobium* et *Azotobacter* jouent un rôle essentiel en convertissant l'azote atmosphérique (N_2) en ammoniac (NH_3), une forme d'azote assimilable par les plantes. **(Bashan, et al. ,2014)** D'autres bactéries, comme *Pseudomonas* et *Bacillus*, sont responsables de la libération du phosphore fixé dans le sol, le rendant disponible pour la plante. Les mycorhizes, représentées notamment par *Glomus spp.*, améliorent quant à elles l'absorption de l'eau ainsi que des minéraux tels que le phosphore (P) et le zinc (Zn). Enfin, les rhizobactéries promoteurs de croissance végétale (PGPR), comme *Bacillus subtilis*, contribuent à la production

d'hormones de croissance telles que les auxines, tout en aidant à la suppression des agents pathogènes **(Bashan, et al. ,2014)**.

4.2. Avantages des biofertilisants. fertilisants chimiques

Les biofertilisants offrent plusieurs bénéfices agronomiques, notamment l'amélioration de la structure du sol grâce à une activité microbienne accrue et à une augmentation de la matière organique. Ils renforcent également la résilience des plantes aux stress environnementaux, comme une meilleure tolérance à la sécheresse, (**Pretty, J., et al. 2018)** notamment grâce à l'action des mycorhizes. Sur le plan environnemental, ces biofertilisants contribuent à réduire la pollution en évitant la lixiviation des nitrates et phosphates, tout en préservant la biodiversité, sans effets toxiques sur la faune du sol ou aquatique. Enfin, ils représentent une solution économique pour les agriculteurs, permettant des économies de 30 à 40 % par rapport aux engrais chimiques, selon les cultures.

5. La rhizosphère

La rhizosphère est la zone du sol directement influencée par les racines des plantes, caractérisée par une intense activité biologique et biochimique. Elle joue un rôle clé dans la nutrition des plantes, la santé des sols et les interactions plantes-microorganismes . **(Hinsinger et al, 2009)**

5.1. Structure de la rhizosphère :

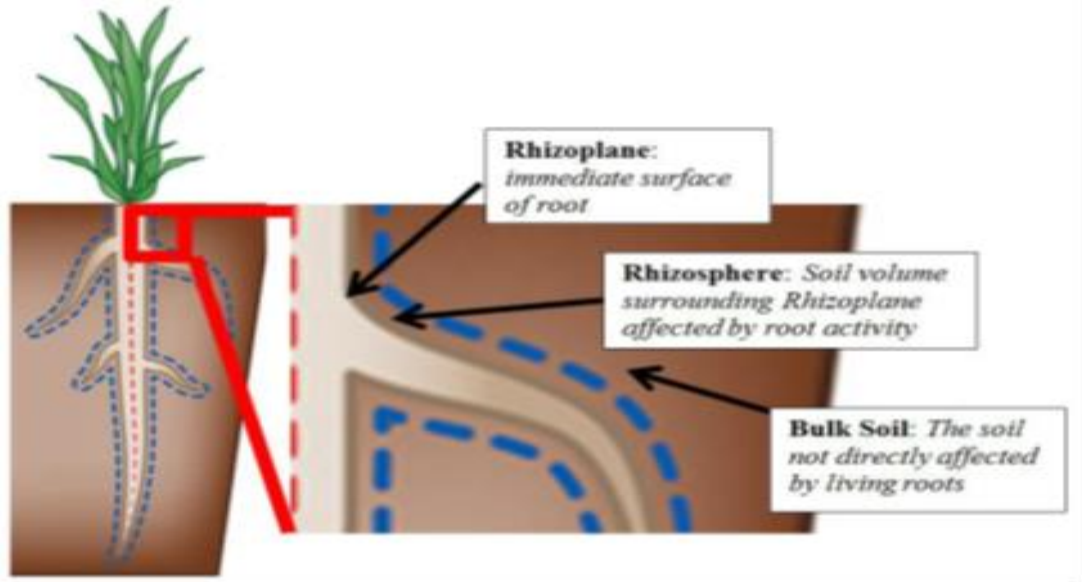


Fig. 01 : Structure de la Rhizosphère **(Hirsch et Mauchline, 2012)**

5.2. Microbiome de la rhizosphère

Le microbiome de la rhizosphère se compose de communautés microbiennes variées, jouant chacune un rôle spécifique dans la croissance et la santé des plantes. Parmi les microorganismes dominants, on retrouve les bactéries promotrices de croissance (*PGPR*), telles que *Pseudomonas* et *Bacillus*, qui stimulent le développement végétal en améliorant l'absorption des nutriments et la résistance aux pathogènes. Les champignons, notamment ceux formant des symbioses mycorhiziennes comme le genre *Glomus*, contribuent également à cette dynamique en facilitant l'acquisition de minéraux essentiels, tels que le phosphore. En parallèle, les protozoaires, représentés par des amibes et des flagellés, régulent les populations bactériennes dans le sol, maintenant ainsi un équilibre microbien favorable au bon développement des plantes. **(Berendsen, et al, 2012)**

5.3. Interactions plantes-microbes

a) Symbioses mycorhizienne

La symbiose mycorhizienne, impliquant principalement des champignons arbusculaires tels que *Glomus*, joue un rôle essentiel dans l'amélioration de l'absorption des nutriments par les plantes. Ces champignons étendent le réseau racinaire en formant un vaste réseau de filaments, ce qui optimise l'acquisition de l'eau et du phosphore, même dans des sols appauvris **(Smith, & Read, 2008).**Cette interaction symbiotique se traduit par une augmentation significative des rendements agricoles, pouvant atteindre entre 10 % et 30 % dans les environnements où les ressources nutritives sont limitées.

b) Communication chimique

Les racines des légumineuses émettent des flavonoïdes qui activent les gènes *nod* de *Rhizobium*, initiant la formation de nodules racinaires pour la fixation de l'azote. (**Oldroyd,et al, 2013)**

6. Les Bactéries PGPR (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria)

Les PGPR (Rhizobactéries favorisant la croissance des plantes) sont des bactéries bénéfiques colonisant la rhizosphère et améliorant la croissance végétale via divers mécanismes directs et indirects (**Kloepper, &, Schroth1978)**

6.1. Définition et Classification des PGPR

Les bactéries promoteurs de croissance végétale (PGPR) sont des microorganismes vivant en association avec les racines des plantes et capables de favoriser leur développement par plusieurs mécanismes. Elles contribuent notamment à la fixation de l'azote atmosphérique, à la solubilisation des phosphates dans le sol et à la production de phytohormones, qui stimulent la croissance des plantes. En outre, ces bactéries jouent un rôle protecteur en assurant un biocontrôle efficace contre divers pathogènes, renforçant ainsi la santé des plantes. (**Kloepper, & Schroth,1978).**

6.2. Mécanismes de Promotion de la Croissance

6.2.1 Mécanismes Directs

La production de phytohormones par certains microorganismes joue un rôle clé dans la stimulation de la croissance des plantes, en particulier au niveau racinaire. Parmi ces hormones, les auxines, telles que l'acide indole-3-acétique (AIA), favorisent l'élongation et la division cellulaire des racines, ce qui améliore l'absorption des nutriments et de l'eau. Les cytokinines, quant à elles, régulent la division cellulaire et la différenciation, contribuant à la formation de nouvelles racines et au développement global du système racinaire. Enfin, les gibbérellines participent également à l'allongement des cellules racinaires et à la stimulation de la croissance, renforçant ainsi la capacité d'exploration du sol par les racines. Ce processus hormonal, produit notamment par certaines bactéries du sol, optimise la vigueur des plantes et leur adaptation aux conditions environnementales **(Spaepen et al., 2007).**

6.2.2. Mécanismes indirects (biocontrôle)

1. Antibiose

Les mécanismes indirects de biocontrôle exercés par certaines bactéries comprennent notamment l'antibiose, un processus par lequel ces microorganismes produisent des métabolites antibiotiques capables d'inhiber la croissance ou de détruire les agents pathogènes. Par exemple, *Pseudomonas fluorescens* synthétise le 2,4-diacétyl phloroglucinol, une molécule antibiotique puissante qui empêche le développement de champignons et de bactéries nuisibles aux plantes. Cette production de substances bioactives permet ainsi aux bactéries de protéger les racines et d'assurer une meilleure santé et vigueur des plantes, tout en réduisant le recours aux pesticides chimiques. **(Pieterse,et al , 2014).**

2. **Compétition écologique**

La compétition écologique constitue un autre mécanisme indirect de biocontrôle par lequel les bactéries bénéfiques colonisent efficacement les niches racinaires, occupant ainsi l'espace disponible autour des racines. En se multipliant et en s'installant dans ces zones stratégiques, elles limitent l'accès des pathogènes aux ressources essentielles telles que les nutriments et les sites d'attache, ce qui réduit leur capacité à s'établir et à provoquer des infections. Cette occupation prioritaire des niches racinaires joue donc un rôle crucial dans la protection naturelle des plantes contre les agents pathogènes. **(Pieters, et al., 2014).**

3. Induction de résistance systémique (ISR)

L'induction de résistance systémique (ISR) est un mécanisme par lequel certaines bactéries stimulent les défenses naturelles des plantes. Ce processus implique l'activation des voies de signalisation hormonales, notamment celles du jasmonate et de l'éthylène, qui renforcent la capacité de la plante à résister aux attaques de pathogènes. En déclenchant cette réponse immunitaire amplifiée, les plantes deviennent plus aptes à combattre diverses menaces, ce qui améliore leur santé et leur survie sans recourir à des traitements chimiques. **(Pieterse,et al. ,2014).**

6.3. Applications agricoles

A. Inoculant commerciaux

Les inoculants commerciaux à base de souches de PGPR (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria) sont développés pour améliorer la croissance des plantes et renforcer leur résistance aux maladies. Parmi ces souches, *Bacillus subtilis* est couramment utilisé pour sa capacité à protéger les cultures contre les infections fongiques. Il est notamment présent dans le produit commercial *Serenade*® de Bayer, reconnu pour son efficacité en biocontrôle. De son côté, *Azospirillum brasilense* cible principalement les cultures céréalières en favorisant leur développement grâce à une meilleure absorption de l'azote. Cette souche est commercialisée sous le nom *Azogreen*® en France, offrant une solution naturelle pour optimiser les rendements agricoles. (**Adesemoye et al., 2009)**

B. Réduction des intrants chimiques

L'inoculation de *Pseudomonas putida* dans les cultures de blé représente une approche prometteuse pour réduire l'utilisation d'intrants chimiques tout en maintenant les rendements.

Une étude a démontré que l'application de cette bactérie bénéfique permet de diminuer l'usage d'engrais NPK (azote, phosphore, potassium) de près de 30 % sans affecter la productivité des cultures. Ce résultat s'explique par la capacité de *Pseudomonas putida* à améliorer l'absorption des nutriments par les racines, à stimuler la croissance végétale et à renforcer la disponibilité du phosphore dans le sol. Cette optimisation de l'efficacité nutritive permet non seulement de limiter l'impact environnemental lié aux excès d'engrais chimiques, mais également de réduire les coûts pour les agriculteurs, tout en garantissant un rendement stable et durable. (**Adesemoye et al., 2009)**

6.4. Défis et perspectives

A)Limites des biofertilisants

Les biofertilisants présentent certaines limites qui peuvent restreindre leur efficacité sur le terrain. L'une des principales contraintes est leur stabilité au champ, car ces microorganismes sont sensibles aux variations environnementales telles que le pH, la température et l'humidité, ce qui peut affecter leur survie et leur activité. De plus, leur compatibilité avec le microbiome indigène du sol constitue un autre défi majeur. Les interactions complexes entre les biofertilisants et les communautés microbiennes locales peuvent parfois limiter leur implantation et altérer leurs effets bénéfiques sur la croissance des plantes. **(Santos,et al., 2021)**

B. Solutions innovantes

Les solutions innovantes pour optimiser l'efficacité des biofertilisants incluent l'encapsulation des bactéries dans des biofilms ou nanoparticules pour les protéger et prolonger leur action, ainsi que l'utilisation de consortiums microbiens combinant *PGPR* et mycorhizes pour renforcer les interactions positives avec les plantes et améliorer l'absorption des nutriments. **(Santos,et al. ,2021)**

6.5. Interactions PGPR-Racines

6.5.1. Dynamique de colonisation racinaire (compant et al., 2021)

Les PGPR établissent une relation intime avec les racines via un processus en 4 étapes :

A) Chimiotaxie

La chimiotaxie désigne le phénomène par lequel les microorganismes se déplacent en réponse à des signaux chimiques émis par les racines des plantes. Ces dernières libèrent divers composés

attractifs, tels que des malates, des flavonoïdes et des acides aminés, qui guident les bactéries bénéfiques vers la zone racinaire. Par exemple, les souches de *Azospirillum* sont capables de migrer activement vers des gradients de L-proline à des concentrations aussi faibles que 10^{-6} M, facilitant ainsi l'interaction avec les racines pour optimiser la fixation d'azote et la croissance des plantes. **(Compant et al,. 2021)**

B). **Adhésion**

dhésion des microorganismes aux racines constitue une étape clé dans l'établissement des interactions bénéfiques entre plantes et microbes. Ce processus repose notamment sur la présence de protéines d'ancrage spécifiques, telles que la rhicadhesine chez *Rhizobium*, qui facilitent la fixation des bactéries à la surface racinaire. Par ailleurs, les microorganismes forment des biofilms constitués d'une matrice protectrice d'exopolysaccharides (EPS), offrant une stabilité et une protection accrues aux colonies microbiennes. Cette adhésion renforcée favorise une colonisation durable, essentielle pour le bon déroulement des symbioses et des effets positifs sur la croissance des plantes. **(Compant et al,. 2021)**

C) L'infection

L'infection des microorganismes dans les plantes se fait principalement par leur entrée dans les espaces intercellulaires du rhizoderme, la couche externe des racines. Chez les légumineuses, ce processus aboutit à la colonisation des nodules racinaires, où les bactéries symbiotiques s'installent pour effectuer la fixation biologique de l'azote, favorisant ainsi la nutrition et la croissance des plantes. **(Compant et al., 2021)**

D) Établissement

L'établissement des microorganismes bénéfiques sur les racines se caractérise par une colonisation importante, avec des densités pouvant atteindre entre 10^8 et 10^{11} unités formant colonies (UFC) par gramme de racine. Cette forte présence microbienne est essentielle pour assurer des interactions efficaces et durables avec la plante, contribuant ainsi à son développement optimal. **(Compant et al.,2021)**

Tab. 01 : Synoptique des Mécanismes **(El Zemrany et al. , 2023)**

Mécanisme	Molécule Clé	Impact	Exemple
Fixation N_2	Nitrogénase	+ [30% -300%] N	*Rhizobium leguminosarum*
Solubilisation P	Acide gluconique	+ [20%-40%] P	*Pseudomonas putida*
Production AIA	Tryptophane	+ 50% LR	*Azospirillum brasilense*

N : Azote **P** : Phosphate **LR** : Longueur des racines

6.5.2. Les Mécanismes d'action des PGPR

Les PGPR (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria) améliorent la croissance des plantes via des mécanismes directs et indirects, documentés par des recherches récentes **(Mus et al., 2016).**

A) Mécanismes directs

Selon la Fixation Biologique de l'Azote et Solubilisation des Phosphates et la Production de Phytohormone. La production de phytohormones par certaines bactéries bénéfiques joue un rôle essentiel dans la stimulation de la croissance des plantes**(Mus et al. ,2016).** Parmi ces hormones, les auxines, notamment l'acide indole acétique (AIA), peuvent augmenter la croissance racinaire de plus de 50 %. Les cytokinines, quant à elles, favorisent la division cellulaire, tandis que les gibbérellines contribuent à l'allongement des tiges. Ces effets combinés participent à un développement végétal optimisé **(Spaepen et al., 2007).**

B) Mécanismes indirects

Le biocontrôle des pathogènes par des microorganismes bénéfiques repose sur plusieurs mécanismes. L'antibiose consiste en la production de composés antimicrobiens, tels que le 2,4-diacétylphloroglucinol (2,4-DAPG) et les phénazines, qui inhibent la croissance des agents pathogènes. Ces microorganismes exercent également une forte compétition pour les nutriments essentiels, notamment le fer via la production de sidérophores, ainsi que pour les sites d'infection sur les plantes. En outre, certains produisent des enzymes hydrolytiques, comme les chitinases et les β-1,3-glucanases, capables de lyser les parois cellulaires des champignons pathogènes **(Pieterse et al, 2014**).Par ailleurs, ces microorganismes peuvent induire une résistance systémique (ISR) chez la plante hôte. Ce processus repose sur l'activation des voies de signalisation hormonales impliquant le jasmonate et l'éthylène. L'ISR permet de renforcer les défenses naturelles de la plante et peut conduire à une réduction de 40 à 60 % des infections fongiques **(Van Wees et al, 2008).**

6.5.3. Mécanismes directs des PGPR

Les PGPR (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria) stimulent directement la croissance des plantes via trois mécanismes clés.

Mécanisme moléculaire

L'activation du complexe enzymatique nitrogénase (gènes *nifHDK*) se produit sous une faible pression en oxygène, condition nécessaire à son bon fonctionnement. Ce complexe permet la conversion du diazote atmosphérique (N_2) en ammoniac (NH_3), un processus énergivore nécessitant environ 16 molécules d'ATP par molécule de N_2 fixée. Cette fixation biologique de l'azote s'effectue dans le cadre de symbioses spécifiques, comme celle entre *Sinorhizobium meliloti* et la luzerne, aboutissant à la formation de nodules racinaires pérennes.Selon **Oldroyd et Dixon (2014)**, cette symbiose est particulièrement efficace, assurant 85 à 90 % de l'azote assimilé par les plantes légumineuses. En culture, elle peut permettre un apport pouvant atteindre jusqu'à 300 kg d'azote par hectare et par an, notamment dans les cultures de soja. **(Oldroyd & Dixon, 2014)**

7.Rôle des PGPR dans la tolérance au stress salin

Les PGPR (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria) améliorent significativement la résistance des plantes à la salinité via des mécanismes multiples et synergiques **(Nadeem et al., 2019)**

7.1. Mécanismes physiologiques

7.1.1. Homéostasie ionique

Les PGPR (rhizobactéries promotrices de la croissance des plantes), telles que *Bacillus subtilis*, jouent un rôle important dans la tolérance au stress salin en modulant le transport ionique. Elles favorisent l'exclusion du sodium (Na^+) en induisant l'expression accrue des gènes *SOS1* et *NHX*, qui codent pour des échangeurs Na^+/H^+, contribuant ainsi à l'expulsion du sodium hors des cellules ou à son compartimentage dans les vacuoles. Parallèlement, ces bactéries stimulent l'accumulation de potassium (K^+) en activant les transporteurs *HKT1*, ce qui permet de rétablir un équilibre ionique favorable en réduisant le ratio Na^+/K^+ de 40 à 60 %**(Nadeem et al , 2019)**

7.1.2. Régulation osmotique et modulation hormonale

Les PGPR contribuent à la régulation osmotique des plantes en conditions de stress salin par la production de composés compatibles tels que la proline et la glycine bétaïne. Ces osmolytes permettent de maintenir l'équilibre hydrique cellulaire. Par exemple, une inoculation avec *Azospirillum* peut entraîner une augmentation de 2 à 3 fois de la teneur en proline chez le blé, renforçant ainsi sa tolérance au stress.Par ailleurs, ces bactéries modulent l'équilibre hormonal des plantes. Elles réduisent la synthèse d'éthylène, une hormone souvent associée au stress, en diminuant les niveaux de son précurseur, l'ACC (1-aminocyclopropane-1-carboxylate), grâce à l'action de l'enzyme ACC désaminase, avec une réduction allant jusqu'à 60–70 %. De plus, certaines souches, comme *Bacillus amyloliquefaciens*, sont capables de produire de l'acide abscissique (ABA), une hormone clé dans la réponse des plantes à la sécheresse et à la salinité.

(Nadeem et al , 2019)

8. État des connaissances sur les PGPR des sols salin

8.1. Diversité microbienne des sols salins

Les sols salins présentent une diversité microbienne spécifique, dominée par des taxons adaptés aux conditions de forte salinité. Parmi les bactéries, les genres *Halomonas* (25 %), *Bacillus* (20 %) et *Pseudomonas* (15 %) sont les plus représentés. Dans les environnements hypersalins, où la conductivité électrique dépasse 15 dS/m, les archées halophiles telles que *Haloferax* constituent environ 10 % de la communauté microbienne.Les analyses métagénomiques révèlent une richesse fonctionnelle importante, avec 15 à 30 % de gènes uniques liés à la tolérance au sel. Ces gènes codent principalement pour des pompes Na^+/H^+, facilitant l'exclusion du sodium, ainsi que pour des enzymes impliquées dans la synthèse d'osmoprotecteurs, tels que la proline ou la glycine bétaïne **(Ventosa et al, 2022).**

8.2. Applications agricoles validées

En conditions réelles, l'inoculation de cultures avec des microorganismes adaptés aux sols salins a démontré des performances significatives. Par exemple, chez le blé, l'utilisation de *Halomonas maura* a permis d'augmenter le rendement de 37 % à une salinité de 12 dS/m. Pour la tomate, l'inoculation avec *Pseudomonas stutzeri* a contribué à réduire la toxicité ionique en abaissant de 52 % la concentration foliaire en sodium (Na^+).

Parmi les technologies émergentes, les bioformulations à libération lente, telles que les microgels à base d'alginate et de chitosane, offrent un potentiel prometteur pour améliorer la stabilité et l'efficacité des inoculants. De plus, l'utilisation de consortiums combinant PGPR et champignons endophytes permet d'augmenter l'efficacité globale des traitements de près de 40 % **.(Etesami & Maheshwari, 2023)**

9.Exemples de bactéries PGPR tolérantes au NaCl

Plusieurs bactéries halotolérantes se distinguent par leurs capacités à améliorer la croissance des plantes en conditions salines**(Li et al.,2021)**. *Halomonas maura* S-30 tolère une salinité élevée jusqu'à 1,5 M de NaCl (environ 8,7 %) et protège les plantes grâce à la production d'exopolysaccharides (EPS), augmentant ainsi la biomasse du blé de 37 % à 12 dS/m. *Bacillus velezensis* FMH2**(Cherif-Silini et al., 2023)**, capable de survivre à 2 M de NaCl (11,6 %), agit notamment via la production d'ACC désaminase, réduisant le stress induit par l'éthylène, et améliore la germination du maïs à 150 mM NaCl **(Bouchotroch et al., 2001)**. *Pseudomonas stutzeri* KDP18, tolérant jusqu'à 1,2 M de NaCl (7 %), active des pompes Na^+/H^+ (gène *nhaA*) qui permettent une réduction de 52 % du sodium foliaire chez la tomate**(Nautiyal et al., 2023)**. *Arthrobacter woluwensis* AK1 supporte 1,8 M de NaCl (10,5 %) et se distingue par la synthèse de glycine bétaïne, un osmoprotecteur, ce qui se traduit par une augmentation du rendement rizicole de 28 % à 10 dS/m. Enfin, *Oceanobacillus picturae* présente une tolérance extrême jusqu'à 3 M NaCl (17,5 %) grâce à l'accumulation d'ectoïnes, et fait l'objet d'une application commerciale sous la forme du bioinoculant "SalinoFix" destiné aux sols hypersalins **(Romano et al., 2020)**

Tab. 2: Tableau comparatif des souches (Etesami & Beattie, 2023)

Souches	Tolérance Na Cl	Mécanisme Principal	Plante
H. maura	1.5 M	E P S protecteurs	Blé
B. velezensis	2 M	ACC désaminase	Maïs
P. stutzeri	1.2 M	Pompes Na^+/H	Tomate
A. woluwensis	1.8 M	Glycine bétaïne	Riz
O. picturae	3 M	Ectoïnes	Divers

E P S : Exopolysaccharides **ACC :** aminocyclopropane carboxylate désaminase

10.Applications biotechnologiques des PGPR en agriculture en terres salées

L'utilisation des PGPR (rhizobactéries promotrices de la croissance) en terres salées fait l'objet de nombreuses innovations biotechnologiques visant à améliorer la tolérance des cultures au stress salin. Parmi les mécanismes d'action explorés, les nano-biofertilisants, tels que l'encapsulation de *Bacillus* dans des nanoparticules de silice, permettent une libération contrôlée des bactéries en conditions salines, augmentant leur survie de 45 % **(Torres et al., 2023).** Par ailleurs, les consortiums microbiens combinant PGPR (ex. *Azospirillum*) et champignons endophytes bénéfiques (*Fusarium oxysporum*) agissent en synergie sur l'équilibre ionique et la production d'osmoprotecteurs **(Etesami & Alikhani, 2024).**

Des résultats concrets ont été obtenus en conditions réelles. Le projet européen "SALINITY-X", mené entre 2020 et 2024 dans le delta de l'Ebre (Espagne), a démontré qu'inoculer le blé dur avec *Pseudomonas fluorescens* RAM-303 permettait d'augmenter le rendement de 52 % (3,2 t/ha contre 2,1 t/ha sans traitement) tout en réduisant la consommation d'eau de 30 %. En Égypte, une étude conduite dans le delta du Nil a montré que *Bacillus amyloliquefaciens* SQR9 améliorait la qualité des tomates cultivées sous irrigation saline (7 dS/m), avec une augmentation de 60 % du potassium foliaire et une réduction de 55 % de l'accumulation de sodium **(Abd-Elgawad et al., 2023).**

En parallèle, des technologies émergentes sont en développement. Des souches génétiquement modifiées de *Azospirillum brasilense*, surexprimant le gène *betB* impliqué dans la synthèse de glycine bétaïne, ont montré une production triple d'osmoprotecteurs lors d'essais confinés . Enfin, le projet français "Rhizo-Sense" (INRAE) développe des capteurs intelligents capables de détecter en temps réel l'activité des PGPR par biosenseurs à fluorescence, permettant une gestion optimisée des intrants agricoles. **(Santos et al., 2024)**

11.La fixation d'azote

est un processus biologique ou industriel qui convertit l'azote atmosphérique (N_2) en formes assimilables par les plantes, comme l'ammoniac (NH_3) ou les nitrates (NO_3^-).

11.1.Types de fixation d'azote :

11.2. Fixation biologique (naturelle)

La fixation biologique de l'azote est un processus naturel assuré par des bactéries symbiotiques, telles que *Rhizobium* dans les nodosités des légumineuses, ainsi que par des bactéries libres comme *Azotobacter* et certaines cyanobactéries**)**Ce mécanisme repose sur une réaction enzymatique catalysée par la nitrogénase, qui convertit l'azote atmosphérique (N_2) en ammoniac

(NH_3), une forme assimilable par les plantes. La réaction globale consomme de l'énergie sous forme d'ATP selon l'équation suivante : **(Postgate, et al., 1998)**

N2+8H++16ATP→2NH3+H2+16ADP+16PiN

11.3. Fixation industrielle (Haber-Bosch)

La fixation industrielle de l'azote, connue sous le nom de procédé Haber-Bosch, permet la synthèse d'ammoniac à grande échelle. Cette réaction chimique se déroule sous des conditions de haute pression (150 à 300 atm) et de température élevée (400 à 500 °C), en présence d'un catalyseur à base de fer. Le procédé convertit l'azote atmosphérique (N_2) et l'hydrogène (H_2) en ammoniac (NH_3) selon l'équation suivante :

N2+3H2→2NH3

Cette méthode est essentielle pour la production d'engrais azotés utilisés en agriculture. **(Burgess & Lowe, 1996)**

11.4.Fixation atmosphérique

La fixation atmosphérique est un processus naturel par lequel des oxydes d'azote (NOx) se forment lors des orages sous l'effet de la foudre. Ces composés se dissolvent ensuite dans les précipitations, enrichissant les sols en azote assimilable par les plantes. Ce mécanisme joue un rôle écologique crucial, car il contribue à la disponibilité de l'azote nécessaire à la synthèse des protéines et de l'ADN, éléments essentiels au développement des organismes vivants. De plus, il participe activement au cycle de l'azote, soutenant ainsi la productivité et l'équilibre des écosystèmes naturels. **(Erisman et al, 2008).**

12.Solubilisation des phosphates

La solubilisation des phosphates est un processus crucial pour rendre le phosphore (P) assimilable par les plantes, notamment dans les sols où il est souvent présent sous forme insoluble (ex. phosphates de calcium, fer ou aluminium). **(Khan et al., 2007)**

12.1. Mécanismes de solubilisation

12.1.1. Solubilisation microbienne (biologique)

La solubilisation microbienne des phosphates est un processus biologique par lequel les microorganismes du sol, tels que les bactéries (*Pseudomonas*, *Bacillus*, *Rhizobium*) et les

champignons (*Aspergillus*, *Penicillium*), libèrent le phosphore sous une forme assimilable par les plantes. Ce mécanisme repose sur plusieurs stratégies : l'acidification du milieu par la production d'acides organiques (gluconique, citrique, oxalique) qui chélatent les cations tels que Ca^{2+}, Fe^{3+} et Al^{3+}, rendant ainsi les phosphates plus solubles. En parallèle, ces microorganismes sécrètent des enzymes, comme les phosphatases (notamment les phytases), qui hydrolysent les composés organophosphatés. Enfin, la libération de protons (H^+) par l'exportation active ou via la respiration microbienne contribue également à l'augmentation de la disponibilité du phosphore dans le sol, facilitant son absorption par les plantes. **(Rodríguez, & Fraga,1999)**

12.1.2. Solubilisation chimique

La solubilisation chimique du phosphore dans le sol peut être réalisée par l'ajout d'engrais phosphatés solubles, tels que le superphosphate, qui libèrent directement le phosphore sous une forme accessible pour les plantes. En parallèle, l'acidification du sol, par l'apport de soufre ou d'acides organiques, favorise également la dissolution des phosphates insolubles, augmentant ainsi leur disponibilité pour l'absorption racinaire. **(Sharma et al., 2013)**

12.2.Importance agronomique

L'importance agronomique de la solubilisation du phosphore réside dans sa capacité à améliorer la disponibilité de cet élément essentiel pour les plantes, favorisant ainsi leur croissance et leur développement. Ce mécanisme permet également de réduire la dépendance aux engrais chimiques, limitant les impacts environnementaux tout en optimisant l'efficacité nutritive. De plus, l'utilisation de biostimulants microbiens pour stimuler cette solubilisation contribue à une agriculture plus durable, respectueuse des écosystèmes et économiquement avantageuse pour les agriculteurs. **(Gyaneshwar et al , 2002)**

13.Solubilisation du potassium

La solubilisation du potassium (K) est un processus biologique et chimique qui convertit les formes insolubles de potassium (K) en ions K^+ assimilables par les plantes. Ce mécanisme est essentiel pour améliorer la fertilité des sols, notamment dans les régions où le potassium est piégé dans des minéraux comme les feldspaths et les micas. (**Meena et al., 2014)**

13.1. Mécanismes de solubilisation du potassium

13.1.1. Solubilisation microbienne (biologique)

La solubilisation microbienne du potassium est un processus biologique par lequel certaines bactéries et champignons libèrent cet élément essentiel à partir de minéraux présents dans le sol. Cette mobilisation repose sur plusieurs mécanismes : l'acidification du milieu par la production d'acides organiques (citrique, oxalique, tartrique) qui dissolvent les minéraux tels que le feldspath et le mica, la chélation qui permet de complexer les ions (Ca^{2+}, Mg^{2+}) associés au potassium, et la sécrétion d'exopolysaccharides facilitant la désagrégation des roches. En outre, certaines bactéries, comme *Bacillus mucilaginosus*, produisent des enzymes capables de dissoudre les silicates, libérant ainsi le potassium piégé dans ces structures minérales. Parmi les principaux microorganismes solubilisateurs de potassium, on retrouve les bactéries *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Paenibacillus* ainsi que les champignons *Aspergillus* et *Penicillium***(Sheng et al ,2002)**

13.1.2. Solubilisation chimique

La solubilisation chimique du potassium dans le sol peut être optimisée par l'application d'engrais potassiques solubles, tels que le chlorure de potassium (KCl) et le sulfate de potassium (K_2SO_4). En parallèle, l'acidification du sol, obtenue par l'ajout de matière organique ou d'acides humiques, favorise également la libération du potassium, le rendant plus disponible pour l'absorption racinaire des plantes. **(Liu et al.,2012)**

13.2.Importance agronomique

L'importance agronomique de la solubilisation du potassium se manifeste par une amélioration significative de la croissance des plantes, notamment grâce à la stimulation de la photosynthèse et à l'activation enzymatique **(Basak et al, 2009)**. Cette disponibilité accrue en potassium permet également de réduire le recours aux engrais chimiques, contribuant ainsi à une agriculture plus durable. De plus, un apport suffisant en potassium renforce la résistance des plantes face au stress hydrique et aux maladies, optimisant leur développement et leur productivité. **(Zhang, & Kong, 2014).**

14.Solubilisation du calcium

La solubilisation du calcium (Ca) est un processus important pour rendre le calcium, souvent présent sous forme insoluble (carbonates, phosphates, sulfates), disponible pour les plantes et les microorganismes du sol. **(Gadd,et al ., 2010)**

14.1. Mécanismes de solubilisation du calcium

14.1.1. Solubilisation microbienne

La solubilisation microbienne du calcium est un processus biologique par lequel certains microorganismes rendent cet élément plus disponible pour les plantes. Ce mécanisme repose sur plusieurs stratégies : la production d'acides organiques tels que l'acide gluconique, citrique et oxalique, qui chélatent les ions Ca^{2+} ou dissolvent les minéraux calcaires. En parallèle, la respiration microbienne libère du CO_2, lequel se combine avec l'eau pour former de l'acide carbonique (H_2CO_3), capable de dissoudre les carbonates de calcium présents dans le sol. De plus, certains microorganismes sécrètent des enzymes spécifiques, comme les phosphatases et les sulfatases, qui hydrolysent les composés organiques contenant du calcium. Ce processus est également amplifié par une réduction du pH autour des racines, un phénomène connu sous le nom d'effet rhizosphérique. Les principaux microorganismes impliqués dans cette solubilisation sont des bactéries telles que *Bacillus, Pseudomonas* et *Rhizobium*, ainsi que des champignons du genre *Aspergillus* et *Penicillium*, sans oublier certaines cyanobactéries. **(Uroz et al., 2009)**

14.1.2. Solubilisation chimique

La solubilisation chimique du calcium dans le sol peut être facilitée par plusieurs méthodes. L'acidification du sol, réalisée par l'application d'engrais ammoniacaux ou de soufre élémentaire, augmente la disponibilité du calcium en libérant les ions Ca^{2+} des complexes minéraux. L'ajout de chélateurs tels que l'EDTA ou les acides humiques contribue également à mobiliser le calcium en formant des complexes solubles. Enfin, l'utilisation de gypse ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), un composé hautement soluble, permet un apport direct de calcium assimilable par les plantes. **(Uroz et al. ,2009).**

14.2.Importance agronomique et ecologique

se traduit par une meilleure disponibilité de cet élément essentiel pour les plantes, jouant un rôle crucial dans la formation de la paroi cellulaire et la division cellulaire. De plus, l'apport en calcium contribue à réguler le pH des sols alcalins, améliorant ainsi les conditions de croissance pour les cultures. Sur le plan structurel, le calcium favorise l'agrégation des sols par la formation de complexes argilo-humiques, ce qui améliore l'aération et la rétention d'eau. Par ailleurs, dans les sols acides, le calcium permet de réduire la toxicité de l'aluminium, offrant un environnement plus favorable au développement racinaire et à l'absorption des nutriments. **(Barker et al., 1998)**

Chapitre 2

Matériel et méthodes

1.Présentation de la zone d’étude

1.1 Présentation de la zone d’échantillonnage

Morsott est une commune du nord-est algérien, située à environ 35 km au nord de la ville de Tébessa, chef-lieu de la wilaya du même nom. Elle fait partie de la région des Hauts Plateaux orientaux, proche de la frontière tunisienne.

Coordonnées géographiques :

Latitude : 35.668° N

Longitude : 8.007° E



Fig.2 : Paysage de la region de Morsot

Le sol de la région de Morsott, située au nord de la wilaya de Tébessa en Algérie, présente des caractéristiques spécifiques influencées par des facteurs géologiques, climatiques et anthropiques. Cette région, à climat semi-aride, reçoit une pluviométrie annuelle moyenne d'environ 400 mm, ce qui affecte la nature et la qualité des sols.

L’étude a été réalisée sur un terrain situé dans une zone semi-aride caractérisée par un sol brun à texture limoneuse à argilo-limoneuse (**voir Figure 3.).**



Fig.3: Différents échantillons de sole récoltés, suivant les régions (google earth)

1.2 Description de la méthode d’échantillonnage

Les échantillons (E1) et (E2) et (E3) de la même sol qui étudié , Se suit au niveau de la zone de Morsott.

Tab . 3 : Coordonnées géographiques des sites de prélèvements

Les echantillons	Latitude	Longitude	Altitude
E1	N 42 . 35°	E 20.7.7°	900m
E2	N 42 . 35°	E 20.7.7°	900m
E3	N 42 . 35°	E 20.7.7°	900m



a – E1 b – E2 c –E3



D_Zone d’échantillonnage

Fig.4 :les echantillon E1 E2 E3

2.Origine et Description des Échantillons de Sol

Les échantillons ont été prélevés sur le site de Morsot, situé dans le Nord de la wilaya de Tébessa. Le prélèvement a été effectué à une profondeur de 12 cm, spécifiquement dans la zone de la rhizosphère. La collecte a été réalisée à l'aide d'une pelle stérile afin d'éviter toute contamination, puis les échantillons ont été conservés dans des flacons en verre stériles jusqu'à leur analyse.



Fig.5 : Methode de prelevement des echantillons

3. Isolement et conservation des bactéries

Les bacteries sont collectées sur milieu nutritif (gelose nutritive) à differentes concentration en NaCl (0 g/L, 5 g/L, 10 g/L, 15 g/L, 20 g/L) **Tab.(4)** à partir d'une dilution de 1 g dans 10 mL d'eau distillée sterile pour chaque echatillons. Les bacteries choisies conserver dans 10 mL de bouillons nutritif additionner par 3 mL de glycerol, puis placer au froid à 4C°.

Tab.4: Codification des isolats collectés à partir des differents échantillons

Codes isolats (E_{abc})	Echantillon (a)	Concentration NaCl (b)	Numéro d'isolats (c)
E131	1	15g/L	1
E132	1	15g/L	2
E133	1	15/gL	3
E141	1	20g/L	1
E142	1	20g/L	2
E143	1	20g/L	3
E231	2	15g/L	1
E232	2	15g/L	2
E241	2	20g/L	1
E242	2	20g/L	2
E331	3	15g/L	1
E332	3	15g/L	2
E341	3	20g/L	1
E342	3	20g/L	2

4. Parametres d'étude

4.1 Solubilisation du phosphate

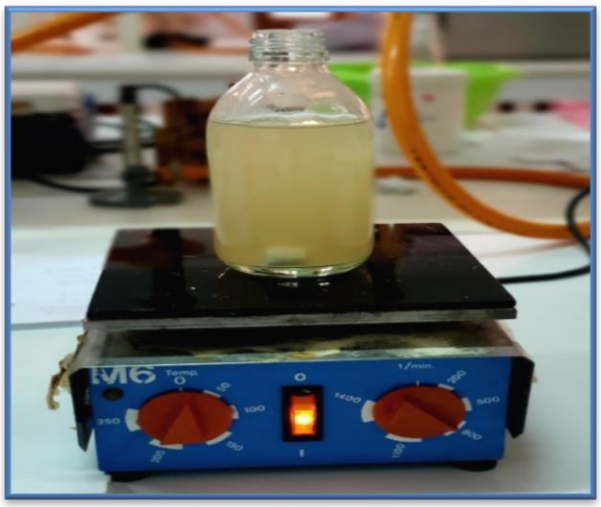
Quatre piqures sont réalisées (quatre répétitions) à la surface de chaque boîte de Pétri contenant le milieu gélosé NBRIP, à l'aide d'un cure dent stérile et ensemencer par la culture bactérienne. Les boîtes sont ensuite incubées à 28°C pendant 7jours.

La capacité de solubilisation est évaluée par la présence d'un halo clair autour de la colonie, traduisant la lyse du milieu. **(Nautiyal *et al.*, 1999)**

Tab.5 : Composition du milieu NBRIP liquide **(Nautiyal *et al.*, 1999)**

Milieu NBRIP liquide :	
Ingrédients	**g/l**
- Glucose	10,0
- Tricalcium phosphate	5,0
- Magnesium chloryde hexahydrate	5,0
- Magnesium sulphate heptahydrate	0,25
- Potassium chloride	0,2
- Ammonium sulphate	0,1
- Eau distillée	1000 ml

Cette efficience de solubilisation est estimée comme un indice Diamètre de solubilisation / Diamètre de croissance. **(Gonzalez *et al.*, 2018 ; Abiala *et al.*, 2015)**



(a)



(b)



(c)

Fig6: (a ;b,c) prepation de milieu NBIRIP

4.2 Solubilisation de potassium

Quatre inoculations sont effectuées à la surface de chaque boîte de Pétri contenant le milieu gélosé Aleksandrow, en utilisant un cure-dent stérile imprégné de la culture bactérienne. Les boîtes sont ensuite incubées à 28 °C pendant une durée de 7 jours.

Tab.6 :Composition du milieu Aleksandrow **(Meena *et al.*, 2013)**

Milieu Aleksandrow	
Ingrédients	**g/l**
- $Mg\ SO_4\ 7.H_20$	0,005
- Mica (source de K)	2,0
- $Ca\ HPO_4$	2,0
- $Ca\ CO_3$	2,0
- $Fe\ Cl_3$	0,1
- Glucose	5,0
- Eau distillée	1000 ml
- pH	7,2+0,2

Ce milieu permet de détecter les bactéries solubilisatrices de potassium par la formation de (zones claires) autour des colonies, indiquant la libération de potassium à partir du mica ou d'autres minéraux insolubles

L'indice d'efficience de solubilisation est estimée comme suit :

Diamètre de solubilisation (zone claire) / Diamètre de croissance de la colonie bactérienne **(Gonzalez *et al.*, 2018) ;(Abiala *et al.*, 2015)**

4.3 Solubilisation de calcuim

Chaque boîte de Pétri contenant le milieu gélosé Pikovskaya fait l'objet de quatre inoculations à sa surface, à l'aide d'un cure-dent stérile imbibé de la culture bactérienne. Les boîtes sont ensuite placées en incubation à 28 °C pendant 7 jours.

L'indice d'efficience de solubilisation est estimé en calculant le rapport entre le diamètre de la zone de solubilisation (zone claire) et le diamètre de la colonie bactérienne. **(Gonzalez *et al.*, 2018); (Abiala *et al.*, 2015)**

Tab.7 : compostion de milieu PIKOVASKAYA **(Pikovskaya1948)**

milieu PIKOVASKAYA	
Ingrédients	**g/l**
• Glucose	10
• Phosphate de calcium ($Ca_3(PO_4)_2$	5.0
• Chlorure d'ammonium (NH_4Cl)	0.5
• Chlorure de potassium (KCl)	0.2
• Sulfate de magnésium ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$)	0.1
• Sulfate de manganèse ($MnSO_4 \cdot H_2O$)	0.002
• Sulfate de fer ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$)	0.002
• Gélose	15.0
• Eau distillée	1000 mL
• pH final	7.0 ± 0.2

5. Analyses Statistiques

La répresentation grafiques des moyennes plus au moins écatype des données obtenues sous formes d'histogrammes afin de visualiser la distribution des observations autour de la moyenne et de reperer les obserations abérantes, suivi d'une analyse de la variance pour mettre en evidence la biodiversité du comportement des isolats via a vis la solubilisation des mineraux testés suivis d'un test a posteriorie de Tukey, afin de regrouper les isolats qui manifestent des aptitudes significativement différentes ou semblable pour la solubilisation, et en dernier une représentation des données obtenues sous forme de Venndiagramme pour faire ressortir les isolats qui sont dottés par des traits PGPR d'iinteret.

Chapitre 3

Résultats et discussion

1.Isolement des souches pures

Seule les concentrations 15g /L et 20g/L ont favorisé la croissance des bacteries, par contre les autres cultures avec les concentrations 0g /L, 5 g /L et 10 g /L n'ont pas presenté des culture bacterienne ce qui nous permet de qualifier nous isolats par des bacteries haloresistantes.

Les environnements hypersalés abritent une diversité considérable d'archées extrêmement halophiles ainsi que de bactéries halophiles et halotolérantes (**Oren, 2002)**. Au cours des dernières années, la diversité microbienne de ces environnements hypersalés a été largement explorée en utilisant à la fois des techniques dépendantes et indépendantes de la culture **(Benlloch et al., 1995) ;(Borsodi et al., 2013)** ; **(Burns et al., 2004)** ; **(Youssef et al., 2012).** Les procaryotes halophiles ont été retrouvés dans une grande variété de milieux salins répartis sur différentes zones géographiques, y compris les lacs salés, les marais salants marins et les sols salins **(de la Haba et al., 2011) ; (Lizama et al., 2001).** Les haloarchées sont caractérisées comme des extrêmophiles nécessitant au moins 1,5 M de NaCl, avec une croissance optimale entre 15 et 30 % (soit 2,5 à 5,2 M) **(Litchfield, 2011)**. Elles possèdent une capacité unique à survivre et à se développer dans des concentrations élevées en sel, ce qui en fait d'excellents systèmes modèles pour comprendre les bases moléculaires de l'adaptation à la forte salinité **(Oren, 2002).** (**Menasria,Ahmed.,2018).**

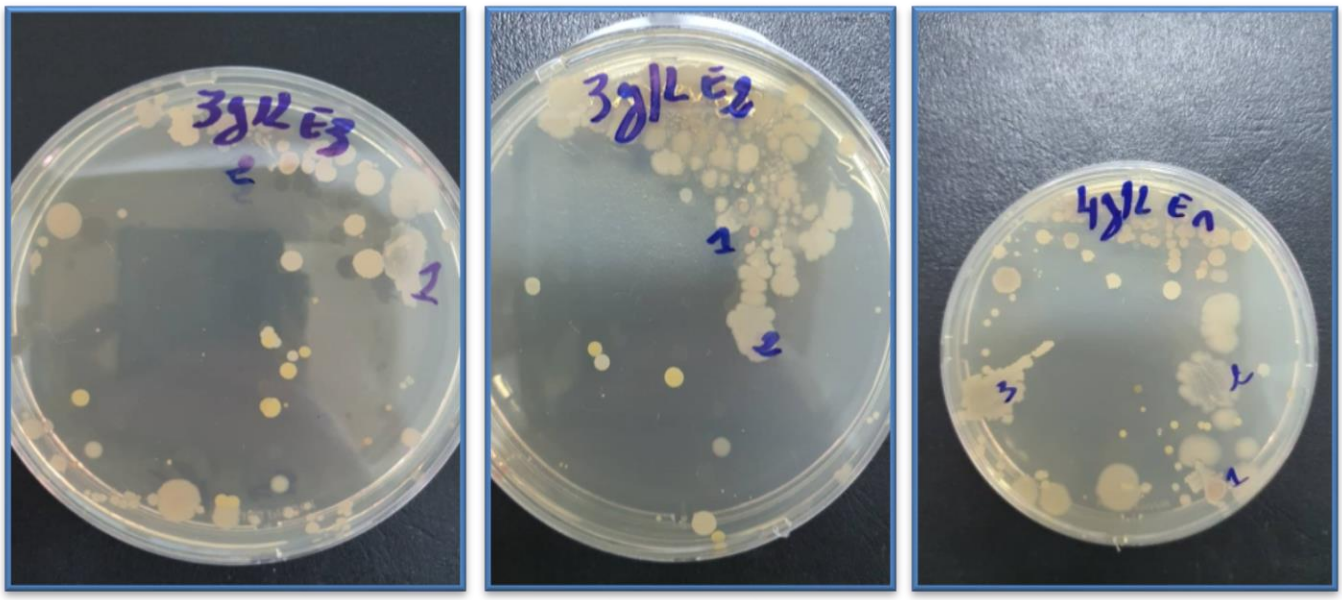


Fig.7: Résultat isolment de souche pure 15g /L et 20g/L

2. Solubilisation du phosphate

La figure illustre la formation d'une zone de lyse autour des colonies bactériennes, témoignant de la capacité des isolats à solubiliser le phosphate. Cette aptitude est particulièrement prononcée chez l'isolat E332, qui présente l'indice de solubilisation le plus élevé.

L'histogramme révèle que tous les isolats testés possèdent une capacité à solubiliser le phosphate, mais à des degrés différents. L'isolat E143 présente l'indice de solubilisation le plus élevé, avoisinant 2,2, ce qui en fait le plus performant. Toutefois, la taille relativement importante de sa barre d'erreur indique une variation notable entre les répétitions. Cet isolat est marqué par la lettre A, signifiant qu'il est statistiquement différent des isolats E142 et E332. Ces deux derniers présentent des indices de solubilisation plus faibles, d'environ 1,5 pour E142 et 1,4 pour E332, avec des barres d'erreur plus réduites, traduisant une plus faible variabilité. Leur marquage commun par la lettre B indique qu'il n'existe pas de différence statistique significative entre eux. En somme, E143 se distingue significativement des deux autres isolats par son efficacité supérieure en matière de solubilisation du phosphate.

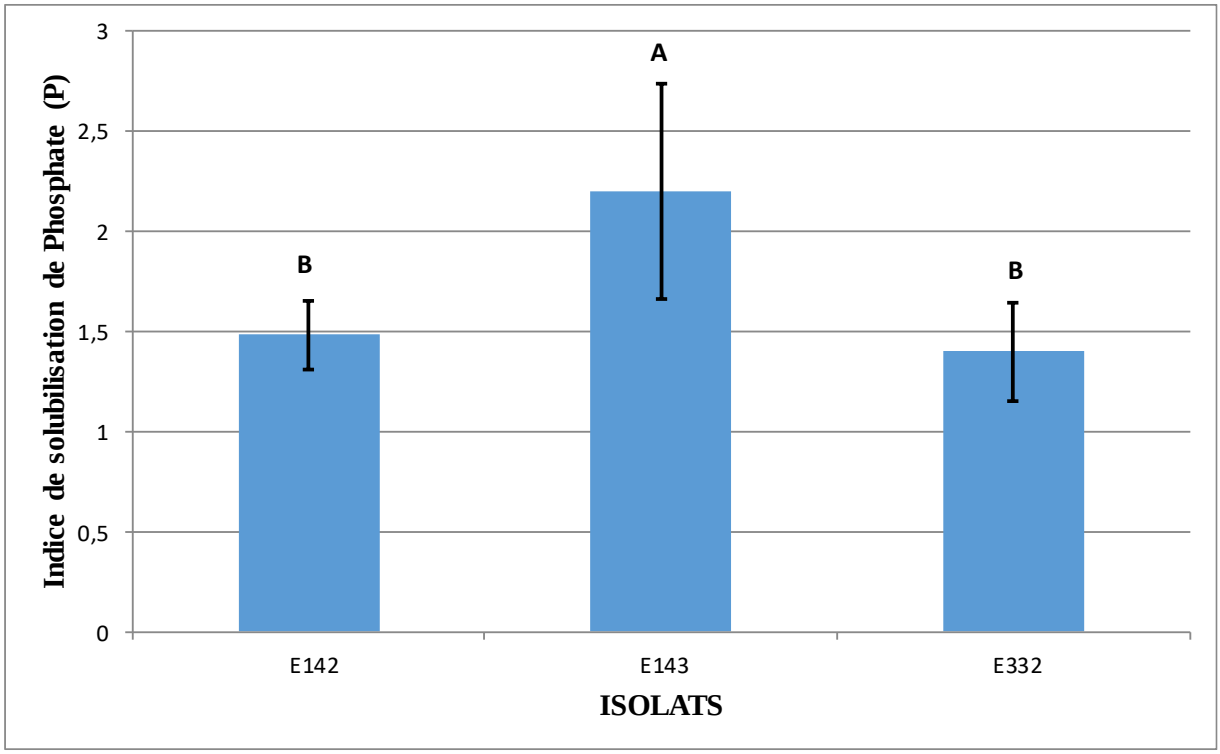


Fig. 8 : histogramme montrant l'indice de solubilisation du phosphate

L’analyse de variance est réalisée sur les isolats révèle une différence significative entre les groupes étudiés. En effet, la valeur de F obtenue est de 6,08 avec un degré de liberté de 2 pour les isolats et de 9 pour l’erreur. Cette valeur de F est associée à une **valeur de p de 0,021**, indiquant que les différences observées entre les isolats sont statistiquement significatives au seuil de 5 %. Autrement dit, il existe une probabilité très faible (2,1 %) que ces différences soient dues au hasard. La somme des carrés ajustée pour les isolats est de 1,549, ce qui montre que ces derniers expliquent une part importante de la variance totale (2,695). Ces résultats suggèrent que les isolats n'ont pas tous le même comportement vis-à-vis du Solubilisation du phosphate.

L'isolat E143 se distingue par une moyenne nettement plus élevée (2,2+- 0.541) par rapport aux deux autres isolats, ce qui justifie son classement exclusif dans le groupe A. En revanche, les isolats E142, avec une moyenne de (1,4826+- 0.169), et E332, avec une moyenne de (1,4+-0.244) présentent des valeurs relativement proches. Leur appartenance commune au groupe B indique qu'il n'existe pas de différence statistiquement significative entre eux.

Tab 8 : Analyse de variance de solubilisation de phosphat

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeurde p
Isolats	2	1,549	0,7743	6,08	0,021*
Erreur	9	1,146	0,1274		
Total	11	2,695			

Tab 9 : Comparaisons deux à deux de Tukey soulubilisation de phosphat

Isolats	**N**	**Moyenne**	**Groupement**
E143	4	2,2	A
E142	4	1,4826	B
E332	4	1,4	B

La disponibilité du phosphore (P) dans les sols représente un facteur essentiel pour la croissance et le développement des plantes. Toutefois, dans les sols salins, la solubilité du phosphate est considérablement réduite en raison de conditions chimiques défavorables, telles qu’une salinité accrue, une élévation du pH et la précipitation du phosphore sous forme de sels peu solubles. Ces conditions entraînent une carence en phosphore assimilable, affectant

négativement la nutrition phosphatée des plantes, en particulier dans les zones arides et semi-arides. La salinité agit notamment en favorisant la fixation du phosphate par des ions comme le calcium, le fer ou l'aluminium, selon le pH du sol **(Qadir et al., 2007).** Dans les sols sodiques, où le pH dépasse fréquemment 8, le phosphate précipite principalement sous forme de phosphate tricalcique, ce qui rend ce nutriment peu disponible pour les plantes **(García-López et al., 2010)**. Face à cette problématique, l'utilisation de micro-organismes solubilisateurs de phosphate (PSB) émerge comme une alternative prometteuse. Ces microorganismes, appartenant notamment aux genres *Pseudomonas*, *Bacillus* ou *Aspergillus*, possèdent la capacité de libérer le phosphate à partir de composés insolubles par la production d'acides organiques (comme les acides gluconique, citrique ou oxalique) ou d'enzymes telles que les phosphatases **(Zaidi et al., 2009)**. Dans les environnements salins, certaines souches halotolérantes de PSB ont démontré une efficacité notable à solubiliser le phosphate, même sous des conditions de salinité élevée, grâce à leur aptitude à acidifier leur environnement immédiat **(Shrivastava & Kumar, 2015)**. Des recherches ont mis en évidence que l'inoculation des sols salins avec ces PSB halotolérants améliore non seulement la disponibilité du phosphore, mais favorise également la tolérance des plantes au stress salin **(Egamberdieva et al., 2017)**. En complément, l'intégration des PSB avec des pratiques culturales telles que l'amendement en matière organique ou en biochar contribue à renforcer l'efficacité du phosphore dans les sols dégradés **(Zhu et al., 2020)**. Ainsi, une approche de gestion intégrée de la nutrition phosphatée dans les sols salins, incluant l'usage de PSB, s'impose comme une stratégie agroécologique durable, permettant d'accroître la disponibilité du phosphore, de réduire l'usage des engrais minéraux et de promouvoir une agriculture résiliente face aux stress salins.

3. Solubilisation du potassium

La zone claire observée autour des colonies bactériennes (Figure 10.) indique la solubilisation du potassium, avec une efficacité maximale enregistrée pour l'isolat E331, qui a présenté l'indice de solubilisation le plus élevé

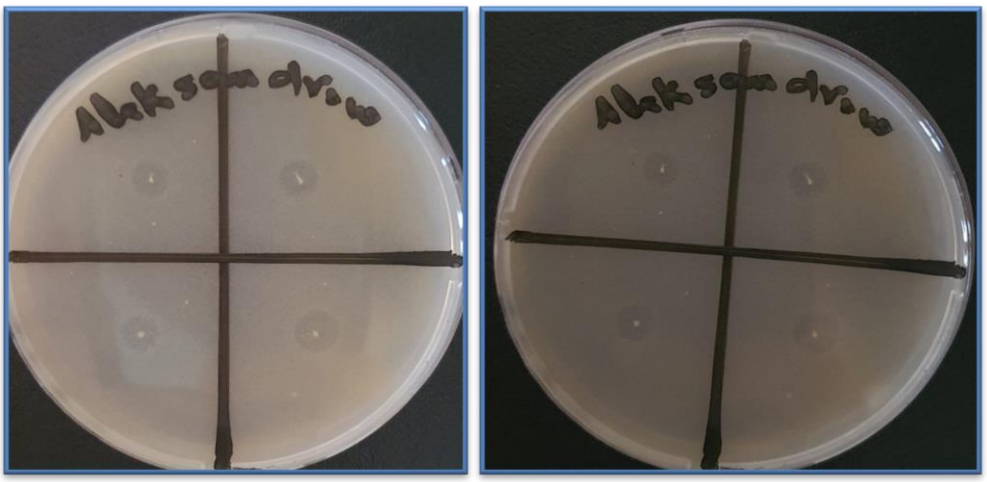


Fig. 9: Résultat Solubilisation du potasium

L'histogramme montre que l'isolat E341 a la plus grande capacité de solubilisation du potassium, avec une moyenne élevée (9.43+-4.36)bien qu'il présente une variation importante entre les répétitions. L'isolat E232 a une capacité moyenne, avec des résultats plus stables(5.45+-0.75). En revanche, l'isolat E331 présente la plus faible capacité de solubilisation, avec peu de variation(2.875+-0.69). Ces résultats indiquent que E341 est le plus efficace, tandis que E232 reste intermédiaire et E331 est le moins performant.

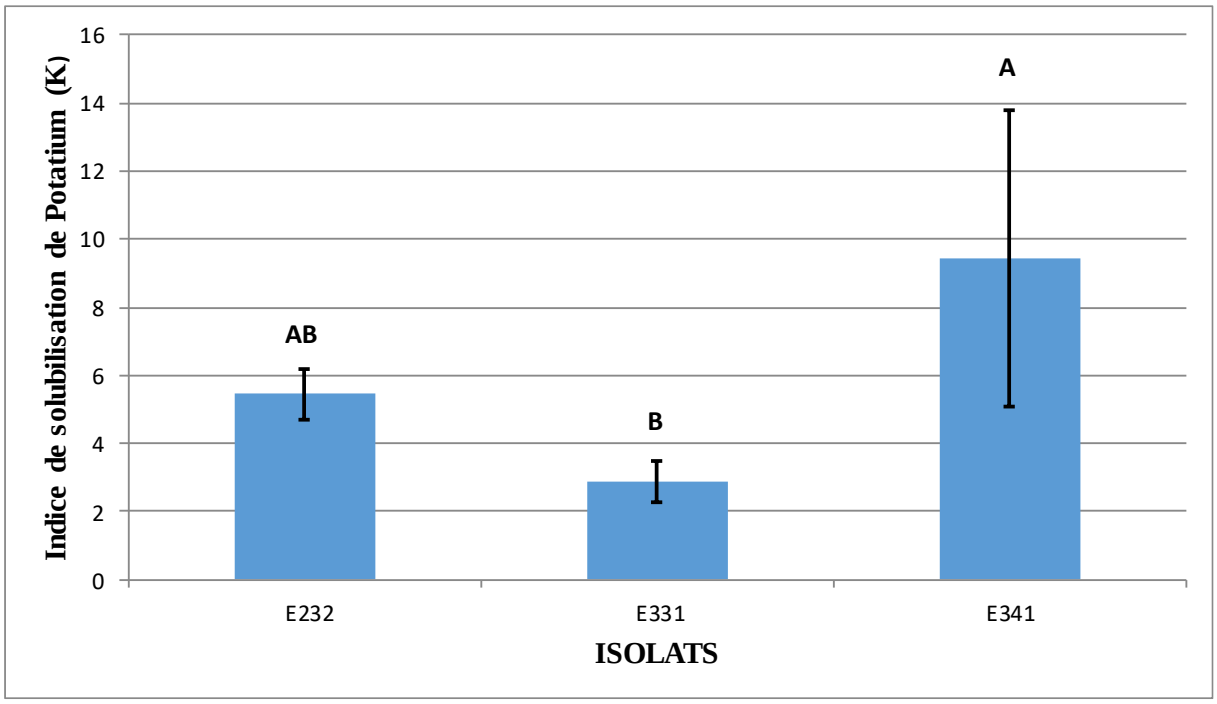


Fig. 10 : histogramme montrant l'indice de solubilisation du potassuim

L'analyse de variance effectuée sur les teneurs en potassium montre une différence statistiquement significative entre les isolats. La valeur de F obtenue est de **6,53** avec un degré de liberté de 2 pour les isolats et de 9 pour l'erreur. Cette valeur est associée à une **valeur de p de 0,018**, ce qui est inférieure au seuil de signification de 5 %. Cela indique que les différences observées entre les isolats en termes de concentration en potassium ne sont pas dues au hasard, mais sont bien significatives. La somme des carrés ajustée attribuée aux isolats (87,35) est largement supérieure à celle de l'erreur (60,18), ce qui confirme que les isolats contribuent de manière importante à la variation totale (147,53). Le carré moyen ajusté pour les isolats (43,673) est également nettement plus élevé que celui de l'erreur (6,687), ce qui renforce la validité de l'effet observé. Ces résultats suggèrent que le potassium varie significativement entre les différents isolats, et une analyse post-hoc serait utile pour identifier spécifiquement quelles paires d'isolats présentent des différences significative.

L'isolat E341 présente la capacité de solubilisation du potassium la plus élevée, avec une moyenne de (9,43+-4.36) ce qui lui vaut son classement exclusif dans le groupe A et traduit une différence statistiquement significative par rapport à l'isolat E331. De son côté, l'isolat E232 affiche une moyenne intermédiaire de (5,45+-0.75) et se positionne à la jonction des groupes A et B. Cette double appartenance indique qu'il ne diffère pas significativement ni de E341 ni de E331, ce qui en fait un isolat de transition. Enfin, l'isolat E331, avec la moyenne la plus faible (2,875+-0.69), est uniquement classé dans le groupe B, soulignant une différence significative avec E341, mais non significative avec E232.

Tab .10 :Analyse de variance de solubilisation de potassium

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeurde p
Isolats	2	87,35	43,673	6,53	0,018*
Erreur	9	60,18	6,687		
Total	11	147,53			

Tab. 11 : Comparaisons deux à deux de Tukey potassium

Isolats	**N**	**Moyenne**	**Groupement**	
E341	4	9,43	A	
E232	4	5,45	A	B
E331	4	2,875		B

Le potassium (K) est un élément minéral fondamental pour la croissance et le développement des plantes, jouant un rôle déterminant dans divers processus physiologiques tels que la photosynthèse, la régulation stomatique, l'équilibre hydrique et la synthèse des protéines. Bien qu'il soit présent en quantités relativement importantes dans les sols, la majorité du potassium est lié à des minéraux insolubles tels que les feldspaths, les micas et les illites, ce qui limite sa disponibilité pour les plantes. Cette indisponibilité est exacerbée dans les sols salins, où les conditions physico-chimiques, notamment l'augmentation de la salinité et du pH, perturbent davantage la libération du potassium assimilable **(Rathore et al., 2021).** Dans ce contexte, la méthode d'Aleksandrov, développée au début du XXe siècle, constitue une approche utile pour évaluer la capacité des micro-organismes à solubiliser le potassium à partir de sources minérales insolubles. Cette méthode repose sur l'utilisation de milieux de culture contenant des minéraux comme le feldspath en tant que seule source de potassium, permettant ainsi de détecter et d'isoler des bactéries ou des champignons capables de libérer

le potassium par des mécanismes biochimiques **(Aleksandrov, 1925) ;(Hu et al., 2006)**. Parmi les micro-organismes identifiés, certaines espèces de *Bacillus*, *Paenibacillus*, *Pseudomonas* et *Aspergillus* ont démontré une forte capacité à solubiliser le potassium par la production d'acides organiques, tels que l'acide citrique, gluconique et oxalique, qui attaquent la structure cristalline des silicates, libérant ainsi le potassium échangeable dans le sol **(Etesami et al., 2017).** Dans les sols salins, les souches halotolérantes de ces microorganismes se montrent particulièrement efficaces, car elles peuvent survivre et fonctionner dans des conditions de salinité élevée, maintenant leur activité enzymatique et la production d'agents solubilisants **(Meena et al., 2016)**. Plusieurs études ont montré que l'inoculation des sols salins avec ces bactéries solubilisatrices de potassium (KSB) améliore non seulement la disponibilité en potassium, mais également la croissance des plantes, leur absorption d'eau et leur tolérance au stress salin, en particulier chez les espèces sensibles comme le blé et la tomate **(Verma et al., 2021).** Ainsi, l'utilisation de biofertilisants à base de KSB représente une alternative écologique et durable aux engrais chimiques, en optimisant la nutrition potassique tout en réduisant les impacts environnementaux. L'évaluation de ces micro-organismes via des méthodes comme celle d'Aleksandrov demeure cruciale pour sélectionner les souches les plus efficaces et adaptées aux conditions salines

4. Solubilastion de calcium

La zone claire entourant les colonies bactériennes (Figure 11.) témoigne de la capacité de solubilisation du calcium.

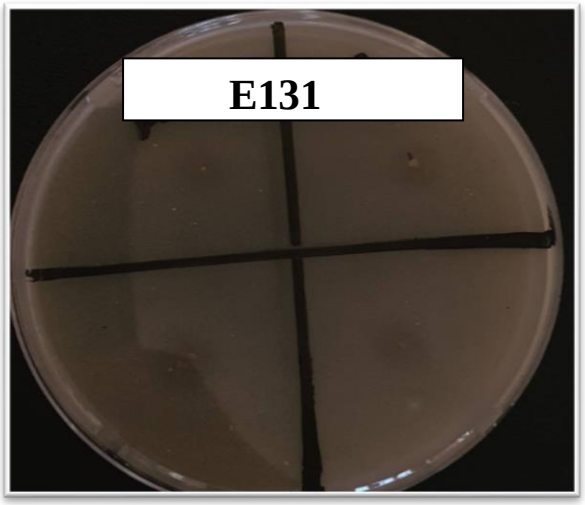


Fig. 11 : Résultat Solubilisation du calcium

L'histogramme montre que tous les isolats ont une capacité de solubilisation du calcium relativement faible et proche. L'isolat E133 a la moyenne la plus élevée(2.44+-1.16), ce qui suggère une meilleure activité, mais il présente aussi une grande variation entre les répétitions. Les isolats E131(1.84+-0.76), E141,(1.36+-0.29) E232(1.43+-0.21) et E331 ont des valeurs moyennes assez similaires, autour de 1,5 à 1,8, avec des barres d'erreur qui se chevauchent, ce qui indique qu'il n'y a pas de différence claire entre eux. En général, aucun isolat ne se démarque fortement, et les performances restent

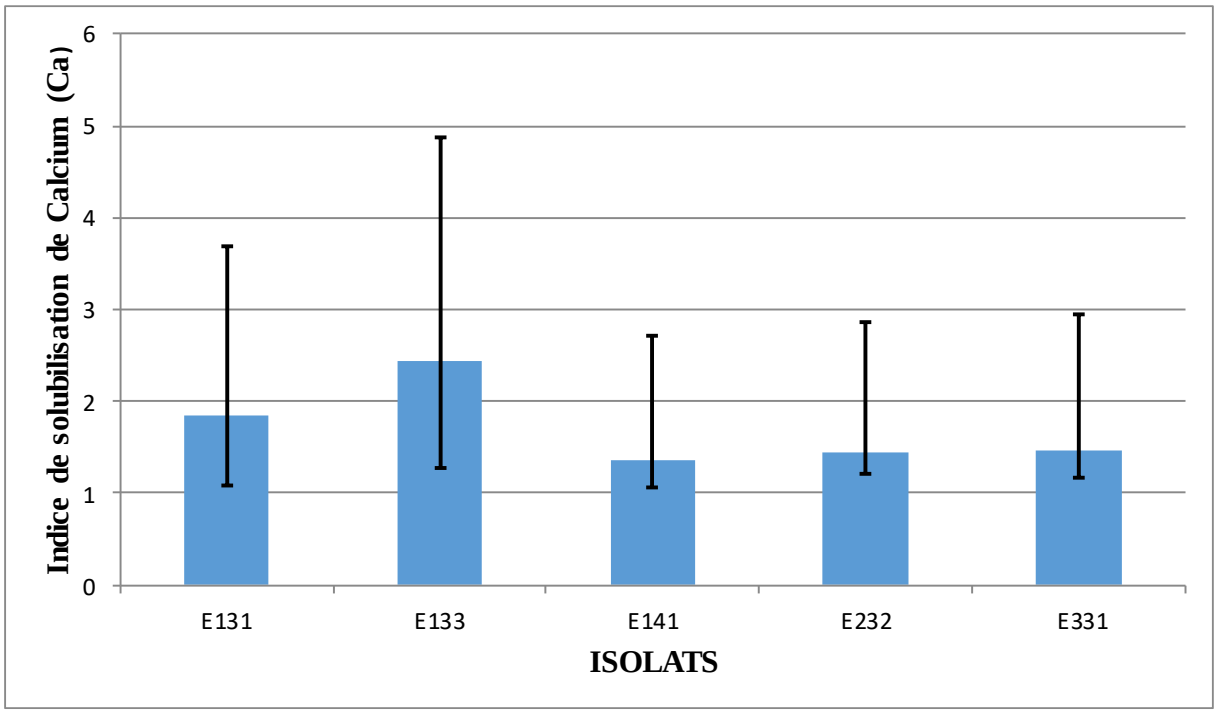


Fig.12 : Histogramme montrant l'indice de solubilisation du calsium

L'analyse de variance appliquée aux données de calcium ne révèle pas de différence significative entre les isolats. En effet, la valeur de F obtenue est de **1,87** avec un degré de liberté de 4 pour les isolats et de 15 pour l'erreur. La **valeur de p associée est de 0,169**, soit bien supérieure au seuil de signification de 0,05, ce qui indique que les différences observées entre les isolats ne sont pas statistiquement significatives. La somme des carrés ajustée pour les isolats (3,233) reste inférieure à celle de l'erreur (6,498), suggérant que la variation entre les isolats est relativement faible comparée à la variation résiduelle. Par conséquent, on ne put pas conclure à une influence significative des isolats sur la teneur en calcium.

Tab 12 : Analyse de variance de soluboulisation de calsuim

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeurde p
Isolats	4	3,233	0,8083	1,87	0,169 NS
Erreur	15	6,498	0,4332		
Total	19	9,732			

Dans les sols salins, la disponibilité du calcium, élément essentiel pour la croissance et le développement des plantes, se trouve souvent réduite en raison de sa précipitation sous forme de composés insolubles tels que le phosphate tricalcique et le carbonate de calcium

(Shrivastava & Kumar, 2015). Cette indisponibilité est aggravée par l'alcalinité et la forte teneur en sodium de ces sols, qui perturbent l'équilibre ionique du sol et affectent négativement la nutrition calcique des plantes. La méthode de Pikovskaya (1948), bien que conçue initialement pour détecter les microorganismes solubilisant le phosphate, permet également de mettre en évidence la capacité de certains microorganismes à solubiliser le calcium en libérant ce dernier lors de la dissolution du phosphate tricalcique. Des bactéries telles que *Bacillus subtilis* et *Pseudomonas fluorescens*, ainsi que des champignons comme *Aspergillus niger* et *Penicillium spp.*, ont été identifiés comme producteurs d'acides organiques (gluconique, citrique, oxalique) capables d'abaisser le pH local et de solubiliser les formes insolubles de calcium **(Khan, Zaidi, & Wani, 2007) ; (Ahmad et al., 2016).** En conditions salines, l'efficacité de ces micro-organismes persiste, surtout chez les souches halotolérantes, qui peuvent ainsi améliorer la disponibilité en calcium tout en renforçant la tolérance des plantes au stress salin par le maintien d'un rapport Ca^{2+}/Na^{+} favorable **(Zaidi, Khan, & Amil, 2003).** Plusieurs recherches ont démontré qu'une inoculation avec ces microorganismes entraîne une amélioration significative de la croissance, de la biomasse et de l'absorption de calcium chez des cultures telles que le riz, le blé ou encore la tomate, cultivées en milieux salins (**Singh, & Juwarkar, 2011)** ; **(Han, & Lee, 2006).** En outre, l'association de ces bio-inoculants avec des amendements organiques permet de stimuler leur activité et de favoriser une meilleure structure du sol, contribuant à une gestion durable de la salinité **(Ahmad et al., 2016).** Par conséquent, l'application de micro-organismes solubilisateurs de calcium, identifiés via la méthode de Pikovskaya, représente une stratégie prometteuse pour améliorer la fertilité des sols salins tout en réduisant la dépendance aux engrais chimiques.

5. Les traits PGPR des isolats testés

La projection des resultats obtenus dans le Venndiagramme, nous fais ressortir que les isolats sont repartis en quatre groupe different expliquant le comportement des bacteries vis avis la silubilisation des mineraux. Un isolats (E341) qui solobilise le Potatium, trois isolats (E142, E143,E332) qui solubilisent le Phosphate, trois isolats (E133,E141,E131) qui solubilisent le Calcium et les deux isolats (E232,E331)qui solubilise sumultanement les deux miniranx P et K

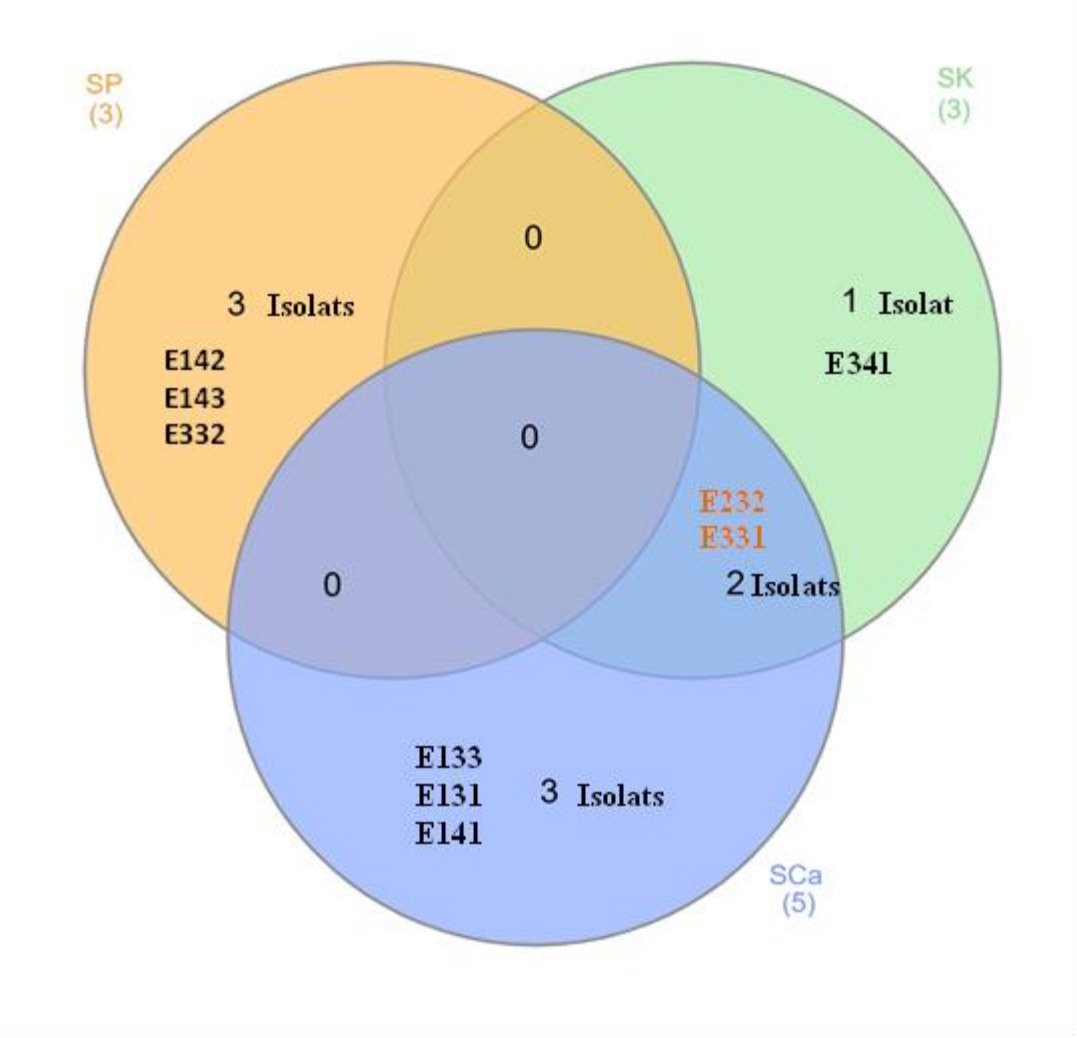


Fig.13: Venndiagramme de Les traits PGPR des isolats

Conclusion

Dans le cadre de cette étude, 14 isolats bactériens ont été obtenus à partir de 3 échantillons prélevés dans la rhizosphère d'une zone située au nord de la localité de Morsott (El Malaha), au nord de la wilaya de Tébessa, connue pour son taux élevé de salinité. Ces isolats ont été analysés en vue d'identifier des bactéries présentant des caractéristiques de type PGPR (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria), notamment leur capacité à solubiliser le phosphate, le potassium et le calcium. Les résultats ont révélé une diversité microbienne intéressante. 3 isolats ont montré une aptitude à solubiliser le phosphate, 3 autres le potassium, tandis que cinq isolats ont été capables de solubiliser le calcium. 2 isolats se sont distingués par leur capacité à solubiliser simultanément le potassium et le calcium, indiquant un fort potentiel en tant qu'agents PGPR. Ces souches pourraient ainsi être envisagées pour des applications dans des programmes d'amélioration de la productivité agricole en milieux salins.

Il est judicieux de completer se travail qui ouvre de nouvelles breches de recherches et d'études afin de valoriser les résultats obtenus en utilisant les aptitudes de ces isolats à solubilisé les mineraux et de les rondre assimilable, en asssurant une bonne productivite par leur utilisation comme des biofertilisant ou des agents de biocontroles dans un system agricole durable qui respecte l'environnement.

Références bibliographiques

1. Abd-Elgawad, M. M. M., Askary, T. H., & El-Sayed, M. A. (2023). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) and their role in plant-parasitic nematodes control: A fresh look at an old issue. *Microorganisms, 11*(2), 345.
2. Adesemoye, A. O., Torbert, H. A., & Kloepper, J. W. (2009). Plant growth-promoting rhizobacteria allow reduced application rates of chemical fertilizers. *Microbial Ecology*, *58*(4), 921–929.
3. Ahmad, M., Nadeem, S. M., Naveed, M., Zahir, Z. A., & Arshad, M. (2016). Microbial-assisted mobilization of nutrients for sustainable agriculture. In M. Miransari (Ed.), *Biological nitrogen fixation and beneficial plant-microbial interactions* (pp. 245–285). Springer.
4. Aleksandrov, V. G. (1925). *The influence of microorganisms on the potash content in the soil*. Pedology, 4, 289–296.
5. Ashraf, M., & Foolad, M. R. (2007). Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. *Environmental and Experimental Botany*, *59*(2), 206–216.
6. Ashraf, M., & Foolad, M. R. (2007). Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. *Environmental and Experimental Botany*, *59*(2), 206–216.
7. Ashraf, M., & Harris, P. J. C. (2004). Potential biochemical indicators of salinity tolerance in plants. *Plant Science*, *166*(1), 3–16.
8. Ashraf, M., & Harris, P. J. C. (2013). Photosynthesis under stressful environments: An overview. *Photosynthetica*, *51*(2), 163–190
9. Baize, D., & Girard, M. C. (1995). Référentiel pédologique. *INRA, Paris, 332*.
10. Barker, W. W., Welch, S. A., Chu, S., & Banfield, J. F. (1998). Experimental observations of the effects of bacteria on aluminosilicate weathering. *American Mineralogist*, 83(11–12), 1551–1563.
11. Basak, B. B., & Biswas, D. R. (2009). Influence of potassium solubilizing microorganism (*Bacillus mucilaginosus*) and waste mica on potassium uptake dynamics by sudan grass (*Sorghum vulgare* Pers.) grown under two Alfisols. *Plant and Soil*, *317*, 235–255.

12. Bashan, Y., de-Bashan, L. E., Prabhu, S. R., & Hernandez, J.-P. (2014). Advances in plant growth-promoting bacterial inoculant technology: Formulations and practical perspectives (1998–2013). *Plant and Soil*, *378*(1–2), 1–33.
13. Benlloch, S., López-López, A., Casamayor, E. O., Øvreås, L., Goddard, V., Daae, F. L., Smerdon, G., Massana, R., Joint, I., Thingstad, F., Pedrós-Alió, C., & Rodríguez-Valera, F. (2002). Prokaryotic genetic diversity throughout the salinity gradient of a coastal solar saltern. Environmental Microbiology, 4(6), 349–360.
14. Berendsen, R. L., Pieterse, C. M. J., & Bakker, P. A. H. M. (2012). The rhizosphere microbiome and plant health. *Trends in Plant Science*, *17*(8), 478–486.
15. Bhardwaj, D., Ansari, M. W., Sahoo, R. K., & Tuteja, N. (2014). Biofertilizers function as key player in sustainable agriculture by improving soil fertility, plant tolerance and crop productivity. *Microbial Cell Factories*, *13*, 66.
16. biala, M. A., Odebode, A. C., & Hsu, S. F. (2015). Phosphate solubilization and plant growth promotion by strains of *Pseudomonas aeruginosa* isolated from cowpea rhizosphere. *International Journal of Soil Science*, *10*(2), 66–75.
17. Borsodi, A. K., Kovács, A. L., Rusznyák, A., Vladár, P., & Márialigeti, K. (2013). Diversity and activity of microbial communities in the extremely hypersaline Lake Red in Sovata, Romania. Extremophiles, 17(1), 87–98.
18. Bouchotroch, S., Achouak, W., Bauda, P., & Heulin, T. (2001). Effect of inoculation with the rhizobacterium *Mesorhizobium loti* on the growth of *Lupinus albus* and its microbial community. *Applied and Environmental Microbiology*, *67*(6), 2617–2625.
19. Bouremani, N., Cherif-Silini, H., Silini, A., Bouket, A. C., Luptakova, L., Alenezi, F. N., Baranov, O., & Belbahri, L. (2023). Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR): A Rampart against the Adverse Effects of Drought Stress. *Water*, *15*(3), 418.
20. Burgess, B. K., & Lowe, D. J. (1996). Mechanism of molybdenum nitrogenase. *Chemical Reviews*, *96*(7), 2983–3012.
21. Burns, D. G., Camakaris, H. M., Janssen, P. H., & Dyall-Smith, M. L. (2004). Cultivation of widespread haloarchaea in low-salt media from salterns. Applied and Environmental Microbiology, 70(9), 5258–5263.
22. Chakraborty, U., Chakraborty, B. N., & Chakraborty, A. P. (2022). Plant growth-promoting rhizobacteria alleviate salinity-induced negative effects on growth, oil content and physiological status in Mentha arvensis. Industrial Crops and Products, 178, 114598.

23. Chaves, M. M., Flexas, J., & Pinheiro, C. (2009). Photosynthesis under drought and salt stress: Regulation mechanisms from whole plant to cell. *Annals of Botany*, *103*(4), 551–560.
24. Chaves, M. M., Flexas, J., & Pinheiro, C. (2009). Photosynthesis under drought and salt stress: Regulation mechanisms from whole plant to cell. *Annals of Botany*, *103*(4), 551–560.
25. Compant, S., Samad, A., Faist, H., & Sessitsch, A. (2021). A review on the plant microbiome: Ecology, functions, and emerging trends in microbial application. *Journal of Advanced Research*, *19*, 29–37.
26. De la Haba, R. R., Sánchez-Porro, C., Márquez, M. C., & Ventosa, A. (2011). Taxonomy of halophiles. In A. Ventosa, A. Oren, & Y. Ma (Eds.), Halophiles and hypersaline environments: current research and future trends (pp. 45–78). Springer.
27. Egamberdieva, D., Wirth, S. J., Alqarawi, A. A., Abd_Allah, E. F., & Hashem, A. (2019). Salt-tolerant plant growth promoting rhizobacteria for enhancing crop productivity of saline soils. Frontiers in Microbiology, 10, 2791.
28. Egamberdieva, D., Wirth, S. J., Shurigin, V. V., Hashem, A., & Abd Allah, E. F. (2017). Endophytic bacteria improve plant growth, symbiotic performance of chickpea (*Cicer arietinum* L.) and induce suppression of root rot caused by *Fusarium solani* under salt stress. *Frontiers in Microbiology*, *8*, 1887.
29. El Zemrany, H., Barka, E. A., & Compant, S. (2023). Harnessing the plant microbiome for sustainable agriculture: Current challenges and future perspectives. *Frontiers in Plant Science*, *14*, 1175556.
30. Erisman, J. W., Galloway, J. N., Seitzinger, S., Bleeker, A., & Butterbach-Bahl, K. (2008). Consequences of human modification of the global nitrogen cycle. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *368*(1621), 20130116.
31. Etesami, H., & Alikhani, H. A. (2024). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): Prospective and mechanisms: A review. *Microbiology Journal*, *12*(1), 1–15.
32. Etesami, H., & Beattie, G. A. (2018). Mining halophytes for plant growth-promoting halotolerant bacteria to enhance the salinity tolerance of non-halophytic crops. Frontiers in Microbiology, 9, 148
33. Etesami, H., & Maheshwari, D. K. (2023). Plant growth-promoting rhizobacteria: Prospects for sustainable agriculture. In D. K. Maheshwari (Ed.), *Plant Growth Promoting Rhizobacteria for Sustainable Stress Management* (pp. 1–36).

34. Etesami, H., Emami, S., & Alikhani, H. A. (2017). Potassium solubilizing bacteria (KSB): Mechanisms, promotion of plant growth, and future prospects – A review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 17*(4), 897–911.
35. García-López, A. M., Delgado, A., Torrent, J., & Andrades, M. S. (2010). Phosphorus availability in calcareous Spanish soils as evaluated by conventional soil tests and 31P-NMR spectroscopy. *Soil Use and Management, 26*(3), 231–239.
36. Glick, B. R. (2020). Beneficial plant–bacterial interactions (2nd ed.). Springer International Publishing
37. Gonzalez, M. E., Ceballos, I., & Toro, M. (2018). Solubilization of phosphorus and potassium from rock minerals by *Rhizobium leguminosarum* and *Paenibacillus polymyxa* under saline conditions. *Rhizosphere, 5*, 47–52.
38. Goswami, D., Dhandhukia, P., Patel, P., & Thakker, J. N. (2020). Salt-tolerant plant growth-promoting rhizobacteria: A review on their plant growth-promoting activities and mechanisms of salt tolerance. Archives of Microbiology, 202(7), 1015–1027.
39. Guo, Y., Huang, C., & Zhu, J.-K. (2010). Salt stress signaling and tolerance in plants. *Plant Signaling & Behavior*, *5*(3), 233–238.
40. Gyaneshwar, P., Kumar, G. N., Parekh, L. J., & Poole, P. S. (2002). Role of soil microorganisms in improving P nutrition of plants. *Plant and Soil, 245*(1), 83–93.
41. Han, H. S., Supanjani, & Lee, K. D. (2006). Effect of co-inoculation with phosphate and potassium solubilizing bacteria on mineral uptake and growth of pepper and cucumber. *Plant, Soil and Environment, 52*(3), 130–136. -
42. hang, C., & Kong, F. (2014). Isolation and identification of potassium-solubilizing bacteria from tobacco rhizospheric soil and their effect on tobacco plants. *Applied Soil Ecology*, *82*, 18–25. Gadd, G. M. (2010). Metals, minerals and microbes: geomicrobiology and bioremediation. *Microbiology*, 156(3), 609–643.
43. Hasegawa, P. M., Bressan, R. A., Zhu, J.-K., & Bohnert, H. J. (2000). *Plant cellular and molecular responses to high salinity*. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 51, 463–499.
44. Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., & Beaton, J. D. (2017). *Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management* (8e éd.)
45. Hinsinger, P., Bengough, A. G., Vetterlein, D., & Young, I. M. (2009). Rhizosphere: biophysics, biogeochemistry and ecological relevance. *Plant and Soil, 321*(1–2), 117–152.

46. Hirsch, A. M., & Mauchline, T. H. (2012). The history of the discovery of nitrogen-fixing legume symbioses. *Frontiers in Microbiology, 3*, 359. https://doi.org/10.3389/fmicb.2012.00359
47. Hu, X., Chen, J., & Guo, J. (2006). Two phosphate- and potassium-solubilizing bacteria isolated from Tianmu Mountain, Zhejiang, China. *World Journal of Microbiology and Biotechnology, 22*(9), 983–990
48. Kang, S. M., Shahzad, R., Bilal, S., Khan, A. L., Park, Y. G., Lee, K. E., & Lee, I. J. (2020). Salt-tolerant plant growth-promoting rhizobacteria confer salt tolerance to maize through enhanced antioxidant defense and osmolyte accumulation. Journal of Microbiology and Biotechnology, 30(3), 445–453.
49. Khan, M. S., Zaidi, A., & Wani, P. A. (2007). Role of phosphate-solubilizing microorganisms in sustainable agriculture – A review. *Agronomy for Sustainable Development, 27*(1), 29–43
50. Khan, M. S., Zaidi, A., & Wani, P. A. (2007). Role of phosphate-solubilizing microorganisms in sustainable agriculture: A review. *Agronomy for Sustainable Development, 27*(1), 29–43.
51. Khan, M. S., Zaidi, A., & Wani, P. A. (2007). Role of phosphate-solubilizing microorganisms in sustainable agriculture—A review. *Agronomy for Sustainable Development*, *27*(1), 29–43.
52. Kloepper, J. W., & Schroth, M. N. (1978). Plant growth-promoting rhizobacteria on radishes. In *Proceedings of the 4th International Conference on Plant Pathogenic Bacteria* (pp. 879–882). Angers, France.
53. Kumar, A., Verma, J. P., & Singh, V. (2020). Plant growth-promoting bacteria: Biological tools for the mitigation of salinity stress in plants. Frontiers in Microbiology, 11, 1216.
54. Li, Y., Wang, Y., Zhang, H., & Liu, Y. (2021). Screening of plant growth-promoting rhizobacteria and their growth-promoting effects on maize under drought stress. *Journal of Applied Microbiology*, *136*(3), 741–753.
55. Litchfield, C. D. (2011). Habitat and distribution of halophilic microorganisms. In A. Ventosa, A. Oren, & Y. Ma (Eds.), Halophiles and hypersaline environments: current research and future trends (pp. 15–28). Springer.
56. Liu, D., Lian, B., & Dong, H. (2012). Isolation of Paenibacillus sp. and assessment of its potential for enhancing mineral weathering. *Geomicrobiology Journal*, *29*(5), 413–421. Basak, B. B., & Biswas, D. R. (2009). Influence of potassium solubilizing

microorganism (Bacillus mucilaginosus) and waste mica on potassium uptake dynamics by sudan grass (Sorghum vulgare Pers.) grown under two Alfisols. *Plant and Soil*, *317*(1–2), 235–255.

57. Lizama, C., Montecinos, M., & González, B. (2001). Isolation and characterization of moderately halophilic bacteria from saline evaporating ponds. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 17(5), 405–413.
58. Marschner, P. (Éd.). (2012). *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants* (3e éd.). Academic Press.
59. Meena, V. S., Maurya, B. R., Verma, J. P., & Meena, R. S. (2013). Potassium-solubilizing microorganisms for sustainable agriculture. In B. R. Maurya (Ed.), *Role of Microorganisms in Sustainable Agriculture and Environmental Management* (pp. 157–180).
60. Meena, V. S., Maurya, B. R., Verma, J. P., & Meena, R. S. (2014). Potassium solubilizing microorganisms for sustainable agriculture. In V. S. Meena, B. R. Maurya, & J. P. Verma (Eds.), *Potassium Solubilizing Microorganisms for Sustainable Agriculture* (pp. 1–17). Springer.
61. Meena, V. S., Maurya, B. R., Verma, J. P., Meena, R. S., & Aeron, A. (2016). Potassium solubilizing microbes: Mechanism of potassium solubilization and future prospects. In Meena et al. (Eds.), *Potassium solubilizing microorganisms for sustainable agriculture* (pp. 1–17).
62. Meena, V. S., Maurya, B. R., Verma, J. P., Meena, R. S., Jatav, G. K., & Singh, D. K. (2021). Plant growth-promoting rhizobacteria: A potential bioinoculant for sustainable agriculture. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 21(1), 1–20.
63. Menasria, T., Aguilera, M., Hocine, H., Benammar, L., Ayachi, A., Bachir, A. S., ... & Monteoliva-Sánchez, M. (2018). Diversity and bioprospecting of extremely halophilic archaea isolated from Algerian arid and semi-arid wetland ecosystems for halophilic-active hydrolytic enzymes. Microbiological Research, 207, 289-298.
64. Mittler, R. (2002). Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. *Trends in Plant Science, 7*(9), 405–410.
65. Munns, R., & Tester, M. (2008). *Mechanisms of salinity tolerance*. **Annual Review of Plant Biology**, 59, 651–681.
66. Mus, F., Crook, M. B., Garcia, K., Costas, A. G., Geddes, B. A., Kouri, E. D., ... & Poole, P. (2016). Symbiotic nitrogen fixation and the challenges to its extension to nonlegumes. *Applied and Environmental Microbiology*, *82*(13), 3698–3710.

67. Nadeem, S. M., Ahmad, M., Zahir, Z. A., Javaid, A., & Ashraf, M. (2019). The role of mycorrhizae and plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) in improving crop productivity under stressful environments. *Biotechnology Advances, 27*(2), 133–152.
68. Nautiyal, C. S., Bhadauria, S., Kumar, P., Lal, H., Mondal, R., & Verma, D. (1999). Stress induced phosphate solubilization in bacteria isolated from alkaline soils. *FEMS Microbiology Letters*, *182*(2), 291–296.
69. Nautiyal, C. S., Chauhan, P. S., & Bhatia, C. R. (2023). Role of plant growth-promoting rhizobacteria in sustainable agriculture: A review. *Agricultural Microbiology*, *58*(2), 123–135.
70. Numan, M., Bashir, S., Khan, Y., Mumtaz, R., Shinwari, Z. K., Khan, A. L., & Khan, A. (2021). Plant growth-promoting bacteria as an alternative strategy for salt tolerance in plants: A review. Microbiological Research, 242, 126636.
71. Oldroyd, G. E. D. (2013). Speak, friend, and enter: signalling systems that promote beneficial symbiotic associations in plants. *Nature Reviews Microbiology*, *11*(4), 252–263.
72. Oldroyd, G. E. D., & Dixon, R. (2014). Biotechnological solutions to the nitrogen problem. *Current Opinion in Biotechnology*, *26*, 19–24.
73. Oren, A. (2002). Halophilic microorganisms and their environments. Springer.
74. Patel, P., Dhandhukia, P., & Thakker, J. N. (2020). Plant growth-promoting rhizobacteria: A review on their plant growth-promoting activities and mechanisms of salt tolerance. Archives of Microbiology, 202(7), 1015–1027
75. Ph, D., & Souchier, B. (1991). Pédologie. Sol, végétation, environnement. Handbook of ecotoxicology, Blackwell,. p, 397.
76. Pieterse, C. M. J., Zamioudis, C., Berendsen, R. L., Weller, D. M., Van Wees, S. C. M., & Bakker, P. A. H. M. (2014). Induced systemic resistance by beneficial microbes. *Annual Review of Phytopathology*, *52*, 347–375.
77. Pieterse, C. M. J., Zamioudis, C., Berendsen, R. L., Weller, D. M., Van Wees, S. C. M., & Bakker, P. A. H. M. (2014). Induced systemic resistance by beneficial microbes. *Annual Review of Phytopathology*, *52*, 347–375.
78. Pikovskaya, R. I. (1948). Mobilization of phosphorus in soil in connectionwith vital activity of some microbial species. *Microbiologiya*, *17*, 362–370
79. Pikovskaya, R. I. (1948). Mobilization of phosphorus in soil in connection with vital activity of some microbial species. *Mikrobiologiya*, *17*, 362–370.
80. Postgate, J. (1998). *Nitrogen Fixation* (3rd ed.). Cambridge University Press.

81. Pretty, J., Benton, T. G., Bharucha, Z. P., Dicks, L. V., Flora, C. B., Godfray, H. C. J., ... & Wratten, S. (2018). Global assessment of agricultural system redesign for sustainable intensification. *Nature Sustainability*, *1*(8), 441–446.
82. Qadir, M., Ghafoor, A., & Murtaza, G. (2007). Amelioration strategies for saline soils: A review. *Land Degradation & Development, 18*(2), 133–155.
83. Qadir, M., Quillérou, E., Nangia, V., Murtaza, G., Singh, M., Thomas, R. J., ... & Noble, A. D. (2014, November). Economics of salt-induced land degradation and restoration. In *Natural resources forum* (Vol. 38, No. 4, pp. 282-295).
84. Qurashi, A. W., & Sabri, A. N. (2021). Halotolerant plant growth-promoting rhizobacteria improve soil fertility and plant salinity tolerance for sustainable agriculture: A review. Agriculture, 13(1), 168.
85. Rathore, D., Sharma, S. K., Jat, S. L., & Yadav, A. (2021). Potassium solubilizing microorganisms for sustainable agriculture under saline conditions. *Environment Conservation Journal, 22*(1&2), 313–320.
86. Rengasamy, P. (2006). World salinization with emphasis on Australia. *Journal of experimental botany*, *57*(5), 1017-1023.
87. Rodríguez, H., & Fraga, R. (1999). Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion. *Biotechnology Advances*, *17*(4–5), 319–339.
88. Romano, I., Ventorino, V., Pepe, O., & Fagnano, M. (2020). Kosakonia pseudosacchari inoculation exhibits multiple plant growth promotion activities in maize. *CAB Reviews*, *15*(25), 1–10.
89. Ruppel, S., Franken, P., & Witzel, K. (2022). Mechanistic insights of the interaction of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) and plants under salinity stress. Frontiers in Microbiology, 11, 1952.
90. Sadeghi, A., Karimi, E., Dahaji, P. A., Javid, M. G., Dalvand, Y., & Askari, H. (2020). Halotolerant plant growth–promoting bacteria: prospects for alleviating salinity stress in plants. Environmental Science and Pollution Research, 27(11), 11882–11900.
91. Santos, M. S., Nogueira, M. A., & Hungria, M. (2021). Microbial inoculants: Reviewing the past, discussing the present and previewing an outstanding future for the use of beneficial bacteria in agriculture. *AMB Express*, *11*, 82.
92. Santos, M. S., Nogueira, M. A., & Hungria, M. (2024). Microbial inoculants: Reviewing the past, discussing the present and previewing an outstanding future for the use of beneficial bacteria in agriculture. *AMB Express*, *14*, 82.

93. Sharma, J. G., Bisht, S., Singh, S., & Singh, M. (2022). Augmentative role of Piriformospora indica fungus and plant growth promoting bacteria in mitigating salinity stress in Trigonella foenum-graecum. Journal of Applied Biology and Biotechnology, 10(1), 85–94.
94. Sharma, S. B., Sayyed, R. Z., Trivedi, M. H., & Gobi, T. A. (2013). Phosphate solubilizing microbes: Sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. *SpringerPlus*, *2*, 587.
95. Sheng, X. F., & Huang, W. Y. (2002). Mechanism of potassium release from feldspar affected by the strain NBT of silicate bacterium. *Acta Pedologica Sinica*, *39*, 863–871.
96. Shi, H., Ishitani, M., Kim, C., & Zhu, J.-K. (2002). The Arabidopsis thaliana salt tolerance gene SOS1 encodes a putative Na+/H+ antiporter. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *97*(12), 6896–6901.
97. Shrivastava, P., & Kumar, R. (2015). Soil salinity: A serious environmental issue and plant growth promoting bacteria as one of the tools for its alleviation. *Saudi Journal of Biological Sciences*, *22*(2), 123–131.
98. Shrivastava, P., & Kumar, R. (2015). Soil salinity: A serious environmental issue and plant growth promoting bacteria as one of the tools for its alleviation. *Saudi Journal of Biological Sciences*, *22*(2), 123–131.
99. Singh, H., Singh, S. N., & Juwarkar, A. A. (2011). Growth promotion of *Jatropha curcas* by a plant growth promoting bacterium (*Serratia marcescens*) under saline conditions. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *11*(3), 54–71.
100. Singh, R. P., Jha, P. N., & Gaur, R. (2020). Plant growth-promoting rhizobacteria: An emerging tool for the enhancement of wheat tolerance against salinity stress. Journal of Plant Interactions, 15(1), 1–14.
101. Smith, S. E., & Read, D. J. (2008). *Mycorrhizal Symbiosis* (3e éd.). Academic Press.
102. Spaepen, S., Vanderleyden, J., & Remans, R. (2007). Indole-3-acetic acid in microbial and microorganism-plant signaling. *FEMS Microbiology Reviews*, *31*(4), 425–448.
103. Spaepen, S., Vanderleyden, J., & Remans, R. (2007). Indole-3-acetic acid in microbial and microorganism-plant signaling. *FEMS Microbiology Reviews*, *31*(4), 425–448.

104. Torres, M. A., García, L. F., & Rodríguez, J. P. (2023). Plant growth-promoting rhizobacteria improve drought tolerance of crops: A review. *Plant and Soil*, *489*(1–2), 45–60.

105. Upadhyay, S. K., Singh, J. S., Saxena, A. K., & Singh, D. P. (2021). Impact of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) on plant growth and soil health under salinity stress: A review. Journal of Plant Growth Regulation, 40(3), 1231–1243.

106. Uroz, S., Calvaruso, C., Turpault, M. P., & Frey-Klett, P. (2009). Mineral weathering by bacteria: ecology, actors and mechanisms. *Trends in Microbiology*, 17(8), 378–387.

107. Vaishnav, A., Shukla, A. K., Sharma, A., Kumar, R., & Choudhary, D. K. (2021). Secondary metabolites from halotolerant plant growth-promoting rhizobacteria and their role in salinity stress alleviation. Frontiers in Microbiology, 11, 567768.

108. Van Wees, S. C. M., Van der Ent, S., & Pieterse, C. M. J. (2008). Plant immune responses triggered by beneficial microbes. *Current Opinion in Plant Biology*, *11*(4), 443–448.

109. Ventosa, M., Calvo, P., & Gutiérrez-Mañero, F. J. (2022). Plant growth-promoting rhizobacteria as a tool to improve salinity tolerance in crops: A review. *Agronomy*, *12*(4), 890.

110. Verma, J. P., Yadav, J., Tiwari, K. N., & Kumar, A. (2021). Effects of indigenous potassium solubilizing bacteria on growth and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) under salt stress. *Ecological Engineering*, *160*, 106164.

111. Wilkinson, S., & Davies, W. J. (2002). ABA-based chemical signalling: The co-ordination of responses to stress in plants. *Plant, Cell & Environment*, *25*(2), 195–210.

112. Yaghoubi Khanghahi, M., Kazemeini, S. A., & Alikhani, H. A. (2021). Plant growth-promoting rhizobacteria alleviate salinity stress in wheat: A field study. Journal of Plant Growth Regulation, 40(2), 1040–1050

113. Youssef, N. H., Ashlock, K. S., Elshahed, M. S., & Liggenstoffer, A. S. (2012). Phylogenetic diversities and community structure of archaea in hypersaline soils of different salinities. Applied and Environmental Microbiology, 78(12), 4120–4131.

114. Zaidi, A., Khan, M. S., & Amil, M. (2003). Interactive effect of rhizospheric microorganisms on yield and nutrient uptake of chickpea (*Cicer arietinum* L.). *European Journal of Agronomy*, *19*(1), 15–21.

115. Zaidi, A., Khan, M. S., Ahemad, M., Oves, M., & Wani, P. A. (2009). Recent advances in plant growth promotion by phosphate-solubilizing microbes. *Microbial Strategies for Crop Improvement*, 23–50.

116. Zerrouk, I. Z., Rahmoune, B., Khelifi, L., Mounir, K., & Baluška, F. (2019). Algerian Sahara PGPR confers maize root tolerance to salt and aluminum toxicity via ACC deaminase and IAA. Acta Physiologiae Plantarum, 41, 91

117. Zhu, J.-K. (2001). Plant salt tolerance. *Trends in Plant Science*, *6*(2), 66–71

118. 100.Zhu, Q., Wang, L., Wang, N., & Wang, X. (2020). Biochar improves soil phosphorus availability and plant growth in a saline-alkaline soil. Soil Use and Management, 36(3), 419–427. Khan, M. S., Zaidi, A., & Wani, P. A. (2007). Role of phosphate-solubilizing microorganisms in sustainable agriculture – A review. Agronomy for Sustainable Development, 27(1), 29–43.

Annexes

ANOVA à un facteur contrôlé : ISK en fonction de Isolats

Analyse de la variance

Source	**DL**	**SomCar ajust**	**CM ajust**	**Valeur F**	**Valeur de p**
Isolats	2	87,35	43,673	6,53	0,018*****
Erreur	9	60,18	6,687		
Total	11	147,53			

Comparaisons deux à deux de Tukey

Informations de groupement avec la méthode de Tukey et un niveau de confiance de 95 %

Isolats	**N**	**Moyenne**	**Groupement**	
E341	4	9,43	A	
E232	4	5,45	A	B
E331	4	2,875		B

ANOVA à un facteur contrôlé : ISP en fonction de Isolats

Analyse de la variance

Source	**DL**	**SomCar ajust**	**CM ajust**	**Valeur F**	**Valeur de p**
Isolats	2	1,549	0,7743	6,08	0,021*****
Erreur	9	1,146	0,1274		
Total	11	2,695			

Comparaisons deux à deux de Tukey

Informations de groupement avec la méthode de Tukey et un niveau de confiance de 95 %

Isolats	**N**	**Moyenne**	**Groupement**
E143	4	2,2	A
E142	4	1,4826	B
E332	4	1,4	B

ANOVA à un facteur contrôlé : ISCa en fonction de Isolats

Analyse de la variance

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Isolats	4	3,233	0,8083	1,87	0,169 **NS**
Erreur	15	6,498	0,4332		
Total	19	9,732			

Comparaisons deux à deux de Tukey

Informations de groupement avec la méthode de Tukey et un niveau de confiance de 95 %

Isolats2	N	Moyenne	Groupement
E133	4	2,442	A
E131	4	1,84	A
E331	4	1,471	A
E232	4	1,433	A
E141	4	1,36	A