

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université de Ghardaia



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

Département de Biologie

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : Sciences biologiques

Spécialité : Microbiologie appliquée

Par : DJEBRIT Salima
SLAMAT Keltoum
SALMI Fatiha

Thème :

Isolement et caractérisation des bactéries à potentiel favorisant la croissance des plantes, associée à quelques plantes spontanées sahariennes

Soutenu publiquement, le 13/06/2023, devant le jury composé de :

Mme. MAIDI Leila	Maître Assistant A	Univ. Ghardaia	Président
M. BAKELLI Aissa	Maître de conférences B	Univ. Ghardaia	Directeur de mémoire
Melle. DJEMOUAI Nadjette	Maître de conférences B	Univ. Ghardaia	Examineur

Année universitaire : 2022 - 2023

Remerciements

Tout d'abord, nous voudrions remercier Dieu Tout-Puissant et Miséricordieux, qui nous a donné la force, la patience et l'opportunité de faire cette humble œuvre.

Nous remercions profondément reconnaissant à M. BAKELLI Aissa, Maître à de conférence classe B au département de biologie à l'Université de Ghardaïa, qui nous a accompagné et encadrer dans notre travail avec beaucoup de compétence et patience

Nous tenons à exprimer nos gratitude pour sa disponibilité et pour les précieux conseils et encouragements qu'il nous a donnés tout au long de ce travail.

Nous remercions Mme. MAIDI Leila, Maître-Assistante A au département de biologie à l'Université de Ghardaïa, d'avoir approuvé la présidence du Comité d'arbitrage d'évaluation.

Nous remercions sincèrement Melle. DJEMOUAI Nadjette , Maître de conférences classe B à au département de biologie à l'Université de Ghardaïa, qui nous a donné le privilège de vouloir juger de ce travail.

Je remercie Melle. Leghouiter Ihaja . Pour l'aide qui a porté. Qu'il me soit permis de vous exprimer ma sincère reconnaissance.

En fin, nous remercions tous les enseignants, nous leur adressons nos sincères pour leur patience et pour tout ce qu'ils nous ont apporté qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A mes très cher parent source de vie et d'amour

*A mes cher frères, sœur et leur enfants source de joie et
bonheur*

*A ma petite famille surtout ma cher Marie source de
soutien et encouragement*

A toute ma famille source d'espoir et

A tous mes amis et qui me connaissent

A tous mes collègues de Eph metlili

A mon binôme : Salima et Fatiha

A Vous cher lecteurs

Keltom

Dédicace

Tout d'abord, je tiens à remercier DIEU

*De m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce
modeste travail*

Je tiens à dédier cet humble travail :

A ma tendre mère Talia et mon très cher père Mohammed

A mes sœurs : Messaouda, Soumia et Selma

A mon frère : Salem

A mon binôme : Keltom et Salima

*Je ne dois pas oublier mes professeurs qui ont en le plus
grand rôle en me soutenant et en me donnant de précieuses
informations ...je te donne mon message*

*Nous demandons à Dieu Tout -puissant de prolonger
votre vie et de vous accorder le bien*

Fatiha

Dédicace

Avant tout, louange à « Allah » tout puissant qu'il m'a guidé tout au long de ma vie, qu'il m'a donné courage et patience pour passer tous les moments difficiles, qu'il m'a permis d'achever ce travail et de pouvoir le mettre entre vos mains aujourd'hui.

Je dédis mes étude surtout a :

A mes très chères parents, qui m'ont entouré de tout pour leur amour, leur tendresse, et pour leur soutien moral et matériel durant toutes les étapes de ma vie.

« Je vous remercie, mes parents »

A ma grand-père et mes grands-mères ont Dieu ait son âmes.

A ma grande père aussi, Djebrit cheikh que dieu Le garde.

A mes frères et A ma chère sœur pour qui je souhaite un avenir plein de joie, de réussite et de bonheur.

*A mes chéris binômes, A mes amis, A tous mes enseignants
A toute ma famille Djebrit.*

Salima

Liste des tableaux

LISTE DES TABLEAUX

Tableaux	Titres	Pages
01	Observation macroscopique des isolats rhizobactériennes isolées	42
02	Observation microscopique des isolats rhizobactériennes isolées	44
03	Tests de la production de coagulase et l'hémolyse des souches isolées	44
04	Traits PGP et activités des enzymes lytiques des souches	49

Liste des figures

LISTE DES FIGURES

Figure	Titre	Page
01	Classification des organismes du sol selon leur taille	4
02	Représentation schématique de la rhizosphère	6
03	Schéma conceptuel montrant l'enrichissement (rouge) et l'appauvrissement (bleu) des taxons et fonctions de la communauté bactérienne dans la rhizosphère par rapport au sol brut	9
04	Classes des protéobactéries	11
05	Modes d'action des PGPR	12
06	Fixation biologique de nitrogène	14
07	Diverses substances organiques/inorganiques produites par les bactéries solubilisatrices des phosphates responsables de la solubilisation des phosphates dans les sols	15
08	Interactions entre plantes et bactéries coopératives dans la rhizosphère	17
09	<i>C. arabica</i> L en pied isolé à Oued Metlili, Wilaya de Ghardaïa	22
10	<i>Moricandia suffruticosa</i> en pied isolé à, Wilaya de Ghardaïa	23
11	<i>Fagonia glutinosa</i> Del. en pied isolé à, Wilaya de Ghardaïa	24
12	<i>Anvillea radiata</i> .L en pied isolé à, Mansoura Wilaya de Ghardaïa	26
13	<i>Helianthemum lippii</i> (L.) en pied isolé à Mansoura, Wilaya de Ghardaïa	27
14	Carte de l'Algérie montrant la zone d'étude (wilaya de Ghardaïa)	30
15	Préparation des échantillons rhizosphériques des plants étudiées	31
16	Préparation des solution mère et série de dilution	32
17	Préparations des souches rhizosphériques dans l'eau peptonée pour la production d'ammoniac	36
18	Préparation des boîtes pétries et stérilisation de papier absorbant	37
19	Bactérisassions des graines	38
20	Photos des boîtes d'isolement et des échantillons de rhizosphérique	41
21	Coloration de Gram	43

Liste des figures

22	Réaction de la catalase positive	43
23	Réaction de test coagulase positive	45
24	Fixation de l'azote sur un milieu semi-solide NFb	46
25	Solubilisation de phosphates par les souches rhizosphériques cultivées	46
26	Solubilisation du potassium par les souches rhizosphériques cultivées	47
27	Résultat positif de Production de NH ₃ par les rhizobactéries dans de l'eau peptonée	48
28	Vérification des activités protéasique 2 souches rhizosphériques isolées sur milieux de cultures	49
5029	Aspects morphologiques des plantules d'orge après dix jours le semis	50
3500	Aspects morphologiques des plantules de la tomate après dix jours le semis	50

Liste des Abréviations

LISTE DES ABREVIATIONS

PGP : Plant Growth promotion

PGPR: Plant Growth Promoting Rhizobactéries

EDS: Eau déstillé stérile

CMC: Carboxy Méthhyl Cellulose

UFC: Unités Formant Colonies

PVK: Pikovskaya

N : Azote

NH₃ : Ammoniac

P : Le Phosphore

K : Le Potassium

ACC : 1-Amino-Cyclopropane-1-Carboxylate

IAA: l'Acide Indole-3-Acétique

FBN : Fixation biologique de l'azote

DAPG: Diacetylphloroglucinol

ISR : Résistance systémique induite

RSI: Résistance systémique induite

HCN : Cyanure d'hydrogène

TSA : Trypto-caséine soja

TSb : Tryptic Soy Broth

PH: Potentiel d'hydrogène

Table des matières

Liste des abréviations

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction 01

Chapitre I : Synthèse bibliographique

I. Ecologie microbienne et bactéries favorisant la croissance des plantes 03

1. Ecologie microbienne 03

1.1. Ecologie microbienne du sol 03

1.2. Ecologie microbienne de la rhizosphère 04

2. Rhizobactéries et la promotion de la croissance des plantes 06

2.1. Interactions entre les microorganismes de la rhizosphère 07

2.2. Interactions entre plante – microorganismes 08

2.3. Diversité taxonomique des bactéries favorisant la croissance des plantes 08

2.3.1. Actinobactérie 09

2.3.2. Bacteroidetes 10

2.3.3. Firmicutes 10

2.3.4. Protéobactéries 11

3. Les bactéries promotrices de la croissance des plantes 12

3.1. Mécanismes d'action des PGPR 12

3. 2. Effet directe des PGPR sur la plante 13

3.2.1 Fixation d'azote 13

3.2.2. Solubilisation du phosphate 14

3.2.3. Solubilisation du potassium 15

3.2.4. Production des phytohormones 16

3.3. Effet indirecte des PGPR sur la plante 16

3.3.1. Biocontrôle des maladies des plantes 16

3.3.2. Antibiotiques 17

3.3.3. Enzymes lytiques 18

3.3.4. Production de sidérophores 18

3.3.5. Résistance Systémique Induite 18

Sommaire

3.3.6. Production d'HCN	19
3.3.7. Compétition	19
II. les PGPR comme l'une des meilleures solutions pour améliorer et développer l'agriculture	19
III. Généralités sur les plantes étudiées	21
1. <i>Cleome arabica</i> L.	21
1.1 Généralités.....	21
1.2. Systématique de <i>Cleome arabica</i> L.	21
1.3. Description de <i>Cleome arabica</i> L	21
1.4. Répartition géographique de <i>Cleome arabica</i> L.	22
1.5. Utilisations de <i>Cleome arabica</i> L.	22
2. <i>Moricandia suffruticosa</i>	23
2.1. Description de <i>Moricandia suffruticosa</i>	23
2.2. Systématique de <i>Moricandia suffruticosa</i>	23
2.3. Répartition géographique de <i>Moricandia suffruticosa</i>	23
2.4. Utilisations de <i>Moricandia suffruticosa</i>	24
3. <i>Fagonia glutinosa</i> Del.....	24
3.1. Description de <i>Fagonia glutinosa</i> L.....	24
3.2. Systématique géographique de <i>Fagonia glutinosa</i> L.....	25
3.3. Répartition de <i>Fagonia glutinosa</i> L	25
3.4. Utilisations de <i>Fagonia glutinosa</i> L.....	25
4. <i>Anvillea radiata</i> L	26
4.1. Description de <i>Anvillea radiata</i> L.....	26
4.2. Systématique géographique de <i>Anvillea radiata</i> L	26
4.3. Répartition de <i>Anvillea radiata</i> L.....	27
4.4. Utilisations de <i>Anvillea radiata</i> L	27
5. <i>Helianthemum lippii</i> L	27
5.1. Description de <i>Helianthemum lippii</i> L.....	27
5.2. Systématique géographique de <i>Helianthemum lippii</i> L	28
5.3. Répartition de <i>Helianthemum lippii</i> L.....	28
5.4. Utilisations de <i>Helianthemum lippii</i> L	28
Chapitre II : Matériel et méthodes	
1. Description du site d'échantillonnage.....	30
2. Matériel végétal.....	31

Sommaire

2.1. Présentation des plantes spontanées étudiées.....	31
2.2. Présentation des plantes cultivées	31
3. Echantillonnage.....	31
4. Isolement, purification et conservation des bactéries.....	32
4.1. Préparation des échantillons rhizosphériques	32
4.2. Milieu utilisé pour l'isolement.....	32
4.3. Isolement des bactéries.....	32
4.4. Conservation des isolats	32
5. Identification et des bactéries isolées	33
5.1. Caractérisation macroscopique morphologique et biochimique	33
5.1.1. Caractérisation macroscopique	33
5.1.2 Caractérisation microscopique	33
5.1.3 Identification biochimique	34
5.1.4. Confirmation de la nature non pathogène	34
5.1.4.1. Test d'hémolyse	34
5.1.4.2. Test coagulase.....	34
6. Caractérisation in vitro des traits PGP	35
6.1. Fixation de l'azote atmosphérique	35
6.2. Solubilisation du phosphate inorganique	35
6.3. Solubilisation du potassium	35
6.4. Production d'ammoniac	35
6.5. Activité enzymatique.....	36
6.6. Activité enzymatique.....	36
6.5.1. Activité cellulolytique	36
6.5.2. Activité protéasique.....	36
7. Screening in vitro des isolats pour la promotion de la croissance des plantes.....	36
7.1. Sélection des souches bactériennes performantes	37
7.2. Préparation des boîtes de Pétri et des solutions d'arrosage.....	37
7.3. Préparation des semences.....	37
7.4. Préparation des suspensions bactériennes	37
7.5. Bactérisations des semences.....	37

Sommaire

7.6. Semis des graines et suivi des paramètres morpho-physiologiques.....	38
8. Analyse statistique.....	38
Chapitre III : Résultats et discussion	
I. Isolement et caractérisation préliminaire des bactéries	40
I.1. Isolement des bactéries rhizosphériques	40
I.2. Caractérisation morphologique et biochimique des isolats bactériens	42
2.1. Examen microscopique	42
2.2. Test de catalase	43
2.3. Test d'oxydase	43
IV. Confirmation de la non-pathogénicité	44
V. Screening des traits PGP et activités enzymatiques	44
V.1 Traits PGP des bactéries.....	45
V.1.1. Fixation de l'azote atmosphérique	45
1.2. Solubilisation des phosphates inorganiques	46
1.4. Solubilisation du potassium	47
1.2. Production d'ammoniac	47
2. Activité enzymatique.....	48
2.1. Activité cellulolytique	48
2.3.. Activité protéasique.....	48
V. Screening in vivo des souches	49
Conclusion	51
Références bibliographiques	52
Annexes	60
الملخص.....	
Résumé	
Abstract	

Introduction

Introduction

La croissance et la productivité des plantes sont souvent influencées par des interactions complexes avec les microorganismes présents dans leur environnement (**Wardle et al., 2004**).

Parmi ces microorganismes, les bactéries occupent une place importante en raison de leur capacité à coloniser les racines des plantes et à établir des associations bénéfiques, connues sous le nom de symbiose ou d'endophytisme (**Pérez, 2013**). Ces bactéries bénéfiques, également appelées bactéries promotrices de croissance des plantes, sont capables d'améliorer la croissance et la santé des plantes par divers mécanismes, tels que la fixation d'azote, la solubilisation des nutriments, la production d'hormones de croissance végétale et la protection contre les pathogènes (**Sevilla, 2001**).

Les régions sahariennes sont connues pour leurs conditions environnementales extrêmes, notamment la chaleur, la sécheresse et les sols pauvres en éléments nutritifs. Malgré (**Bendjida, 2019**). Ces défis, certaines plantes spontanées sahariennes ont réussi à s'adapter à ces conditions difficiles et à prospérer. On pense que ces plantes ont développé des associations symbiotiques spécifiques avec des bactéries qui les aident à survivre et à croître dans de telles conditions. L'étude des bactéries associées à ces plantes sahariennes spontanées pourrait donc fournir des informations précieuses sur les mécanismes qui favorisent la croissance des plantes dans des environnements arides et hostiles (**Compant, 2005**).

Dans cette étude, notre objectif est d'isoler et de caractériser les bactéries présentes dans les racines de quelques plantes spontanées sahariennes, ayant des effets PGPR et d'étudier leur capacité à améliorer la germination des grains de l'orge et de la tomate. Nous utiliserons des techniques de microbiologie classiques, telles que l'isolement sélectif des bactéries, la culture en milieu spécifique. De plus, nous mènerons des tests de caractérisation fonctionnelle pour évaluer les capacités des bactéries isolées, tels que la fixation de l'azote, la production d'auxines et la solubilisation des phosphates.

En réalisant cette étude, nous espérons non seulement contribuer à l'isolement des souches bactériennes prometteuses qui pourraient être utilisées comme agents de biofertilisation pour améliorer la productivité agricole mais aussi à la compréhension des interactions entre les bactéries et les plantes dans les écosystèmes sahariens et les zones arides et désertiques.

Chapitre I

Partie Bibliographique

I. Ecologie microbienne et bactéries favorisant la croissance des plantes

1. Ecologie microbienne

L'écologie microbienne est l'étude de la diversité des microorganismes dans la biosphère terrestre et de la manière dont ils interagissent avec leur environnement pour générer et maintenir cette diversité (Xu, 2006).

La diversité microbienne dans l'environnement peut être mesurée par divers indices tels que la diversité phylogénétique, la diversité des espèces, la diversité des génotypes et la diversité génétique. Les microbes, définis ici comme les bactéries, les archées, les virus, les champignons et les protistes, qui sont les organismes les plus nombreux et les plus diversifiés sur terre. On estime qu'il existe actuellement plus de 10^{30} cellules microbiennes vivantes sur Terre, et plus 10^{29} cellules dans le sol seul, avec une biomasse mondiale d'environ 400 milliards de tonnes de carbone (Ladau et Eloe-Fadrosh, 2019).

La recherche sur l'écologie microbienne peut nous aider à améliorer nos vies en exploitant les microbes pour la restauration de l'environnement, la production alimentaire, la bio-ingénierie de produits utiles tels que les antibiotiques, les compléments alimentaires et les produits chimiques (Xu, 2006). Les plantes ont une relation étroite avec les microbes, la diversité et l'abondance des microbes et les associations qu'ils forment avec leurs hôtes dépendent largement du type de plante, de sa composition génétique, de son âge, de la saison de l'année et des conditions biotiques et abiotiques environnantes (Mathur et Ulanova, 2022).

1.1. Ecologie microbienne du sol

Le sol est la partie superficielle de la croûte terrestre, plus ou moins molle et cassante. Il est causé par divers facteurs (climat, propriétés de la roche mère et activité biologique, etc.), et le sol est un milieu vivant composé de nombreux microorganismes, qui de la nature hétérotrophe (Bendjida et Aouadi, 2019). Le sol provient de l'altération et de la transformation des roches par les changements climatiques, l'atmosphère et les échanges d'énergie qui s'y déroulent. Il est considéré comme un système dynamique complexe, en constante évolution au cours du processus de biotransformation et de transfert d'éléments ou de composés par des microorganismes (bactéries, champignons, etc.) (Figure 1) (Nabti *et al.*, 2018). L'écologie microbienne du sol est l'étude des microorganismes dans l'environnement du sol (Yarwood, 2021).

Les microorganismes affectent la teneur en éléments nutritifs, les propriétés physiques et chimiques du sol, affectant ainsi la productivité primaire. En outre, de nombreuses activités anthropiques, telles que le développement urbain, l'agriculture, la pollution et l'utilisation de pesticides, peuvent affecter la diversité microbienne du sol. Par conséquent, la diversité microbienne du sol est la base de la gestion durable de l'environnement et de l'évaluation de la qualité du sol. Comprendre la

diversité complexe des communautés microbiennes dans les environnements du sol s'est avéré être une tâche difficile. Cela n'est pas seulement dû à des limitations méthodologiques mais aussi à un manque de connaissances taxonomiques. Ces dernières années, des recherches approfondies on en nous concentrant sur la diversité microbienne du sol, nous espérons acquérir une meilleure compréhension de la boîte noire du sol (**Pierre-Alain et al., 2011 ; Bing-Ru et al., 2005**).

Les microorganismes du sol sont des acteurs clés dans des processus écologiques importants tels que les cycles biogéochimiques du carbone, de l'azote, du phosphore et du soufre, affectant directement toute vie sur Terre. Notez que 1 gramme de sol/sédiment peut contenir 10^9 cellules bactériennes (**Whitman et al. 1998**).

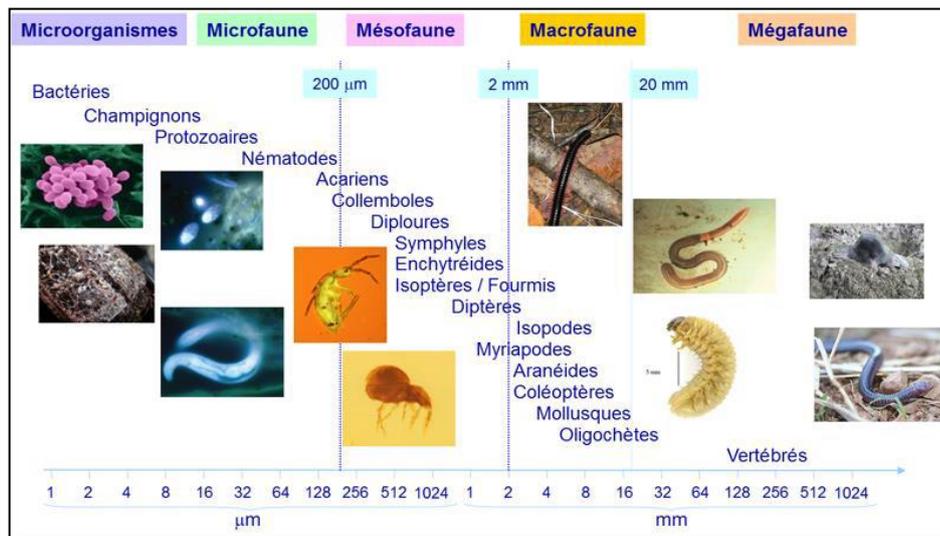


Figure 1 : Classification des organismes du sol selon leurs tailles (**Swift et al., 1979**).

1.2. Ecologie microbienne de rhizosphère

La rhizosphère est l'un des écosystèmes les plus complexes. C'est une niche écologique entre différents microorganismes et divers systèmes racinaires voisins. Il y a deux éléments essentiels pour la croissance des plantes : la présence de lumière et la disponibilité de l'eau et des nutriments dans le sol. Son volume varie selon le développement du système racinaire : il comprend 0,1 à 1 % du sol total dans les écosystèmes forestiers et près de 100 % du premier centimètre de sol dans les prairies (**Figure 2**) (**Bazot, 2005**).

Aujourd'hui, la rhizosphère est définie comme le lieu où le sol, les plantes et les microbes interagissent. Ces interactions dépendent des conditions physiques du milieu et des organismes impliqués (**Norini, 2007**). La composition physicochimique et biologique de la rhizosphère diffère significativement des sols cultivés et non cultivés (**Morgan, 2005**).

La zone de la rhizosphère peut être divisée en trois parties : le rhizoplan, c'est la surface des racines des plantes, constitue un milieu exceptionnel riche en nutriments pour les microorganismes;

l'endorhizosphère, c'est une zone intraracinaire colonisée aussi par les bactéries ; et l'ectorhizosphère qui est la zone externe située après le rhizoplan (**Bassair et Lakhdar, 2022**).

Certains phénomènes écologiques se produisent au niveau de la rhizosphère. En effet, les racines libèrent une grande quantité de matière organique sous forme de mucilage, Il est estimé et plus que de 40 % des produits de la photosynthèse (**Soufiane, 1999**). Les plantes libèrent des exsudats racinaires composés de substances organiques carbonées et azotées (polysaccharides, acides organiques et protéines) (**Mench., 1985**).

Les racines modifient les propriétés physicochimiques et microbiennes du sol de la rhizosphère. Cet effet résulte de l'absorption d'eau et d'éléments minéraux par les racines, mais surtout de la libération de composés organiques. Le volume de sol affecté par la rhizosphère est déterminé par la zone de diffusion des molécules organiques solubles et des composés volatils libérés par les racines (**York et al., 2016**). Les exsudats racinaires sont un facteur clé dans les échanges entre les plantes et les bactéries de la rhizosphère, et la densité et la diversité microbienne autour du système est directement liée à la quantité d'exsudat et à la nature des racines, et cette influence se manifeste par des changements dans la croissance de la plante (**Lemanceau, 1992**).

Certaines interactions entre plantes et microbes sont bénéfiques, comme la symbiose entre légumineuse et rhizobium, qui permet aux plantes de fixer l'azote dont elles ont besoin. De plus, les rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (Plant Growth Promoting Rhizobacteria, ou PGPR) sont de bons candidats pour l'inoculation car elles colonisent les racines et créent un environnement propice à leur développement et à leur fonctionnement (**Souza et al., 2015**). Au niveau de la communauté microbienne, il existe également une compétition intense entre les bactéries (**Rangin et al., 2008**). Bien qu'il y ait dans la rhizosphère une quantité des microorganismes au moins 1000 fois plus importante que dans le sol ambiant non influencé par les racines, les espèces présentes sont 10 à 100 fois moins diversifiées (**Alabouvette et Cordier, 2018**).

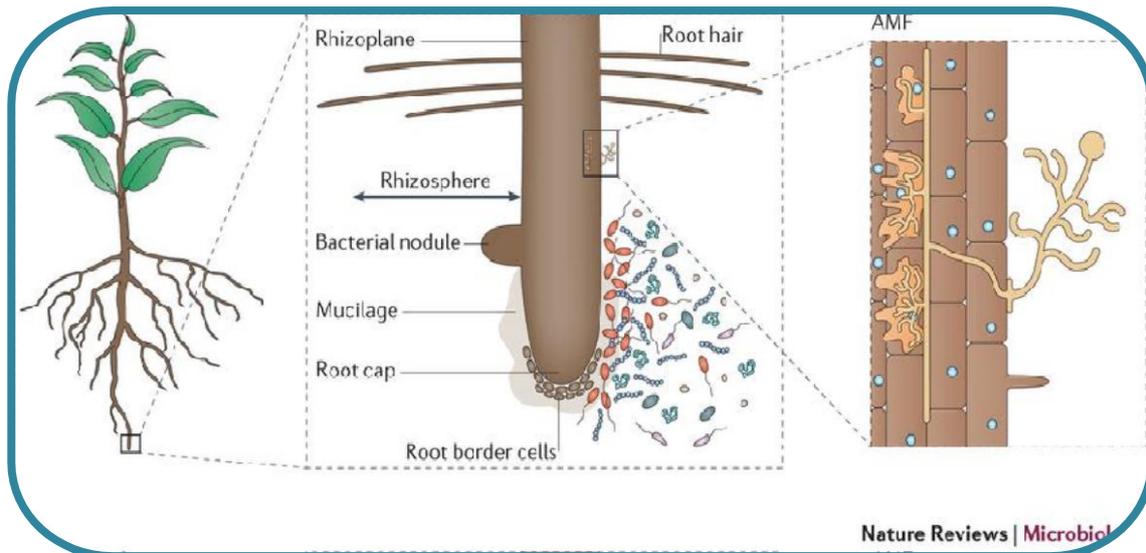


Figure 2: Représentation schématique de la rhizosphère (Benhacene, 2016).

2. Rhizobactéries et la promotion de la croissance des plantes

Les rhizobactéries sont des bactéries capables de se multiplier et de rivaliser avec d'autres microbes pour accabler cette zone riche en nutriments. L'association, l'action et l'impact des rhizobactéries sur les plantes dépendent de leur établissement réussi dans l'environnement de la rhizosphère et elles peuvent avoir des effets positifs et négatifs sur la croissance des plantes. Près de 5 % des bactéries de la rhizosphère favorisent la croissance des plantes et protègent contre les agents pathogènes (Suslow, 1982; Weller, 1988). L'inoculation des semences avec ces rhizobactéries bénéfiques se traduit généralement par des accroissements de rendement d'environ 10 à 30% (Suslow, 1982). Ces rhizobactéries appartiennent à différents taxons bactériens. Ils sont classés comme rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR) (Karima, 2018).

Le terme PGPR vient de l'anglais « Plant Growth Promoting Rhizobacteria », qui désigne généralement des bactéries ayant des effets bénéfiques sur la croissance et le développement des plantes (Nada, 2021). Les rhizobactéries connues sous le nom de PGPR stimulent directement la croissance des plantes en augmentant l'absorption des nutriments du sol, en induisant et en produisant des régulateurs de croissance des plantes et en activant les mécanismes de résistance induits chez les plantes. Ils stimulent indirectement la croissance des plantes par l'antagonisme des communautés microbiennes nuisibles, par la transformation des métabolites toxiques et la stimulation de la nodulation des légumineuses par les Rhizobactéries. La mise en place d'associations PGPR-plante est cruciale pour l'expression des effets bénéfiques. Les rhizobactéries sont des bactéries qui ont une forte capacité à coloniser les racines (Hallmann et al., 1997).

Les rhizobactéries sont des PGPR qui peuvent favoriser la croissance des plantes par de multiples mécanismes par exemple, solubilisation du phosphate, production de sidérophores, la fixation

biologique de l'azote, la production de la rhizosphère désaminase 1-aminocyclopropane-1-carboxylate (ACC), la production des phytohormones, activité antifongique, génération de composés organiques volatils (COV) (Weller *et al.*, 2002).

2.1. Interaction entre les microorganismes de la rhizosphère

Au niveau de la rhizosphère, qui est une zone riche en matière organique, les populations microbiennes sont très riches. Les interactions microbiennes sont nombreuses et très fortes, et sont catalysées par les exsudats racinaires qui favorisent certains groupes de microorganismes au dépend d'autres au sein de la communauté microbienne. Les interactions sont les suivantes (Meyer *et al.*, 2019) :

➤ Commensalisme

Le commensalisme, schématiquement, est une association biologique entre deux espèces dans laquelle une espèce (le commensal) gagne des avantages tandis que l'autre (l'hôte) n'a ni avantages ni inconvénients. Au niveau de la rhizosphère, la symbiose se manifeste notamment par des microbes modifiant les conditions environnementales (humidité, pH, pression osmotique, etc.) pour créer un climat favorable au développement d'un autre microbe. De plus, certains organismes dégradent ou neutralisent des substances toxiques, favorisant ainsi la croissance d'autres organismes (Belkadi et Koliai, 2016).

➤ Mutualisme

La symbiose est l'association constante, obligatoire et spécifique entre deux organismes, dont chacun bénéficie de l'association (Mohamedatni et Chikhaoui, 2018).

Les mutualistes sont courants, en particulier dans les environnements pauvres en nutriments, où les liens entre l'hôte et le symbiote permettent aux partenaires symbiotiques de persister et de surpasser collectivement les espèces non symbiotiques. Typiquement, ces relations symbiotiques sont basées sur le transfert mutuel d'énergie et de nutriments (tels que le carbone et l'azote) entre l'hôte et le symbiote (Bedgood *et al.*, 2020). L'exemple le plus courant au niveau de la rhizosphère est la fixation biologique de l'azote (BNF) (Bezghiche *et al.*, 2021).

➤ Antagonisme

En écologie, le terme antagonisme fait référence à l'inhibition ou à l'effet néfaste d'un organisme par rapport à un autre dans une population microbienne mixte. L'antagonisme se manifeste généralement soit par une compétition, un hyperparasitisme, une production de sidérophores ou par une antibiose (Benhacene, 2016).

▶ Compétition

Compétition entre deux ou plusieurs microorganismes pour les nutriments, l'espace ou d'autres facteurs environnementaux qui limitent la croissance. L'effet sélectif des exsudats racinaires sur les

communautés microbiennes résulte de la compétition entre les souches à croissance lente et les souches à croissance rapide, ces dernières étant particulièrement favorisées dans la rhizosphère (Hinsinger *et al.*, 2005).

► Hyperparasitisme

L'hyperparasitisme est l'attaque directe d'un microorganisme, il implique la croissance de l'agent de biocontrôle au détriment du pathogène qui constitue alors la source de nutriments. La rhizosphère qui héberge une large variété de populations microbiennes, constitue un milieu favorable pour l'apparition du parasitisme (Gagne *et al.*, 1985).

2.2. Interactions entre plante-microorganismes

La plupart des études de microbiologie de la rhizosphère, en particulier celles décrivant les coopératives interactions plantes-microbiens, se concentrent uniquement sur les bactéries et les champignons. Ainsi, Clémentine en 2013 rapporte que ces deux microorganismes ont des habitudes nutritionnelles différentes, ainsi que des relations saprophytes ou symbiotiques diverses, qu'elles soient nocives (pathogènes) ou bénéfiques (mutuelles), les bactéries et champignons saprophytes bénéfiques favorisant la croissance et la santé des plantes. Les symbiotes mutualistes bénéfiques pour les plantes comprennent les bactéries fixatrices d'azote (N₂) et les champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA) (Barea *et al.*, 2005).

2.3. Diversités taxonomiques des bactéries favorisant la croissance des plantes

Ces dernières années, le nombre de PGPR identifiés a considérablement augmenté, principalement parce que le rôle de la rhizosphère en tant qu'écosystème est devenu de plus en plus important dans le fonctionnement de la biosphère, et les mécanismes d'action des PGPR ont été bien étudiés. Ces microorganismes cultivables, présentant une diversité de genres et d'espèces, appartiennent principalement à quatre phyla (Hugenholtz, 2002).

Les principaux groupes de PGPR se trouvent dans les phylums : *Actinobacteria*, *Bacteroidetes*, *Firmicutes* et *Proteobacteria* (Figueiredo *et al.*, 2011) (Figure 3).

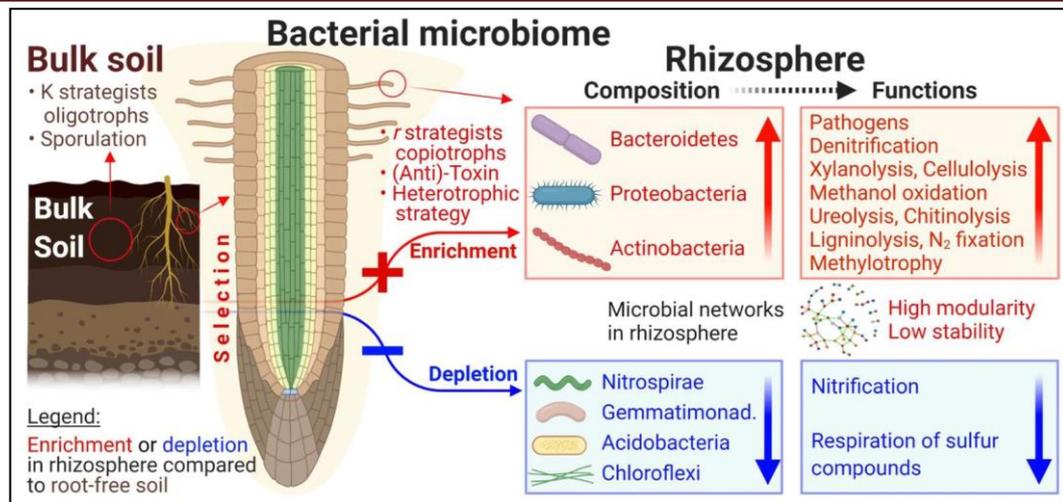


Figure 3: Schéma conceptuel montrant l'enrichissement (rouge) et l'appauvrissement (bleu) des taxons et fonctions de la communauté bactérienne dans la rhizosphère par rapport au sol brut (Ling *et al.*, 2022).

2.3.1. Actinobactéries

Les actinobactéries sont généralement des bactéries à Gram positif, dont l'ADN est riche en guanine et en cytosine (Barka *et al.*, 2016; Ventura *et al.*, 2007). Les actinobactéries comprennent certains des types de sol les plus courants et jouent un rôle important dans la décomposition de la matière organique, comme la cellulose et la chitine, dans le renouvellement de la matière organique et le cycle du carbone, reconstituant l'approvisionnement en nutriments dans le sol et la formation de l'humus (Hamedi et Mohammadi, 2015).

Les actinobactéries peuvent favoriser la croissance des plantes grâce à leur capacité à coloniser la rhizosphère grâce à leur antagonisme et à leur compétition avec les autres microorganismes du sol pour une meilleure nutrition des plantes et représentent une part importante de la biomasse microbienne dans le sol de la rhizosphère. Plusieurs études ont montré que la colonisation par les actinobactéries peut également entraîner une augmentation de la vigueur des plantes et conférer une tolérance aux stress biotiques et abiotiques, améliorer la tolérance à la sécheresse et améliorer l'utilisation des nutriments (Ajar *et al.*, 2017).

Les actinomycètes jouent également un rôle important dans le contrôle biologique des maladies. Ils utilisent différents mécanismes pour contrôler les agents pathogènes des plantes, à savoir, l'antibiose, la compétition, le parasitisme, la production d'HCN, l'induction des mécanismes de la résistance de la plante, etc (Zamoum *et al.*, 2015).

Dans le phylum des Actinobacteria, le genre *Frankia* est un microorganisme symbiotique fixateur d'azote. Cette capacité est l'un de ces traits. Ces bactéries sont apparentées aux actinomycètes qui initient la colonisation des sols pauvres ou dégradés. D'autres Actinobacteria sont également des promoteurs de croissance des plantes mais ne participent pas à la symbiose (Bahlouli, 2021).

2.3.2. Bactéroïdètes

Le phylum "*Bacteroidetes*" comprend trois grands groupes de bactéries, "*Bacteroidia*", "*Flavobacteriia*" et "*Sphingobacteriia*", qui sont largement distribuées dans l'environnement, en particulier dans le sol (Naidji, 2020).

Le phylum Bacteroidetes est un phylum bactérien très diversifié, dont le nom a changé plusieurs fois au cours des dernières années. Il est aussi connu sous le nom de groupe *Cytophaga Flexibacter Bacteroides* (CFB), appellation qui reflète la diversité des organismes présents dans ce groupe phylogénétique. Selon le Manuel de bactériologie systématique de Bergey. Le phylum Bacteroidetes, représentant environ 7000 espèces différentes. La classe la plus importante est celle des flavobactéries, regroupant environ quatre fois plus d'espèces que les trois autres. Ces bactéries sont toutes Gram négatif, couvrant un mélange de types physiologiques, de bactéries strictement anaérobies à flavobactéries strictement aérobies. Ils sont non mobiles, flagellés ou se déplacent en glissant.

Les membres de l'embranchement des *Bacteroidetes* ont colonisé de nombreuses niches écologiques différentes, notamment le sol, l'océan, l'eau douce et le tractus gastro-intestinal (GIT) des animaux, où ils remplissent diverses fonctions biologiques. Ils sont particulièrement connus pour leur capacité à dégrader la matière organique polymérique. Cette revue décrit les connaissances actuelles sur le rôle et les mécanismes de dégradation des polysaccharides par les Bacteroidetes dans leurs habitats respectifs (Thomas *et al.*, 2011).

Les Bacteroidetes se développent grâce à leur capacité à sécréter diverses enzymes à activité glucidique (CAZymes) qui ciblent les glycanes très variés du sol. Les Bacteroidetes utilisent un système d'organisation du génome économe en énergie avec la majorité des CAZymes regroupés sur les sites d'utilisation des polysaccharides (Larsbrink et McKee, 2020).

2.3.3. Firmicutes

Les Firmicutes sont des bactéries telluriques à Gram positif (Nasution *et al.*, 2017). Les principaux habitats des Firmicutes sont le sol et la rhizosphère, en particulier les racines des plantes. Par exemple, les bactéries *Bacillus* se trouvent près des racines des plantes (Sivasakthi *et al.*, 2014).

Connus pour leur potentiel à favoriser la croissance des plantes, les Firmicutes présentent plusieurs avantages par rapport aux autres genres bactériens en sécrétant des antibiotiques, des molécules de signalisation peptidiques et des enzymes extracellulaires. Les espèces/souches bactériennes du genre *Bacillus* peuvent produire des auxines comme l'acide indole-3-acétique (IAA), dissoudre le phosphate, fixer l'azote et avoir des propriétés de biocontrôle telles que la production de HCN, d'hydrolases et de sidérophores et notamment d'ACC désaminase (Senthilkumar *et al.*, 2009).

Au sein de ce phylum, *Bacillus* est le genre le plus dominant. Ils représentent environ 95 % de la flore isolée. Ce sont des bacilles à Gram positif, isolés ou en chaînes, capables de sporuler, et généralement mobiles (certains variants sont immobiles, comme *B. anthracis*) (Cherif, 2018). Ce sont des bactéries aérobies ou aéro-anaérobies facultatives formant des endospores (Naidji, 2020). Le genre *Bacillus* a

subi des changements taxonomiques considérables depuis la découverte de la bactérie (1913), et la réorganisation du genre a commencé en 1992, créant 37 nouveaux genres avec des *Bacillus* appartenant à l'ordre des Bacillales et la famille des Bacillaceae (Govindasamy *et al.*, 2011). Il s'agit de bactéries qui favorisent la croissance des plantes, principalement en raison de leur capacité à fixer l'azote, à solubiliser le phosphate et que sont des précepteurs de fer, et à oxyder et réduire le manganèse (Cherif, 2014).

2.3.4. Protéobactéries

De nombreuses études ont rapporté que les protéobactéries sont des membres majeurs de l'environnement terrestre, dont il existe plusieurs classes (Verma et Melcher, 2012) (Figure 4).

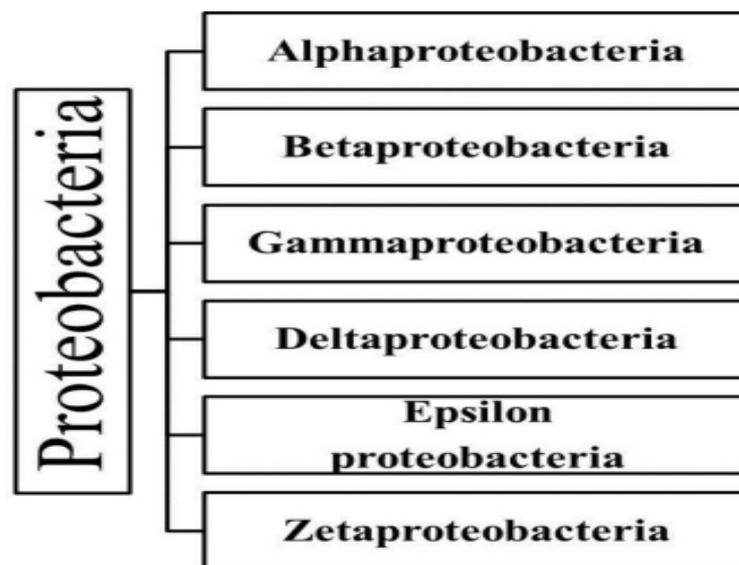


Figure 4: Classes des protéobactéries (Verma et Melcher, 2012).

○ Alphaprotéobactéries

Les alphaprotéobactéries sont un groupe de bactéries du phylum des protéobactéries. Ce sont généralement des bactéries Gram-négatives, mais il existe aussi des bactéries Gram-variantes. Les alphaprotéobactéries ont montré une grande polyvalence pour s'adapter à divers environnements et modes de vie, et l'association entre les bactéries et les plantes est l'une des plus intéressantes, allant de non symbiotiques à relativement non spécifiques (telles que les souches de rhizosphère ou endophyte) à des espèces de *Rhizobia* en interaction très spécifiques (Pini *et al.*, 2011). Les PGPR entrant dans cette catégorie sont classés selon leur capacité à fixer l'azote et noduler les plantes. Lorsque ces souches colonisent les racines de plantes non légumineuses dans des relations non spécifiques, elles peuvent se comporter comme des PGPR (Toledo *et al.*, 2003).

○ Betaprotéobactéries

Cette classe comprend la famille de *Burkholderiaceae*, ou genre *Burkholderia* formant un groupe monophylétique composé de diverses aux propriétés physiologiques et écologiques différentes. Elles sont isolées à partir des sols et des plantes. Certaines souches sont capables de fixation non

symbiotique de l'azote. *Ralstonia* est également un genre appartenant à la famille des *Burkholderiaceae*. Les genres précédemment cités sont omniprésents (Moulin *et al.*, 2001).

○ Gammaprotéobactéries

Elle regroupe le plus grand nombre de Proteobacteria réparties en 13 ordres, dont l'ordre Pseudomonadales comprend deux familles, les Pseudomonadaceae avec les genres *Pseudomonas*, bactéries communes des sols et des eaux, et les Moraxellaceae avec les genres *Moraxella*, *Acinetobacter*, se retrouvent dans les sols (Bertrand *et al.*, 2011).

Dans la famille des Pseudomonadaceae, le genre *Azotobacter* est constitué de bactéries qui favorisent la croissance des plantes principalement en raison de leur capacité à fixer l'azote (Sturz et Christie, 2003).

3. Les bactéries promotrices de la croissance des plantes

3.1. Mécanisme d'action des PGPR

Le mode d'action des PGPR a traditionnellement été divisé en direct et indirect. Bien que la différence ne soit pas toujours évidente entre les deux. Les mécanismes indirects sont généralement ceux qui se produisent à l'extérieur de la plante et affectent principalement tout ce qui concerne la lutte biologique, son métabolisme et son développement, tandis que les mécanismes directs sont ceux qui agissent à l'intérieur de la plante et affectent directement sa nutrition. Les mécanismes directs comprennent les processus de bio fertilisation (nutrition des plantes) et de biostimulation (production d'hormones de croissance) (Figure 5). Les processus de bio contrôle (production de composés volatiles, production des métabolites antifongiques, ...) ; constituent des mécanismes indirects, puisqu'elle fournit un environnement sain pour la croissance de la plante, garantissant la bonne croissance de ces dernières.

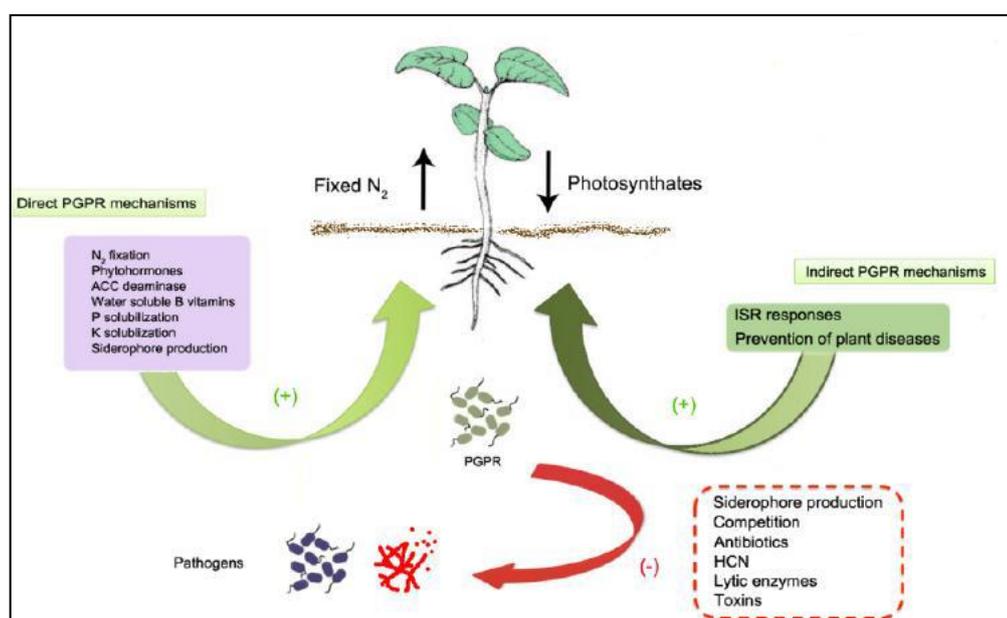


Figure 5: Modes d'action des PGPR (García-Fraile *et al.*, 2015).

3.2. Effet directe des PGPR sur la plante

Les PGPR sont impliqués dans l'augmentation de la disponibilité des nutriments et des phytohormones de la rhizosphère, stimulant directement le développement et la croissance des plantes, et les mécanismes les plus importants sont cités ci-dessous (**Karima, 2018**).

3.2.1. Fixation d'azote

L'azote (N) est un nutriment important pour de nombreuses activités végétales et est souvent le facteur limitant de leur croissance. La fixation de l'azote par des microorganismes libres, associés aux plantes ou symbiotiques est la source d'azote la plus importante dans les écosystèmes naturels (**Bürgmann et al., 2004**). L'azote (N) représente environ 2 % de la matière sèche totale des plantes et est nécessaire à la croissance des plantes. Pour synthétiser les acides nucléiques, les protéines et les enzymes, les plantes ont besoin d'azote (**Bano et Iqbal, 2016**). Sa carence entraîne une croissance réduite, un jaunissement des feuilles et une ramification réduite chez les légumineuses (**Beeckman et al., 2018**). L'azote est le nutriment le plus important pour la croissance et la productivité des plantes. Bien qu'il y ait environ 78% de N₂ dans l'atmosphère, il est indisponible pour les plantes en croissance. Le N₂ atmosphérique est converti en formes utilisables par la plante par la fixation biologique de N₂ par les bactéries en utilisant un système enzymatique complexe appelé nitrogénase (Figure 6) (**Kim et Rees, 1994**).

Les principaux mécanismes par lequel les plantes bénéficient de l'association microbienne c'est la fixation biologique de l'azote par les bactéries du sol. Il est bien connu que l'azote est un nutriment essentiel pour la croissance et le développement des plantes.

La fixation biologique de l'azote (FBN) est le processus responsable de la réduction de N₂ en ammoniac (NH₃), réalisée par des microorganismes diazotrophes, en particulier des bactéries et des archées (**Souza et al., 2015**).

Les bactéries fixatrices d'azote se divisent en deux catégories : les bactéries symbiotiques y compris les membres de la famille des *Rhizobiaceae*, qui forment des relations symbiotiques avec les plantes légumineuses et non légumineuses ; et les bactéries non symbiotiques, telles que les cyanobactéries. 80% de l'azote est formé par des microorganismes en symbiose, le reste provient de systèmes libres ou associés. La fixation non symbiotique de l'azote est d'une grande importance agronomique. Le PGPR de fixation d'azote atmosphérique le plus connu est: *Azoarcus* sp., *Burkholderia* sp., *Gluconacetobacter diazotrophicus*, *Herbaspirillum*, *Azotobacter*, *Paenibacillus* et *Azospirillum brasilense* (**Bassair et Lakhdar, 2022**).

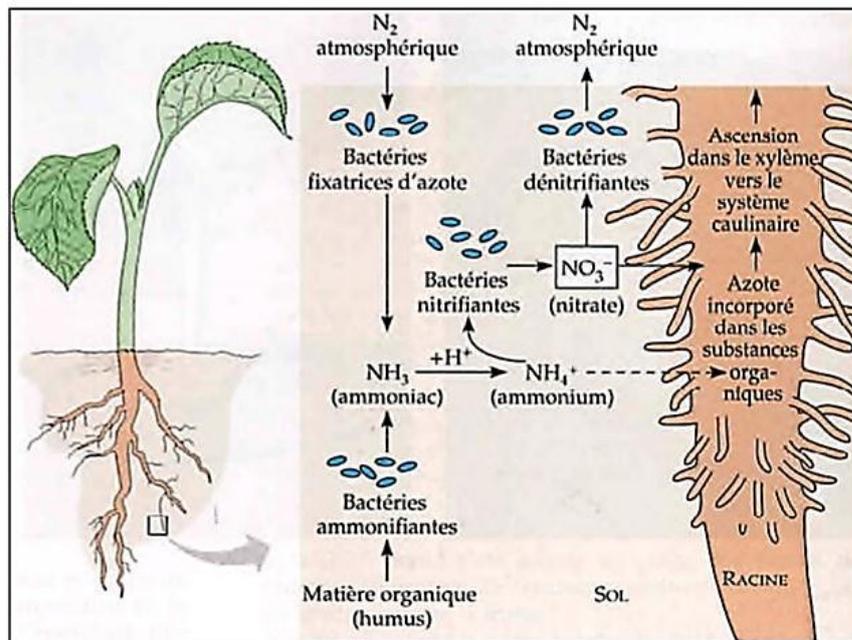


Figure 6: Fixation biologique de nitrogène (Madjida, 2022).

3.2.2. Solubilisation du phosphate

Le phosphore (P) est le deuxième nutriment le plus important pour la croissance des plantes après l'azote et est présent dans le sol sous des formes organiques et inorganiques (Figure 7) (Ahemad et Kibret, 2014). En fait, le phosphore joue un rôle clé dans la photosynthèse, la respiration, le développement des racines, le transfert d'énergie et la biosynthèse des macromolécules (Çakmakçı *et al.*, 2017), est un macronutriment essentiel directement impliqué dans la croissance des acides nucléiques, des cellules en division et des nouveaux tissus, qui régulent tous la synthèse des protéines et le transfert d'énergie (Elhaisoufi *et al.*, 2022). En son absence, P devient le nutriment limitant pour la croissance des plantes. Même dans les sols riches en phosphate, la plus grande quantité de cet élément n'est pas forcément sous forme assimilable (Nada, 2021).

Bien que les sources de phosphore varient, les formes disponibles pour les plantes sont généralement faibles, et cette faible disponibilité est due au fait que la plupart du phosphore dans le sol est présent sous des formes insolubles, alors que les plantes n'absorbent que deux formes solubles, le monobasique (H_2PO_4^-) et les ions dibasiques (HPO_4^{2-}) (Govind *et al.*, 2015).

Il est généralement que le mécanisme de solubilisation du phosphate est la production d'acides organiques. Les plus couramment rencontrés sont l'acide gluconique et l'acide 2-cétogluconique. également ont identifiés, les acides glycolique, oxalique, malonique et succinique. Certaines souches sont capables de produire en plus des mélanges d'acide lactique, isovalérique, isobutyrique et acétique. Entraînant la libération de ces acides mobilisant le phosphore par l'intermédiaire d'interactions ioniques avec les cations du sel de phosphate, une acidification de

la cellule microbienne et de son environnement, et donc la libération de phosphate sous forme ionique. L'action des phosphatases assure la libération des groupements phosphates liés à la matière organique (Figure 7) (Cherif, 2018).

Les microorganismes peuvent favoriser l'assimilation du phosphore par les plantes, en particulier les bactéries qui solubilisent le phosphate inorganique, tels que *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Burkholderia*, *Rhizobium* et *Actinobacteria*, environ 20 % des Actinobactéries peuvent solubiliser le phosphate, y compris ceux des genres *Actinomyces*, *Micromonospora* et *Streptomyces* (Alori et al., 2017).

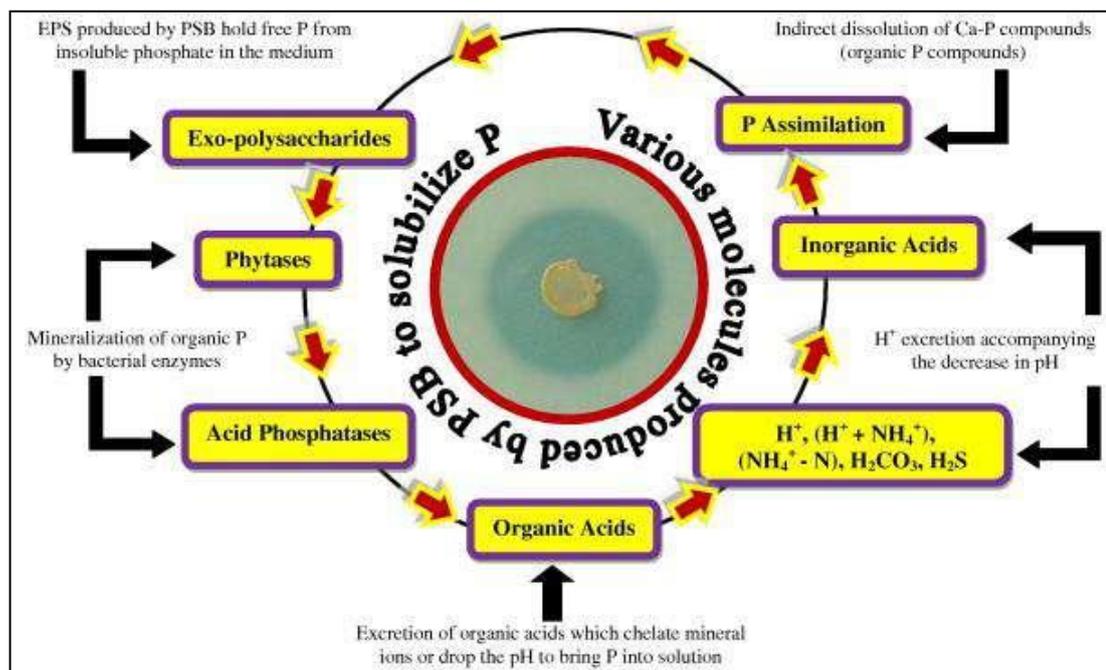


Figure 7: Diverses substances organiques/inorganiques produites par les bactéries solubilisatrices des phosphates responsables de la solubilisation des phosphates dans les sols (Ahmad et Kibret, 2014).

3.2.3. Solubilisation du potassium

C'est le troisième nutriment le plus important pour les plantes. La concentration de potassium (K) soluble dans le sol est généralement faible et plus de 90 % du K dans le sol existe sous forme de roches insolubles et de minéraux silicatés (Parmar et Sindhu, 2013). La carence en potassium est devenue l'une des principales contraintes à la production agricole en raison de l'application inégale d'engrais chimiques. Sans suffisamment de potassium, les plantes ont des systèmes racinaires peu développés, une croissance lente, de petites graines et de faibles rendements (Kumar et Dubey, 2012).

Après l'azote (N) et le phosphore (P), le potassium (K) est le nutriment végétal le plus important, jouant un rôle clé dans la croissance, le métabolisme et le développement des plantes. En plus d'augmenter la résistance des plantes aux maladies, aux ravageurs et aux stress abiotiques, le potassium est nécessaire pour activer plus de 80 enzymes différentes responsables de processus

végétaux, la synthèse de l'amidon, la photosynthèse et la dégradation des sucres, la réduction des nitrates (**Bassair et Lakhdar, 2022**).

3.2.4. Production des phytohormones

Une variété de microorganismes trouvés dans la rhizosphère produisent des substances qui régulent la croissance et le développement des plantes. Les rhizobactéries favorisant la croissance des plantes produisent des phytohormones telles que les auxines, les cytokines, les gibbérellines et l'éthylène, qui peuvent affecter la prolifération cellulaire dans l'architecture racinaire par la surproduction de racines latérales et de racines avec un accroissement subséquent de l'apport d'éléments nutritifs et d'eau (**Arora et al., 2013**).

la production d'acide indole-3-acétique (IAA) par les microbes, revêt une grande importance et a été signalée il y a longtemps. Il a été déclaré qu'environ 80% des microbes isolés de la rhizosphère de nombreuses cultures synthétisent des auxines en tant que métabolites secondaires. L'IAA est très importante dans les interactions plantes-rhizobactéries (**Tsavkelova et al., 2006**). Les gibbérellines affectent la division et l'allongement cellulaires et elles sont impliquées dans plusieurs processus pour améliorer la croissance tels que la germination des graines, la floraison, la fructification et la sénescence retardée dans de nombreux organes d'un large éventail d'espèces végétales. En particulier, elles sont impliquées dans la promotion de la croissance de la racine grâce à leur capacité de réguler l'abondance des poils racinaires (**Bassair et Lakhdar, 2022**). Les cytokinines jouent un rôle essentiel dans nombreux processus physiologiques comme la germination des graines, la promotion de la ramification, le développement des racines, l'accumulation de la chlorophylle et l'expansion des feuilles (**Bassair et Lakhdar, 2022**). L'éthylène est impliqué dans de nombreux processus physiologiques, tels que la germination des graines, la différenciation des tissus, la formation et l'allongement des racines, le développement des bourgeons latéraux, la floraison, l'ouverture des fleurs, la sénescence des organes, la maturation des fruits et l'abscission de la feuille et du fruit. Le l'éthylène peut affecter négativement de nombreux stades physiologiques des plantes (**Cherif, 2018**).

3.3. Effet indirecte des PGPR sur la plante

Les PGPR peuvent être utilisées comme agents de biocontrôle et de lutte biologique, faisant de la rhizosphère une défense de première ligne contre l'attaque des racines par des microorganismes pathogènes (**Aouane, 2017**).

3.3.1. Biocontrôle des maladies des plantes

Lorsque les pesticides conventionnels ne peuvent pas être utilisés compte tenu de préoccupations écotoxicologiques liées à l'accumulation potentielle de leurs résidus, ou encore lorsque le produit doit être certifié issu de l'agriculture biologique (**Bouacid, 2011**). Et l'utilisation des pesticides chimiques peuvent causer des cancers chez les consommateurs ainsi que la pollution de l'environnement. Par

conséquent, les rhizobactéries ont la capacité d'assurer un biocontrôle des maladies causées par des phytopathogènes (Laradj, 2017).

Les microorganismes, principalement des bactéries, sont capables de coloniser efficacement les racines et d'avoir des effets bénéfiques sur les plantes en les protégeant de l'infection par des phytopathogènes. Les plusieurs genres bactériennes utilisées comme biopesticides appartiennent aux genres *Bacillus*, *Pseudomonas* et *Agrobacterium*. De nombreuses études se sont concentrées sur *Bacillus* et *Pseudomonas*, qui sont des habitants communs de la rhizosphère et sont très actifs dans le contrôle biologique des maladies liées au sol (Cherif, 2018) (Figure 8).

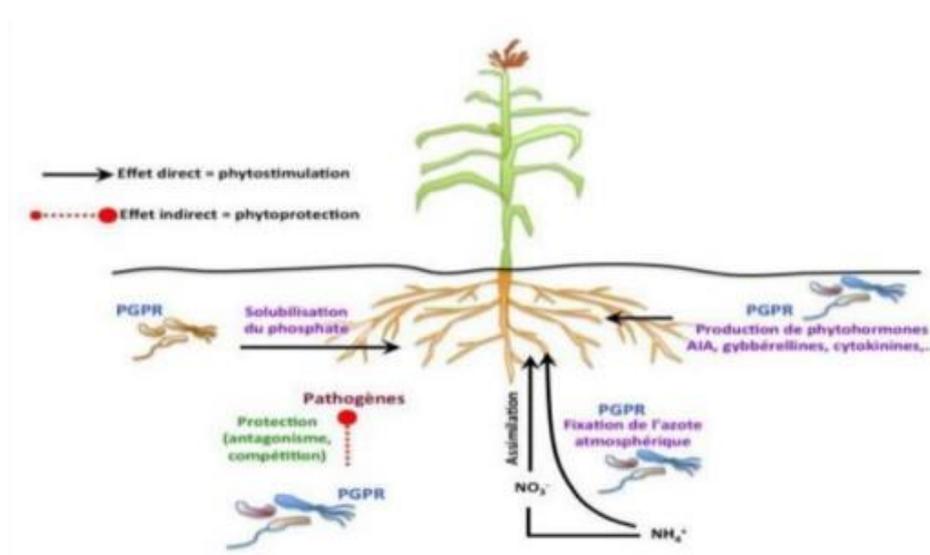


Figure 8: Interactions entre plantes et bactéries coopératives dans la rhizosphère (Khan *et al.*, 2009).

3.3.2. Antibiotique

Les microbes du sol produisent des antibiotiques décisifs pour la survie dans un environnement très compétitif avec la rhizosphère. La production d'antibiotiques est un critère très important pour la compétition des microorganismes avec d'autres populations microbiennes. C'est un critère de performance qui favorise indirectement la croissance des plantes. Elle consiste à contrecarrer les agents pathogènes des plantes originaires de la terre. Une très large gamme d'antibiotiques a été trouvée produite par PGPR, y compris ceux produits par *Pseudomonas*, tels que l'amphisine, le 2,4-diacetylphloroglucinol (DAPG), le cyanure d'hydrogène, l'oomycine A, le phénazine, le pyoluteorine, le pyrrolnitrine, la tensine, la tropolone, et les lipopeptides cycliques (Chereit, 2020). La sélection de souches rhizobactériennes efficaces pour la production d'antibiotiques doit tenir compte du stade de développement de la plante à inoculer et de l'influence des conditions environnementales de sa rhizosphère. Par conséquent, il est recommandé d'utiliser une gamme de souches sélectionnées pour différentes conditions afin d'augmenter l'efficacité du contrôle de plusieurs phytopathogènes dans des conditions de rhizosphère variables (Pettersson et Bååth, 2004).

3.3.3. Enzymes lytiques

La promotion de la croissance par l'activité enzymatique est un mécanisme utilisé par les PGPR, et ces enzymes jouent un rôle clé dans le processus global de décomposition de la matière organique dans les écosystèmes, protégeant ainsi les plantes des stress biotiques et abiotiques. Les bactéries de la rhizosphère favorisant la croissance des plantes peuvent produire certaines enzymes, telles que la chitinase, la lipase, la phosphatase, la protéase, etc. (Nadeem et al., 2013).

La production d'enzymes lytiques utilisées par les agents de lutte biologique contre les pathogènes cibles comprend la production d'enzymes qui dégradent les parois cellulaires, telles que les déshydrogénases, les chitinases, les bêta-glucanases, les protéases, les phosphatases, les lipases sécrétées par les souches de lutte biologique PGPR (Raafat et Sahl, 2009). Cette action des enzymes lytiques, protège les plantes contre une grande variété d'agents pathogènes, tels que les champignons pathogènes, par exemple *Sclerotium rolfsii*, *Botrytis cinerea*, *Fusarium oxysporum*, *Pythium ultimum*, *Phytophthora sp.* et *Rhizoctonia solani* (Hakim et al., 2021). De plus, *Bacillus cereus* et *Bacillus cepacia* produisent de l'amylase, de la β -1,3-glucanase, de la cellulase, de la protéase, de la xylanase et de la lipase, qui rompent les parois cellulaires de plusieurs microbes pathogènes du sol (Hakim et al., 2021).

3.3.4. Production de sidérophores

En général, l'un des mécanismes les plus étudiés et les mieux établis d'inhibition des pathogènes par le PGPR est la production de sidérophores (Vargas et al., 2017).

Les sidérophores sont des composés de faible poids moléculaire sécrétés par de nombreuses bactéries qui ont une forte affinité pour Fe^{3+} et sont capables de solubiliser et de séquestrer le fer dans le sol (Goudjal et al., 2018).

Les rhizobactéries productrices de sidérophores favorisant les plantes peuvent inhiber la prolifération de microorganismes pathogènes en séquestrant Fe^3 dans la zone périracinaire. Ces sidérophores se lient aux ions fer pour former des complexes fer-sidérophores, qui se lient ensuite aux récepteurs dépendant de la limitation du fer à la surface des cellules bactériennes. Les ions de fer sont alors libérés et deviennent actifs dans le cytoplasme sous forme d'ions ferreux (Gupta et al., 2015).

3.3.5. Résistance systémique induite

La reconnaissance par la plante de certaines bactéries de la rhizosphère déclenche une réponse immunitaire qui se protège mieux des agents pathogènes. Cette immunité végétale est appelée ISR. La résistance systémique induite est une forme de résistance particulièrement stimulée par les PGPR, car ils peuvent induire des effets indirects en sensibilisant les plantes à se protéger des attaques microbiennes. Certaines études biochimiques ont justifié le concept de résistance systémique induite (RSI) au PGPR, montrant que la protection des plantes traitées au PGPR est associée à de profondes

modifications métaboliques. L'ISR peut être induite par divers microorganismes Gram-positifs ou Gram-négatifs tels que *Bacillus* et *Pseudomonas* (**Jourdan et al., 2008**).

3.3.6. Production d'HCN

Le cyanure d'hydrogène (HCN) est un métabolite secondaire faisant partie des cyanides. Il peut être produit directement à partir de glycine ou de glycosides cyanogéniques (**Bakker et Schippers, 1987**).

Le HCN généré par le PGPR assure des effets bénéfiques sur les plantes grâce à son antagonisme contre les maladies des racines (**Defago et Haas, 1990**).

Le HCN est un puissant inhibiteur de nombreuses métalloenzymes, en particulier la cytochrome c oxydase ; il inhibe d'abord le transport des électrons et perturbe l'apport énergétique des cellules, entraînant la mort de l'organisme. Il peut affecter l'établissement des plantes ou inhiber le développement des maladies des plantes, et a un grand potentiel dans le contrôle des maladies bactériennes des plantes. De nombreux genres bactériens ont la capacité de produire du HCN, notamment des espèces d'*Alcaligenes*, d'*Aeromonas*, de *Bacillus*, de *Pseudomonas* et de *Rhizobium* (**Bassair et Lakhdar, 2022**).

3.3.7. Compétition

La compétition est un mécanisme biologique utilisé par les PGPR pour éliminer les pathogènes des plantes. En plus du fait que les PGPR soient compétitives aux autres populations microbiennes rhizosphériques, elles sont capables de coloniser le maximum d'espace dans la rhizosphère et exploiter ses ressources nutritionnelles, participant ainsi à la réduction des phytopathogènes du sol par la compétition. La compétitivité des PGPR est largement supérieure quand elles ont des capacités spécifiques d'assimiler certains nutriments ou bloquer leur assimilation par les autres microorganismes. En fait, les tests de compétitivité doivent être pris en compte lors de la sélection des souches de PGPR afin de sélectionner les souches qui ont une capacité de colonisation significative dans la rhizosphère et/ou la rhizosphère des plantes inoculées (**Kirdi, 2011**).

II. PGPR comme l'une des meilleures solutions pour améliorer et développer l'agriculture

Ces dernières années, plusieurs études et expérimentations réalisées au champ ou en serre à travers le monde ont montré de bons résultats dans l'inoculation des cultures végétales avec le PGPR (**Bresson, 2013**). Sur la base de ces données, il est clair que l'inoculation peut être considérée comme une technique émergente et écologiquement très intéressante, car les rendements de diverses cultures peuvent être considérablement augmentés même dans des conditions difficiles. Ils affectent la croissance et le rendement d'une grande variété de cultures telles que les céréales ou les légumes. Traitement PGPR Augmentation du taux de germination, la vigueur des plantules, l'émergence, le

développement des racines et des tiges, la biomasse totale des plantes, le poids des semences, la floraison précoce et les rendements de fruits et des graines (**Ramamoorthy et al., 2001**).

En 2050, le nombre d'habitants de la planète devrait dépasser les 9 milliards et la demande alimentaire devrait doubler (**Bourles, 2019**). Pour nourrir l'ensemble de la population, il est absolument essentiel que la productivité agricole augmente considérablement au cours des prochaines décennies (**Timmusk et al., 2017**). Pour réduire l'utilisation d'engrais chimiques, limiter la consommation d'eau et augmenter la tolérance des plantes agricoles, l'utilisation des PGPR s'est imposée comme une solution biologique durable et respectueuse de l'environnement (**Bourles, 2019**). Promouvoir la symbiose bénéfique plante-microbe est un moyen fantastique de remplacer l'utilisation d'engrais chimiques, de pesticides et d'autres suppléments. Les substances favorisant la croissance sont susceptibles d'être produites en grandes quantités par ces microorganismes de la rhizosphère qui influencent indirectement la morphologie globale des plantes. Compréhension de la diversité des PGPR dans la rhizosphère ainsi que de leur capacité de colonisation et de leur mécanisme d'action devraient faciliter leur application en tant que composant fiable dans la gestion d'un système agricole durable (**Aya, 2021**).

III. Généralités sur les plantes étudiées

1. *Cleome arabica* L.

1.1. Généralités

Cleome arabica L. est une plante appartenant à la famille des *Capparidaceae* (ou *Capparaceae*), qui est une grande famille taxonomiquement. Il ne compte pas moins de 45 genres et environ 700 espèces, principalement dans les régions tropicales et subtropicales, et dans le sud du Sahara, une vingtaine d'espèces sont répertoriées, réparties dans les genres *Capparis*, *Maerua* et *Cleome* (Cherif, 2020).

1.2. Systématique de *Cleome arabica* L.

La classification systématique de *Cleome arabica* L.

Embranchement:	Spermaphytes
Sous- Embranchement:	Angiospermes
Classe:	Dicotylédones
Sous-classe:	Dillenidae
Ordre:	Capparales
Sous- ordre:	Capparidineae
Famille:	Capparidaceae
Genre:	<i>Cleome</i>
Espèce:	<i>Cleome arabica</i> L.

1.3. Description de *Cleome arabica* L.

Cleome arabica L. plante vivace de 30 cm de haut, à tige ramifiées dressées, folioles poilues, trilobées, folioles lancéolées. Les pétales des fleurs varient en couleur du jaune au violet foncé. Le fruit est une gousse velue de 2 à 5 cm de long à la base du pétiole. C'est une plante nauséabonde, toxique et hallucinogène. Selon **Ozenda (1991)** dans la région saharienne, *C. arabica* L. se trouve sur des rocailles, du sable et des graviers.



Figure 9: *C. arabica* L en pied isolé à Oued Metlili, Wilaya de Ghardaïa

1. 4. Répartition géographique

L'espèce est commune dans les savanes désertiques, le sol tropical Tamarisay s'élève dans les canyons sablonneux, et est commune dans le nord du Sahara, en Egypte et en Afrique tropicale (Maire, 1933, Ozenda, 1991). En Algérie Poussant dans les régions sahariennes, *Cleome arabica* (Ozenda, 1991, Beniston, 1984).

1.5. Utilisation en médecine traditionnelle

Cleome arabica L. est utilisé en médecine traditionnelle par les populations locales et les nomades sahariens comme analgésique des névralgies et des douleurs rhumatismales et comme diurétique (Sharaf *et al.*, 1992).

Dans le Hoggar, les feuilles séchées ou leur poudre sont ajoutés à l'alimentation comme un diurétique, pour le traitement des rhumatismes, ou pour provoquer la transpiration (Burkill, 1985). Les habitants de la région de Boussaâda utilisent les feuilles de *Cleome arabica* L. en cataplasmes topiques pour traiter certaines formes de rhumatismes (Djeridane *et al.*, 2010).

2. *Moricandia suffruticosa* (Krombe)

2.1. Description de *Moricandia suffruticosa*

Cette plante est vivace. il peut fleurir en toutes saisons. On l'identifie à ses feuilles glauques légèrement charnues, qui enveloppent souvent la tige, et à ses siliques, larges de seulement 2 mm, dans lesquelles les graines sont disposées en rangées.



Figure 10: *Moricandia suffruticosa* en pied isolé à, Wilaya de Ghardaïa

2.3. Systématique de *Moricandia suffruticosa*:

Règne:	Planta
Sous-règne:	Tracheobionta
Classe:	Magnoliophyta
Sous- classe:	Magnoliopsida
Ordre:	Dilleniidae
Famille:	Capparales
Sous famille:	Brassicaceae
Genre:	<i>Moricandia</i>
Espèce:	<i>Moricandia suffruticosa</i>

2.3. Répartition géographique

Les zones semi-aride des régions méditerranéennes en Afrique et en Asie (Al-Shahbaz, 1985).

2.4. Utilisation de *Moricandia suffruticosa*

- Manger les feuilles cuites à l'eau salée, puis broyées et mélangées à de l'huile.
- Décoction de tiges et de feuilles, utilisée pour traitement de infection la syphilis. Il est utilisé comme boisson et pour laver les zones touchées.
- Intérêts pastoraux : plantes broutées par les chameaux. (Ozenda, 1991, Chehma, 2006).

3. *Fagonia glutinosa* Delile (Cherrick)

3.1. Description *Fagonia glutinosa* Del .

C'est une Plante pérenne, rampante, rameuse. Les tiges mesurent 10-15 cm de long, Les feuilles sont petites, trilobées, avec des folioles discrètes très courtes. Feuilles velues, glanduleuses et branches plus ou moins agglutinées de sable. Petites fleurs rouge violacé qui s'ouvrent comme une étoile et produisent ensuite de petites capsules.

Cette fagonie se distingue par :

- Ses tiges rayonnent vers l'extérieur à partir du centre de la plante et sont toutes fermement plantées dans le sol .Les tiges et les feuilles sont recouvertes de sable compact avec de petites glandes collantes
- Fleurs bleues à violettes (Chehma, 2006).



Figure 11 : *Fagonia glutinosa* Del. en pied isolé à, Wilaya de Ghardaïa

3.2. Systématique de *Fagonia glutinosa* Del .

Règne:	Planta
Sous-règne:	Tracheobionta
Division:	Magnoliophyta
Classe:	Magnoliopsida
Sous- classe:	Rosidae
Ordre:	Sapindales
Famille:	Zygophllaceae
Sous famille:	Zygophylloideae
Genre:	<i>Fagonia</i>
Espèce:	<i>Fagonia glutinosa</i> Delil.

3.3. Répartition géographique *Fagonia glutinosa* Del.

C'est une espèce très commune dans la vallée. On le trouve presque partout dans les palmeraies (Kherraze *et al.*, 2014). Son aire de répartition s'étend du sud-ouest de l'Amérique du Nord, du sud-est de la Californie et du sud de l'Utah au nord-ouest du Mexique.

3.4. Utilisation *Fagonia glutinosa* Del .

Les feuilles de *Fagonia glutinosa* sont utiles les maladies de peau, les problèmes de bouche pour les bébés, faiblesse corporelle fracture et spasme musculaire (Teklehaymanot, 2017).

Il prend un cataplasme de feuilles écrasées avec de l'huile

L'huile d'olive est utilisée comme agent apaisant dans la tête et dans le niveau des pieds est Contre les rhumatismes.

Intérêt pastoral : c'est une plante broutée par les dromadaires, surtout lors de la fructification (Quézel et Santa, 1963) ; plante peu broutée sans doute à cause du sable qui la recouvre.

4 . *Anvillea radiata* L.(Noug)

4.1. Description *Anvillea radiata* L. (Noug)

Arbrisseau buissonnant de 40 à 60 cm de haut, à tiges dressées et très rameuses, ligneuses à la base. Feuilles Vertes bleutées, allongées et à bords dentés. Les fleurs sont en petites grappes aux extrémités des rameaux, elles sont petites, jaunes, à cinq pétales. (Ozenda, 1983; Quezel et Santa, 1962).



Figure 12 : *Anvillea radiata* L en pied isolé à, Mansoura Wilaya de Ghardaïa

4.2. Systématique de *Anvillea radiata* L.

Embranchement : Spermaphytes

Sous-Embranchement: Angiospermes

Classe : Angiospermes

Sous-classe : Dicotylédones

Ordre : Asterales

Famille : Composées

Genre: *Anvillea*

Espèce: *Radiata*

4.3. Répartition géographique

Anvillea. radiata habite généralement les petites dépressions sablo-argileuses (**Benaissa, et Benayache, 2013**) réparties dans les steppes de l'Afrique du Nord particulièrement en Maroc et Algérie , en particulier dans les régions de Ouargla , El Delfa, Bechar et El Golia (**Djellouli, 2013**). Assez répandue dans tout le Sahara septentrional. Endémique saharienne.

4.4. Utilisation *Anvillea radiata* L. (Noug)

Anvillea.radiata est utilisée dans la médecine traditionnelle comme pour le traitement de la indigestion, troubles gastriques-intestinal et le refroidissement pulmonaire.

Et cette plante consommée par les chameaux et les Chèvres.

5. *Helianthemum lippii* L. (Rguig)

5.1. Description de *Helianthemum lippii* L.

Petits arbustes très ramifiés, de 10 à 30 cm de haut. Tiges partiellement lignifiées à écorce blanche. Les feuilles sont opposées, allongées et couvertes de poils très courts, Donnez-leur une couleur vert blanchâtre. Les fleurs se présentent en grappes clairsemées aux extrémités des rameaux, elles sont petites, jaunes à cinq pétales (**Chehma, 2006; Ozenda, 1991**). *Helianthemum* Groupe de petits arbustes à fleurs jaunes. Souvent grégaire dans les pelouses sèches simples et les sols rocheux de la Méditerranée ou les montagnes avoisinantes, avec quelques espèces se présentant plus au Nord ou à l'Est.



Figure 13 : *Helianthemum lippii* (L.) en pied isolé à Mansoura, Wilaya de Ghardaïa

5.2. Systématique de *Helianthemum lippii* L.

Royaume : Plantes

Phylum : Trachéophytes

Classe: Magnoliopside

Famille: Cistacées

Genre : *Moulin à Hélianthème* .

Espèces : *Helianthemum lippii* (L.) .

5.3. Répartition géographique

Commun dans tout le Sahara septentrional.

5.4 Utilisation de *Helianthemum lippii* L.

Les plantes de *Helianthemum lippii* L. sont traditionnellement utilisées en médecine populaire comme antiseptiques, analgésiques et anti-inflammatoires (Alsabri, 2013), pour traiter les brûlures, les troubles respiratoires et digestifs, les hémorroïdes et la fièvre (Rigat, 2007).

Intérêt pastoral : Elle très appréciée par les dromadaires et les chèvres. (Quézel et Santa, 1962, Ozenda,1991).

Chapitre II

Matériels et Méthodes

II. Matériel et méthodes

Cette étude a été effectuée au niveau du Laboratoire de Microbiologie de l'Université de Ghardaïa. L'objectif de ce travail est l'isolement et la caractérisation des bactéries rhizosphériques et l'étude de leurs activités biologiques (activité enzymatique et traits PGP). Ces bactéries ont été isolées à partir des plantes sahariennes spontanées prélevées de différents sites de la wilaya de Ghardaïa. Aussi, ces bactéries ont été vérifiées pour leur potentiel de promotion de la croissance de l'orge et la tomate.

1. Description du site d'échantillonnage

La région de Ghardaïa est située au cœur du désert du Sahara du Nord en Algérie à environ 600Km au sud de la capitale d'Alger. Cette étude a été menée sur trois stations : Ghardaïa (centre-ville), Metlili et Mansoura (Figure 14). Des rhizobactéries ont été isolées à partir de 5 plantes sahariennes spontanées nommées *Cleome arabica*, *Moricandia suffruticosa*, *Fagonia glutinosa* Del., *Anvillea radiata* L. et *Helianthemum lippii* L. Le choix du site de prélèvement était basé sur l'aridité du climat et l'abondance de la végétation.

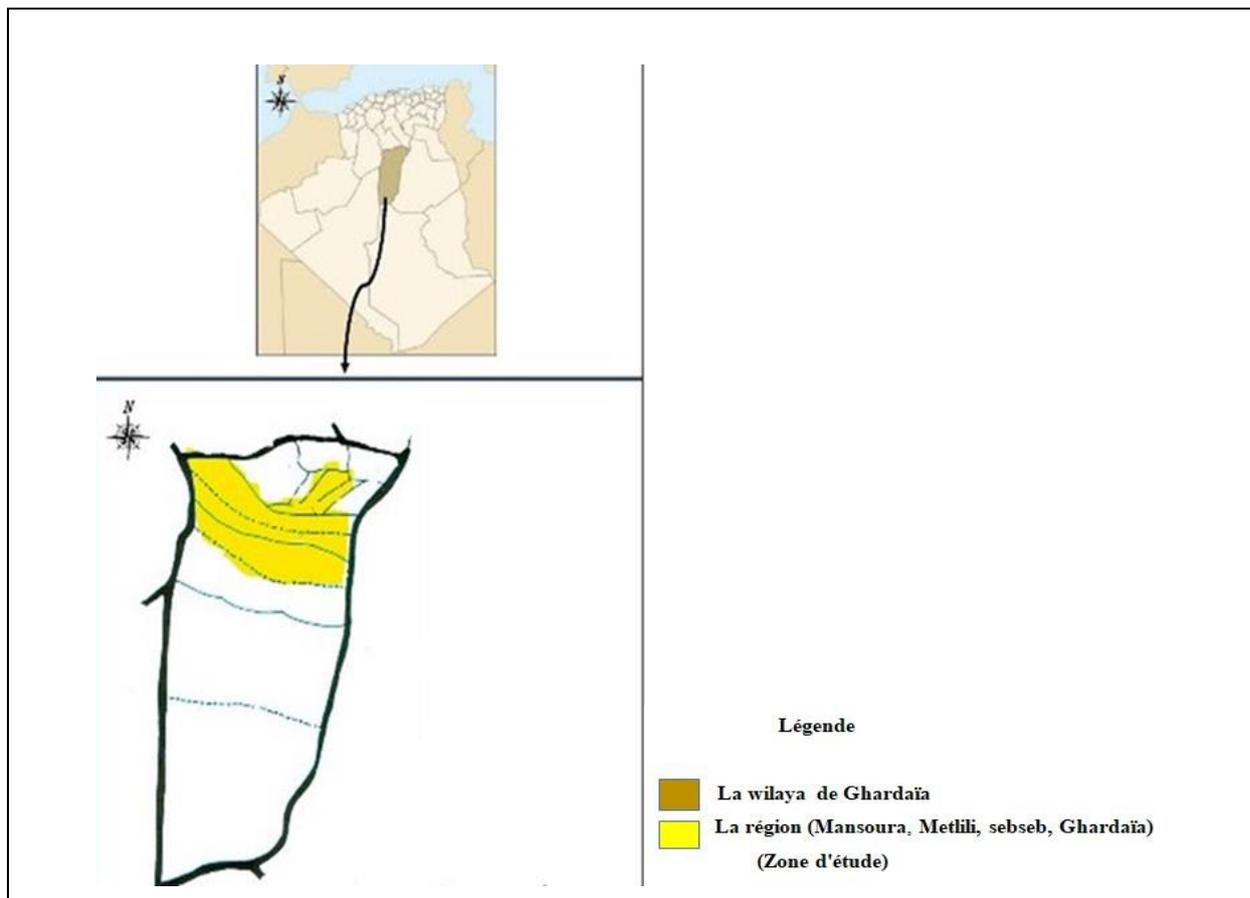


Figure 14: Carte de l'Algérie montrant la zone d'étude (wilaya de Ghardaïa) (Kheloufi et Meddah, 2020).

2. Matériel végétal

2.1. Présentation des plantes spontanées étudiées

L'échantillonnage a été effectué sur les plantes suivantes : *Anvillea radiata* L. (Noug), *Helianthemum lippii* L. (Rguig), *Cleome arabica* L. (Netil), *Fagonia glutinosa* Del. (Cherrik), *Moricandia suffruticosa* (Krombe) durant la période de Mars à Avril 2023. Ces plantes peuvent pousser dans diverses conditions environnementales, notamment des températures élevées et la sécheresse (Chekroun-Bechlaghem *et al.*, 2019).

2.2. Présentation des plantes cultivées

Le choix des deux plantes cultivées utilisées dans cette étude a été basé sur leur utilisation en agriculture. Dans ce contexte, des cultivars de tomate et d'orge ont été sélectionnés pour évaluer le potentiel des isolats dans la promotion de la croissance de ces plantes.

3. Echantillonnage

Les 5 échantillons rhizosphériques sont prélevés dans différents sites de la wilaya de Ghardaïa. A l'aide d'un scalpel stérile, les racines sont coupées après avoir creusé profondément (jusqu'à 30cm) autour des plantes et sont mises dans des sachets stériles et conservés à 4°C (Figure 15).



Moricandia suffruticosa
en pied isolé à,
Wilaya de Ghardaïa



C. arabica. L
en pied isolé à,
Oued Metlili



Anvillea radiata .L
en pied isolé à
Mansoura Wilaya de Ghardaïa

Figure 15: échantillons rhizosphériques des plants étudiées.

4. Isolement, purification et conservation des souches bactériennes

4.1. Préparation des échantillons rhizosphériques

Les racines sont placées dans des flacons de 50ml contenant 10ml d'eau physiologique stérile. Les flacons ont été bien agités pendant 3min afin de récupérer le sol lié à la surface des racines. La solution résultante est récupérée dans des tubes à essai et soumise à des dilutions en série jusqu'à 10^{-5} .

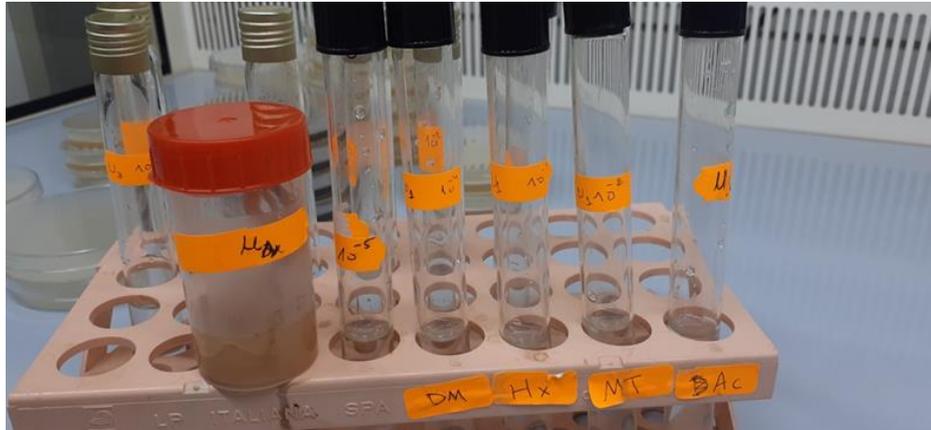


Figure 16: Préparation des solutions mères et série de dilutions

4.2. Milieu utilisé pour l'isolement

La gélose Trypto-caséine soja (TSA) est un milieu universel convenant pour la culture d'un large éventail de microorganismes (**Razan, 2011**). Du fait de son excellente nutritivité, elle peut être utilisée, d'une part pour la culture et l'isolement des bactéries aérobies et anaérobies et d'autre part pour favoriser la croissance de germes particulièrement exigeants.

Afin de récupérer un maximum de diversité bactérienne. Le milieu utilisé est additionné par 100µg/l de cycloheximide pour inhiber la croissance des champignons (**Elvira-Recueno et Van Vuurde, 2000**).

4.3. Isolement des bactéries

A partir de la 4^{ème} et 5^{ème} dilution (Figure 16), un volume de 100µl a été étalé en surface des boîtes de Pétri. Après incubation à $28 \pm 2^\circ\text{C}$ pendant 24 à 48h, les colonies sélectionnées ont été ensemencées dans le même milieu à plusieurs reprises jusqu'à ce que les souches bactériennes soient pures, puis ces souches ont été conservées à $+4^\circ\text{C}$ pour les expériences ultérieures.

4.4. Conservation des isolats

Les isolats purifiés ont été maintenus sur le milieu Tryptic Soy Broth (TSB) stérile préalablement dilué au 1/10 et maintenu sur un agitateur à $28 \pm 2^\circ\text{C}$ pendant 24h pour une conservation à court terme à 4°C et dans le glycérol pour une conservation à long terme à -20°C . La méthode de conservation des souches consiste à repiquer les souches de culture fraîche (de 18h) en tube d'Eppendorf stérile préalablement préparé.

Ces derniers ont été bouchés hermétiquement et stockés à -20°C . Après, une culture jeune des bactéries a été inoculée sur les boîtes préparées et suivie leur croissance après incubation à $28\pm 2^{\circ}\text{C}$ pendant 10 jours (**Ramadoss *et al.*, 2013**).

5. Caractérisation des bactéries isolées

Les souches bactériennes sont identifiées par diverses méthodes, notamment microscopique (état frais et après coloration), macroscopique (couleur, tailles...etc.), la détermination des caractères biochimiques en utilisant les tests d'oxydase et catalase.

5.1. Caractérisation macroscopique morphologique et biochimique

5.1.1. Caractérisation macroscopique

L'aspect des colonies est observé après culture pendant 24h à 37°C sur le milieu TSA. L'observation de l'aspect macroscopique des colonies permet d'effectuer une première caractérisation. L'étude macroscopique a été réalisée en tenant compte de :

- La forme des colonies : rondes, irrégulières, ... etc.
- La taille des colonies par la mesure du diamètre : punctiformes ou non-punctiformes.
- La chronogénèse : couleur de la colonie.
- L'élévation : convexe, concave et plate.
- L'opacité : opaque, translucide ou transparente.
- La surface : lisse, rugueuse, sèche...etc.

5.1.2. Caractérisation microscopique

Pour effectuer l'observation microscopique des caractères morphologiques des cellules une toute petite quantité de bactéries a été prélevée à partir de chaque souche pure. Cette étude nous a permis de distinguer entre les différentes espèces bactériennes par rapport à la forme de leurs cellules (bacille et cocci).

Pour vérifier la pureté des isolats et s'orienter dans l'identification nous avons utilisé la coloration de Gram qui est un aspect important et essentiel pour l'identification d'une bactérie isolée et la vérification de la pureté de l'isolat. A partir d'une colonie après croissance de 24h, un frottis est fixé à la chaleur puis recouvert par le violet de Gentiane pendant 1min, ensuite il est éliminé par l'ajout du Lugol pendant 1min. Le frottis est ensuite décoloré avec de l'éthanol jusqu'à ce que le colorant cesse de s'échapper librement du frottis. A ce stade, les cellules Gram négatives seront incolores et les cellules Gram positives violettes. Ensuite, le frottis est soumis à une contre coloration de 30s à la fuchsine, pour colorer les cellules Gram négatives présentes. Après un bref rinçage à l'eau, le frottis est séché puis examiné.

5.1.3. Identification biochimique

5.1.3.1. Test d'oxydase

Le test d'oxydase est le test de base pour identifier les bactéries Gram-négatives.

- Techniques

Placer un carré de papier filtre sur la lame. Des fragments de colonies sont ensuite fixés sur des lames de verre à l'aide d'une pipette Pasteur boutonnée, pour la lecture ce test.

- ✓ Si la colonie vire au rose violacé, cela signifie que les bactéries ont de l'oxydase (test positif).
- ✓ Si les colonies restent incolores, cela signifie que les bactéries n'ont pas d'oxydase. (Le résultat du test est négatif).

5.1.3.2. Test de catalase

Le test catalase est le test de base de l'identification des bactéries Gram positive.

- Techniques

Ajouter un inoculum bactérien en déposant une goutte de peroxyde d'hydrogène sur une lame propre et sèche à l'aide d'une pipette Pasteur stérile à bouton.

- Lecture
- ✓ La formation de bulles d'oxygène = la bactérie possède une catalase (test positif).
- ✓ La formation de très peu de bulles ou bien leur absence = la bactérie ne possède pas une catalase (test négatif).

5.1.4. Confirmation de la nature non pathogène

Les tests d'hémolyse et de coagulation ont été réalisés sur les souches bactériennes sélectionnées pour prouver la nature non pathogène pour l'homme.

5.1.4.1. Test d'hémolyse

Pour déterminer la capacité de l'isolat bactérienne à produire des hémolysines, Les souches ont été inoculées sur une gélose au sang complétée par 5 % de sang de lapin et incubée à $30\pm 2^{\circ}\text{C}$ pendant 24 h. L'apparition d'une zone claire sur la boîte a été interprétée comme un résultat positif (**Payment et al., 1994**).

5.1.4.2. Test de coagulase

Sélectionnez deux ou trois colonies isolées de bactéries à tester et à l'aide de la boucle stérile. Les transférez de manière aseptique dans le tube à essai contenant le plasma de lapin lyophilisé traité à l'EDTA mélangé et incubé à $37\pm 2^{\circ}\text{C}$ pendant 24h. La présence de la coagulation au fond du tube est considérée comme un résultat positif.

6. Caractérisation *in vitro* des traits PGP

6.1. Fixation de l'azote atmosphérique

L'azote est un élément chimique (N) composant majoritairement l'atmosphère terrestre et puisqu'on le retrouve à 78 %, il est présent dans de nombreux composés organiques et inorganiques. C'est un des nutriments essentiels au maintien de la vie des plantes et de leur production.

L'activité de fixation de l'azote a été testée sur un milieu semi-solide NFb (Nitrogen Free Medium) additionné de bleu de bromothymol (**Baldani et Döbereiner, 1980**). Les colonies colorées en bleu ont été indiquées comme positives pour la fixation de l'azote. Le test est réalisé en inoculant les tubes contenant le milieu semi-solide NFb et après incubation à $30\pm 2^{\circ}\text{C}$ pendant 7 jours, les tubes positifs ont été confirmés.

6.2. Solubilisation du phosphate inorganique

La dissolution des phosphates inorganiques est étroitement liée à l'activité des microorganismes du sol (**Tardieux -Roche, 1966 ; Richardson, 2001**).

La solubilisation du phosphate a été évaluée en milieux de Pikovskaya (Pikovskaya, 1948). A partir de la culture bactérienne, trois gouttes de chaque isolat ont été délicatementensemencées sur le milieu de Pikovskaya. L'incubation des boîtes de Pétri a été faite à 30°C pendant 7 jours. La capacité des souches bactériennes à solubiliser le phosphate entraîne l'apparition d'un halo translucide autour de la colonie.

6.3. Solubilisation du potassium

L'isolement des bactéries solubilisant le potassium est testé sur le milieu d'Aleksandrov (**Aleksandrov et al., 1967**) après incubation à $30\pm 2^{\circ}\text{C}$ pendant 48h. L'activité de solubilisation du potassium inorganique a été identifiée par l'apparition de zones claires autour des colonies bactériennes.

6.4. Production d'ammoniac

Pour la production du NH_3 , toutes les souches bactériennes ont été cultivées dans 10ml de l'eau peptonée pendant 48h à $30\pm 2^{\circ}\text{C}$, L'addition de 0.5ml du réactif de Nessler donne un développement le d'une couleur brune à jaune ce qui est enregistré comme une réaction positive pour la production d'ammoniac (Figure 17).



Figure 17: production d'ammoniac dans l'eau peptonée .

6.5. Activité enzymatique

Les souches ont été testées pour leurs activités enzymatiques qui sont inoculés sur différents milieux tels que le milieu de gélosée à la cellulose, le milieu gélosé au lait écrémé comme milieu sélectif pour la détection des activités cellulolytique et protéolytique chez les 12 souches isolées et testées.

6.5.1. Activité cellulolytique

Les souches bactériennes ont été inoculées sur un milieu solide basal complété par de la Carboxy Méthyl Cellulose (CMC ; 10g/l) comme seule source de carbone et incubées pendant 72h à $30\pm 2^{\circ}\text{C}$. Pour étudier la production de cellulase, la formation de halos clairs autour des colonies indique une dégradation positive de la CMC après ajout du rouge Congo et NaCl 1M (Teather et Wood, 1982).

6.5.2. Activité protéasique

L'activité protéasique a été testée sur un milieu gélosé au lait écrémé. Après incubation à $30\pm 2^{\circ}\text{C}$ pendant 24h, les boîtes de Pétri ont été examinées pour le développement de halos clairs autour des colonies bactériennes (Loper et Schroth, 1986).

7. Screening *in vitro* des isolats pour la promotion de la croissance des plantes

Après les tests PGP *in vitro*, 12 souches parmi les 55 obtenues ont été choisies pour évaluer leur efficacité dans la promotion de la croissance des plantes de manière positive, un test *in vitro* a été réalisé sur les graines de la tomate et l'orge.

La technique de bactérisation de graines par les inoculas bactériens (immersions dans des suspensions bactériennes) a été mise en évidence. Les paramètres suivis dans cette étude sont: le taux de germination, la longueur de tige, la longueur des racines, les poids frais et secs des plantes.

7.1. Sélection des souches bactériennes performantes

Les souches de bactéries qui montrent un effet PGP *in vitro* sont sélectionnées pour étudier leurs principaux mécanismes impliqués dans la promotion de la croissance des grains de tomate et de l'orge.

7.2. Préparation des boîtes de Pétri et des solutions d'arrosage

Des cercles de papier absorbant stérilisés sous UV pendant 30min sont déposés dans les boîtes de Pétri stériles en plastique de 90mm de diamètre (Figure 18).

L'arrosage a été réalisé sur le papier absorbant par 5ml de solution d'arrosage pour chaque boîte.



Figure 18: Préparation des boîtes de Pétri et stérilisation de papier absorbant.

7.3. Préparation des semences

Dans des tubes de type Falcon stériles, on place une quantité suffisante des graines de la tomate et de l'orge puis on les nettoie rigoureusement plusieurs fois par l'eau distillée stérile. Pour la stérilisation de la surface de ces grains on les trempe dans le NaCl à 2% durant 3min. puis rincées par l'eau distillée trois fois, par la suite dans de l'éthanol à 70% durant 1min suivi par un rinçage par l'eau stérile.

7.4. Préparation des suspensions

Les 12 souches sélectionnées ont été ensemencées à partir d'une culture jeune sur des Erlenmeyers contenant 150ml de milieu TSB dilué au 1/10. Les cultures ont été incubées à $30\pm 2^{\circ}\text{C}$ sous agitation à 180 rpm pendant 18h. Ces souches ont été mises dans de l'eau physiologique stérile. Un volume de 10ml de la suspension bactérienne de chaque souche est déposé aseptiquement dans des tubes à essais stériles pour les utiliser dans la bactérisation des graines.

7.5. Bactérisations des semences

La bactérisation des semences a été réalisée dans les conditions d'asepsie, dans des tubes à essai stériles qui contiennent les grains de la tomate et de l'orge. On verse 10ml de la suspension bactérienne, les lots de contrôles (les grains de la tomate) sont mis dans des tubes à essai contenant de l'eau physiologique stérile.



Figure 19: Bactérisations des graines.

7.6. Semis des graines et suivi des paramètres morpho-physiologiques

Les boîtes de Pétri préparées et étiquetées ont été organisées en 13 rangées de 3 boîtes : une rangée de 3 boîtes pour le contrôle, et 12 rangées de trois 3 boîtes pour les 12 souches bactériennes sélectionnées dans cette étude.

Les graines traitées et inoculées ont été déposées aseptiquement dans les boîtes de Pétri préparées en mettant 25 graines pour l'orge (25 graines x 3 boîtes) et 20 graines pour la tomate par boîte (20 graines x 3 boîtes) espacées entre-elles par 0,5mm au minimum. Chaque boîte est arrosée par la solution correspondante tous les deux jours.

Les boîtes de Pétri ont été maintenues dans des conditions de chambre de croissance avec une température de $25\pm 2^{\circ}\text{C}$, une photopériode de 16h de lumière/8h d'obscurité et une humidité relative de 70%. Le taux de germination a été déterminé après 3 jours pour les graines d'orge et cinq jours pour les graines de la tomate.

Les paramètres morpho-physiologiques de croissance : longueurs et poids (frais et sec) des tiges et des racines ont été enregistrés après 10 jours. Les traitements réalisés sont les suivants :

- Contrôle négatif (-) : Un lot de graines de tomate et de l'orge est désinfecté et déposé sur papier filtre stérile imbibé par 5ml d'eau distillée stérile.
- Essai de biofertilisation : Un lot de graines des plantes testées a été enrobé par chacune des souches bactériennes qui sont semées dans des boîtes arrosées par 5ml d'eau distillée.

Les paramètres suivants : longueur de la tige, longueur des racines, poids frais, poids sec, surface foliaire et mesure de la chlorophylle ont été enregistrés après la période d'essai.

8. Analyse statistique

L'analyse statistiques des données. Les valeurs des paramètres de croissance et de rendement ont été soumises a une analyse comparative.

Chapitre III

Résultats et Discussion

III. Isolement et caractérisation préliminaire des bactéries

III.1. Isolement des bactéries rhizosphériques

Après le dénombrement et l'observation des colonies bactériennes à l'œil nu, certaines de ces colonies obtenues ont été retenues pour un éventuel repiquage.

Parmi toutes les colonies observées, 77 isolats représentatifs des genres observés du point de vue de la dominance et la diversité ont été sélectionnés.

Les observations macroscopiques nous ont permis de remarquer une diversité morphologique et caractéristique des colonies.

Tous les isolats ont été implantés et purifiés au même milieu d'isolement et conservés pour des études futures (Figure 20)

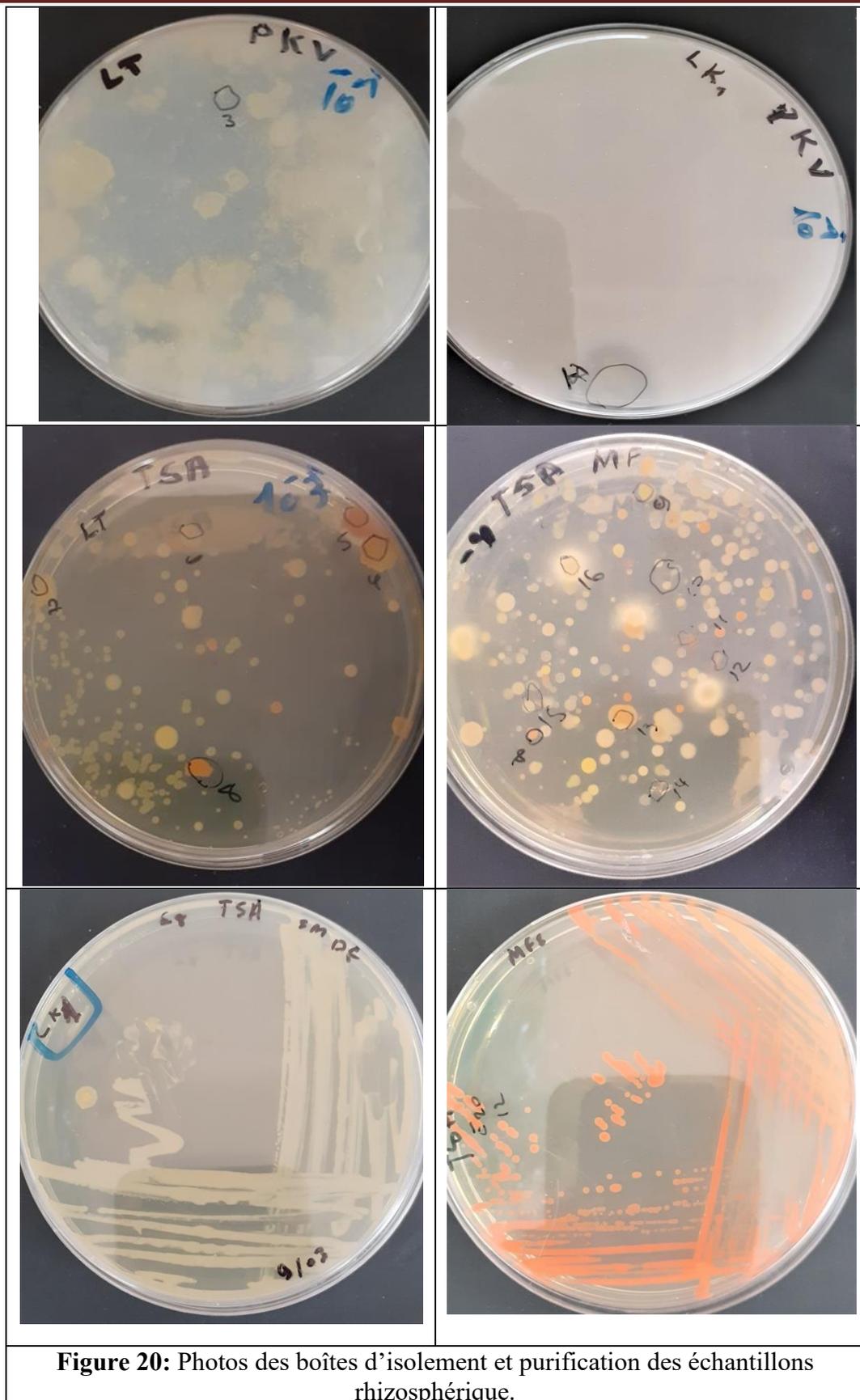


Figure 20: Photos des boîtes d'isolement et purification des échantillons rhizosphérique.

III.2. Caractérisation morphologique et biochimique des isolats bactériens

Les tests effectués sont basés soit sur les critères classiques ou traditionnels utilisés dans les schémas d'identification pratiqués dans la plupart des laboratoires de microbiologie (Denis *et al.*, 2007).

Après la sélection des colonies, la majorité des isolats obtenus ont subi une description macroscopique des colonies et une identification microscopique avec et sans coloration de Gram.

Ces observations nous ont permis de déterminer des caractéristiques selon la couleur, la consistance, la forme des cellules et le Gram. Les caractéristiques des souches isolées sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau I: Observation macroscopique des souches rhizobactériennes isolées.

Bactéries	Forme	Conteur	Taille	Surface	Couleur	Opacité
MF2	Irrégulier	Irrégulier	1cm	Rugueuse sèche	Blanc	Opaque
MF5	Ronde	Régulier	1mm	Lisse	Orange	Translucide
MF10	Ronde	Régulier	8mm	Rugueuse sèche	Blanc	Translucide
US1	Ronde	Régulier	0,4mm	Lisse	Beige	Opaque
US4	Ronde	Irrégulier	0,8mm	Lisse	Blanc	Opaque
US8	Ronde	Régulier	0,5mm	Lisse	Blanc	Opaque
LK1	Ronde	Irrégulier	2,5mm	Lisse	Jaune	Opaque
LK5	Ronde	Régulier	2 mm	Lisse	Maron	Opaque
LK4	Ronde	Régulier	3mm	Lisse	Beige	Opaque
LT1	Ronde	Régulier	3mm	Lisse	Blanc	Opaque

III.2.1. Examen microscopique

L'observation au microscope optique des frottis est révélée après la coloration de Gram. La coloration de Gram nous a permis de différencier les bactéries d'après leur forme (bacille, coccobacille et coque), et leur affinité pour les colorants, les bactéries à Gram positif se caractérisent par une couleur violette.

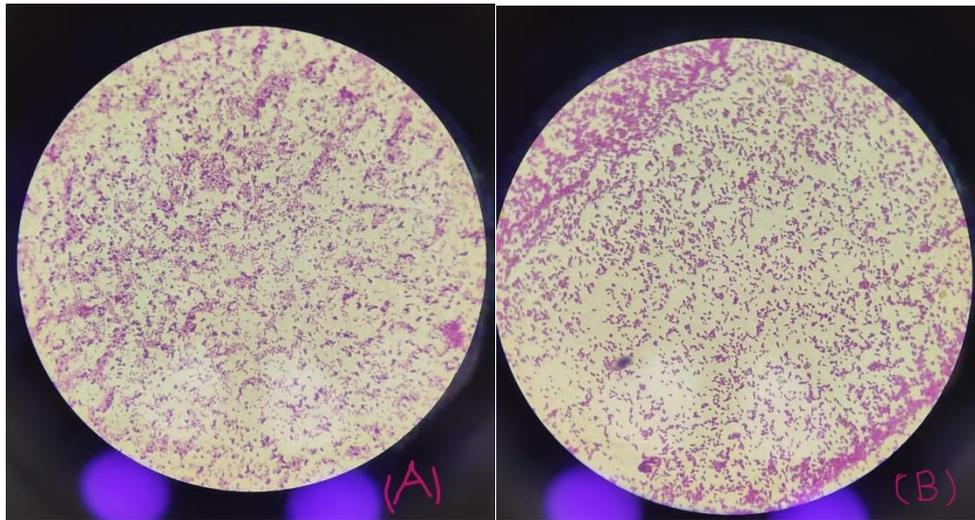


Figure 21: Coloration de Gram. Gram positif (A)(US1), Gram négatif (B)(LK5). G X100

III.2.2. Test de la catalase

La formation de bulles d'oxygène est observable si la bactérie possède une catalase (test positif), la formation de très peu de bulles ou bien leur est observable si la bactérie ne possède pas une catalase (test négatif). La Figure 22 présente une réponse nettement positive à ce test, puisque des bulles d'air sont observables dans la goutte de peroxyde ajoutée.



Figure 22: Réaction de la catalase positive.

III.2.3. Test d'oxydase

Le terme d'oxydase désigne une enzyme recherchée en bactériologie systématique, le résultat montre de ce test nos isolats bactériens sur les dans le Tableau II. L'oxydase est l'un des critères les plus employés pour l'identification des bactéries, qui présente une coloration violette de la colonie à Gram négatif (Bendoukhane et Djafer, 2016).

Tableau II: Observation microscopique des souches rhizobactériennes isolées

souches			
LK1	Gram -	Catalase -	Oxydase -
LK4	Gram -	Catalase -	Oxydase -
LK5	Gram -	Catalase +	Oxydase -
MF2	Gram -	Catalase +	Oxydase -
MF5	Gram +	Catalase +	Oxydase -
MF10	Gram -	Catalase -	Oxydase -
US1	Gram +	Catalase +	Oxydase -
US8	Gram +	Catalase +	Oxydase -
US9	Gram -	Catalase -	Oxydase -
US4	Gram +	Catalase +	Oxydase -
LT1	Gram +	Catalase +	Oxydase -
MF4	Gram+	Catalase+	Oxydase -

IV- Confirmation de la non-pathogénicité

Les résultats de la confirmation de la non-pathogénicité des souches bactériennes sont présentés dans le Tableau III. Toutes les souches sont non productrices de coagulase. La souche Mf4 qui présente une activité hémolytique cependant le reste des souches n'avait aucune activité hémolytique (Figure 23).

Tableau III : Tests de la production de coagulase et l'hémolyse des souches isolées.

Souches	Test coagulase	Test d'hémolyse
LT1	-	-
LK1	-	-
LK4	-	-
LK5	-	-
MF2	-	-
MF4	-	+
MF5	-	-
MF10	-	-
US1	-	-
US4	-	-
US8	-	-
US9	-	-

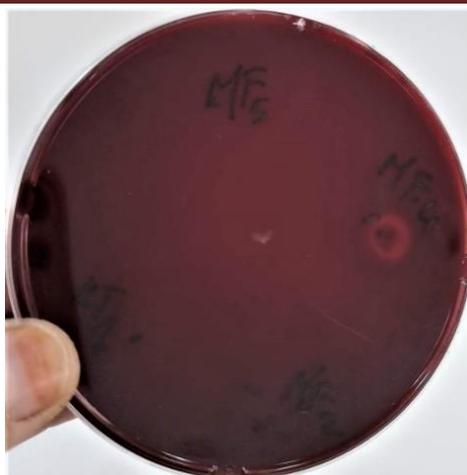


Figure 23: Réaction de test d'hémolyse.

V. Screening des traits PGP et activités enzymatiques

Les réponses des isolats bactériens aux différents tests essentiels à la promotion de la croissance végétale permettent la mise en évidence des potentialités naturelles de chaque souche. Pour cet objectif, 55 isolats bactériens ont été testés *in vitro* pour leurs caractéristiques favorisant la croissance des plantes comme la production d'ammoniac, la solubilisation du phosphate inorganique, la solubilisation de potassium ainsi que la production des enzymes. Les résultats sont présentés dans le Tableau IV.

V.1 Traits PGP des bactéries

V.1.1. Fixation de l'azote atmosphérique

Résultats obtenus dans cette expérience que la majorité des isolats bactériens étaient capables de fixer l'azote atmosphérique (Figure 24). Ces résultats sont en accord avec les travaux de **Aouane et Hamani (2017)**.

Les études ont confirmé que les effets de stimulation de plantes par les PGPR sont liés essentiellement à leur capacité à fixer l'azote (**Vessy, 2003**).

Pseudomonas et *Bacillus* que sont les souches bactériennes fixatrices d'azote telles que présentent un grand intérêt dans le domaine de la fixation d'azote (**Cakmakci et al., 2007**) et Ils ont formulation biologique sont utilisées comme biofertilisants pour un meilleur rendement et une meilleure culture.

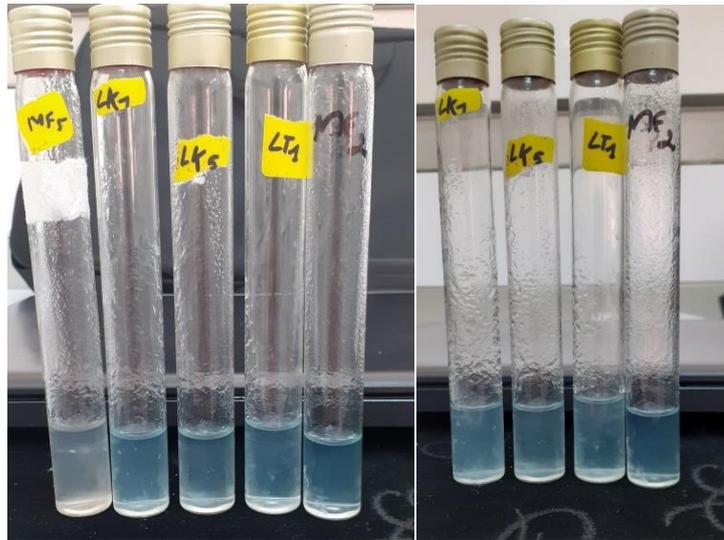


Figure 24: Fixation de l'azote sur un milieu semi-solide NFb

1.2. Solubilisation des phosphates inorganiques

Le milieu de criblage PVK utilise une forme insoluble de phosphate inorganique et sélectionne les microorganismes qui peuvent produire des zones claires autour des colonies. Les bactéries ont formé une zone de dégagement autour des colonies après 7 jours d'incubation, indiquant l'achèvement de la solubilisation du phosphate. Le résultat de la présente étude est conforme à ceux de **Gaur (1990)** et **Khan et al. (2005)**, qui ont également rapporté que seules les bactéries solubilisant les phosphates sont capables de créer des zones d'éclaircissement dans un milieu contenant du phosphate. Une solubilisation maximale a été détectée chez les isolats MF4, MF2, MF5, LK1, LK5, US1, US8 et US9, ce qui montre leurs potentiels et efficacités dans la solubilisation des phosphates (Figure 25). Les espèces de *Bacillus* sont parmi les communautés bactériennes les plus performantes dans la solubilisation des phosphates (**Illmer et Schinner, 1992 ; Wani et al., 2007**).



Figure 25: Solubilisation de phosphates par les souches rhizosphériques cultivées.

1.3. Solubilisation du potassium

D'après les résultats obtenus, le nombre des isolats qui ont manifesté un halo clair autour des colonies cultivé sur le milieu Aleksandrov, que sont parmi les principaux nutriments qui jouent un rôle important dans la croissance et le développement des plantes en particulier dans la rhizosphère est important (Mohammadi et Sohrabi, 2012).

Les résultats de la solubilisation du potassium sont montrés dans la Figure 26.

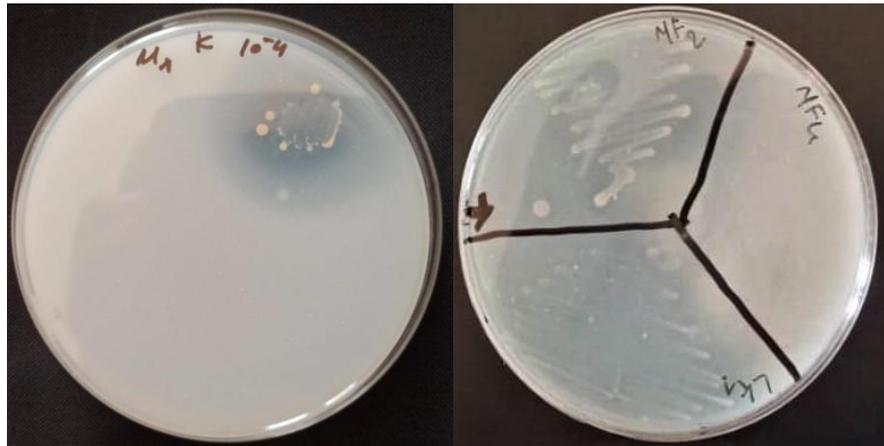


Figure 26 : Solubilisation du potassium par les souches rhizosphériques cultivées

1.4. Production d'ammoniac

D'après les résultats obtenus, les souches isolés présentent une production de NH_3 avec développement d'une couleur jaune à orange après addition du réactif de Nessler (Figure 27) Alors, nos bactéries sont productrices d'ammoniac (Annexe 06). La production d'ammoniac est l'un des traits de promotion indirecte de la croissance des plantes. En effet, NH_3 c'est l'une des caractéristiques les plus importantes des rhizobactéries qui contribue à la croissance des plantes (Josephe *et al.*, 2007).

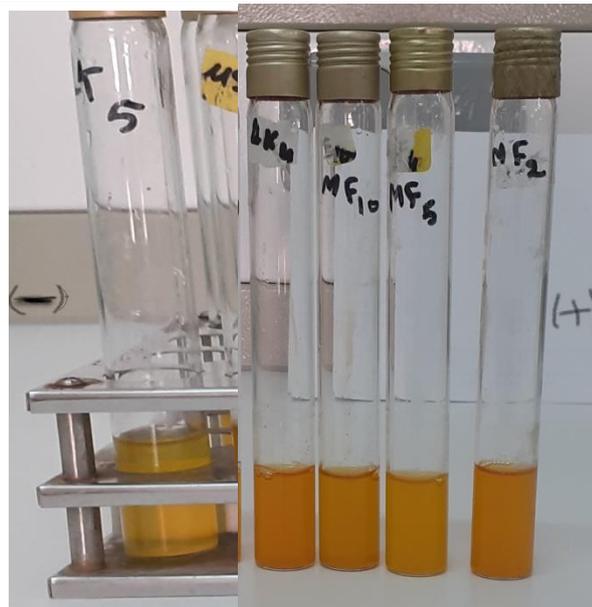


Figure 27: Résultat positif et négative de la production de NH_3 par les rhizobactéries dans de l'eau peptonée.

2. Activité enzymatique

Les souches ont été testées pour leurs capacités à produire des enzymes telles que les cellulases et protéases.

2.1. Activité cellulolytique

L'activité cellulolytique des bactéries a été révélée dans 12 souches. Les souches bactériennes ont été inoculées sur un milieu solide basal complété par de la Carboxy Méthyl Cellulose comme seule source de carbone. Nos souches se sont révélées négatives pour l'activité cellulolytique.

2.3. Activité protéasique

Les résultats montrent qu'environ 50% de nos souches bactériennes sont productrices des protéases est révélée par la détection de zone d'hydrolyse (Figure 28). Par exemple, les bactéries de genres *Bacillus* et *Pseudomonas* sont connues pour leurs activités protéasique (Ayantnij *et al.*, 2020 ; Nanuny *et al.*, 2021).



Figure 28: Vérification des activités protéasique des souches (A et B) rhizosphériques isolées sur milieux de cultures.

Tableau IV: Traits PGP et activités des enzymes lytiques des souches.

Les souches	Traits PGP				Activité enzymatique Protéase
	Fixation de N ₂	Solubilisation du phosphate	solubilisation du potassium	Production d'ammoniac	
LT1	+	+	+	+	-
US1	-	+	+	-	-
US4	-	-	+	+	-
US8	-	+	+	+	-
US9	-	+	-	+	-
LK1	+	+	+	+	+
LK5	-	+	+	-	+
LK4	-	-	+	-	-
MF2	-	+	+	+	+
MF5	-	+	-	+	+
MF10	+	+	-	-	+
MF4	-	+	-	-	+

V. Screening *in vivo* des souches

On constate que les souches LT1, US4, US8, LK1 et MF2 ont un effet de solubilisation de phosphore et potassium. Ces souches ont montré aussi une amélioration de la germination de la tomate et l'orge après 10 jours de culture.



Figure 29: Aspects morphologiques des plantules d’orge après dix jours de semis.



Figure 30: Aspects morphologiques des plantules de la tomate après dix jours de semis.

Conclusion

Conclusion

Conclusion

Les plantes sont liées aux bactéries dans une relation de coopération appelée Green Root Association, où certaines bactéries favorisent la croissance des plantes et augmentent leur résistance aux conditions difficiles. Ces bactéries se trouvent généralement dans certaines espèces de plantes désertiques spontanées. Cette recherche vise à étudier cette association racinaire et à déterminer les bactéries responsables de la promotion de la croissance et de l'augmentation de la résistance des plantes.

Dans cette étude, nous avons mis en évidence la diversité bactérienne dans la rhizosphère des plantes *Anvillea radiata* L. (Noug), *Helianthemum lippii* L. ((Rguig), *Cleome arabica* L. (Netil), *Fagonia glutinosa* Del. (Cherrik) et *Moricandia suffruticosa* (Krombe). Ainsi, leurs capacités à promouvoir la croissance des plantes par divers mécanismes tels que à fixer l'azote atmosphérique et de solubiliser les phosphates et le potassium à des taux très élevés.

Cette étude pourrait conduire au développement de nouvelles techniques agricoles utilisant ces bactéries pour améliorer la production alimentaire dans les zones désertiques exposées à des conditions météorologiques difficiles et des défenses naturelles des plantes dont la finalité est de réduire l'application de produits phytosanitaires. Ces souches, peuvent donc être plus en profondeur étudiées et valorisées, afin d'être utilisées en agriculture et en biotechnologie.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Références Bibliographiques :

- ABDELKRIM, S. (2018).** Spécialité Sciences de la Production Végétale.
- Ahemad, M., & Kibret, M. (2014).** Mechanisms and applications of plant growth promoting rhizobacteria: current perspective. *Journal of King saud University-science*, 26(1), 1-20.
- Alabouvette, C., & Cordier, C. (2018).** Fertilité biologique des sols: des microorganismes utiles à la croissance des plantes. *Innovations Agronomiques*, 69, np.
- Alori, E. T., Glick, B. R., & Babalola, O. O. (2017).** Microbial phosphorus solubilization and its potential for use in sustainable agriculture. *Frontiers in microbiology*, 8, 971.
- AOUANE Maroua , H. H. (2017).** *Etude des PGPR "Plant Growth Promoting Rhizobacteria" des plantes actinorhiziennes :cas de Casuarina equisetifolia et d'Elaeagnus angustifolia.* Université des Frères Mentouri Constantine
- Arora, N. K., Tewari, S., & Singh, R. (2013).** Multifaceted plant-associated microbes and their mechanisms diminish the concept of direct and indirect PGPRs. *Plant microbe symbiosis: Fundamentals and advances*, 411-449.
- AYA, L. A. e. K. (2021).** *Caractérisation de quelques modes d'action des PGPR chezdes souches isolées des deux régions de la wilaya deConstantine.* Université des Frères Mentouri Constantine 1
- BAHLOULI Farida Lamia, H. Z. (2021).** *Rôles et effets bénéfiques des microorganismes PGPR.*
- Bakker, A. W., & Schippers, B. (1987).** Microbial cyanide production in the rhizosphere in relation to potato yield reduction and Pseudomonas spp-mediated plant growth-stimulation. *Soil Biology and Biochemistry*, 19(4), 451-457.
- Bano, S. A., & Iqbal, S. M. (2016).** Biological nitrogen fixation to improve plant growth and productivity. *Int. J. Agric. Innov. Res*, 4, 597-599.
- Barea, J. M., Azcón, R., & Azcón-Aguilar, C. (2005).** Interactions between mycorrhizal fungi and bacteria to improve plant nutrient cycling and soil structure. *Microorganisms in soils: roles in genesis and functions*, 195-212.
- Barka, E. A., Vatsa, P., Sanchez, L., Gaveau-Vaillant, N., Jacquard, C., Klenk, H.-P., . . . van Wezel, G. P. (2016).** Taxonomy, physiology, and natural products of Actinobacteria. *Microbiology and molecular biology reviews*, 80(1), 1-43.
- Bazot, S. (2005).** *Contribution à l'étude de l'allocation des photoassimilats récents dans la plante et la rhizosphère chez une graminée pérenne (Lolium perenne L.).* INPL-Institut National Polytechnique de Lorraine,
- Bedgood, S. A., Mastroni, S. E., & Bracken, M. E. (2020).** Flexibility of nutritional strategies within a mutualism: food availability affects algal symbiont productivity in two congeneric sea anemone species. *Proceedings of the Royal Society B*, 287(1940), 20201860.
- Beeckman, F., Motte, H., & Beeckman, T. (2018).** Nitrification in agricultural soils: impact, actors and mitigation. *Current opinion in Biotechnology*, 50, 166-173.
- Belkadi, Z., & Koliai, Y. (2016).** *Isolement de bactéries rhizosphériques à activité antagoniste et essai dans le biocontrôle de Botrytis cinerea sur la tomate.* Université Mouloud Mammeri,
- BENDJIDA, H., & AOUADI, S. (2019).** Effet promoteur des bactéries PGPR sur la croissance de la fève (vicia faba L).
- Benhacene Zahra, M. I. (2016).** *Évaluation et taxonomie numérique des bactéries promotrices des pOlantes isolées de rhizosphère du Capsicum annum.*
- Bertrand, J.-C., Caumette, P., Lebaron, P., Matheron, R., & Normand, P. (2011).** *Ecologie microbienne.* In: Presses Universitaires de Pau et des Pays de l'Adour.
- BOUACID, S. (2011).** *Exploitation des potentialités bénéfiques des rhizobactéries (groupe Pseudomonas fluorescens) dans la phytostimulation et la protection de l'orge.* ENSA,
- Bourles, A. (2019).** *Les rhizobactéries des sols ultramafiqes de Nouvelle-Calédonie: Caractérisation, rôle dans l'adaptation des plantes à la contrainte édaphique et interaction avec les champignons mycorhiziens à arbuscules.* Nouvelle Calédonie,

Références bibliographiques

- Bresson, J. (2013).** *Interaction plante-microorganismes: Implication de la rhizobactérie *Phyllobacterium brassicacearum* dans les réponses d'*Arabidopsis thaliana* au stress hydrique.* Université Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc,
- Bürgmann, H., Widmer, F., Von Sigler, W., & Zeyer, J. (2004).** New molecular screening tools for analysis of free-living diazotrophs in soil. *Applied and Environmental Microbiology*, 70(1), 240-247.
- Çakmakçı, R., Turan, M., Kıtır, N., Güneş, A., Nikerel, E., Özdemir, B. S., . . . Tüfenkçi, Ş. (2017).** The role of soil beneficial bacteria in wheat production: a review. *Wheat improvement, management and utilization*, 24, 115-149.
- Compant S, Duffy B, Nowak J, Clément C, Barka EA. (2005)** .Use of plant growth-promoting bacteria for biocontrol of plant diseases: principles, mechanisms of action, and future prospects. *Appl Environ Microbiol.* 71(9):4951-9
- CHEREIT, A. (2020).** Les effets des PGPR sur la croissance des plantes.
- Cherif, H. (2018).** *Amélioration de la croissance du blé dur en milieu salin par inoculation avec *Bacillus sp.* et *Pantoea agglomerans* isolées de sols.*
- Defago, G., & Haas, D. (1990).** Pseudomonads as antagonists of soilborne plant pathogens: modes of action and genetic analysis. *Soil Biochem*, 6(49), 291.
- Elhaisoufi, W., Ghoulam, C., Barakat, A., Zeroual, Y., & Bargaz, A. (2022).** Phosphate bacterial solubilization: A key rhizosphere driving force enabling higher P use efficiency and crop productivity. *Journal of Advanced Research*, 38, 13-28.
- Elhouda, k. K. N., & Rim, R. (2021).** *Synthèse sur les interactions plantes PGPB / PGPR en Algérie.* Université de Ghardaïa, Figueiredo, M. d. V. B., Seldin, L., de Araujo, F. F., & Mariano, R. d. L. R. (2011). Plant growth promoting rhizobacteria: fundamentals and applications. *Plant growth and health promoting bacteria*, 21-43.
- Gagne, S., Antoun, H., & Richard, C. (1985).** Inhibition de champignons phytopathogènes par des bactéries isolées du sol et de la rhizosphère de légumineuses. *Canadian Journal of Microbiology*, 31(9), 856-860.
- García-Fraile, P., Menéndez, E., & Rivas, R. (2015).** Role of bacterial biofertilizers in agriculture and forestry. *Aims Bioengineering*, 2(3), 183-205.
- Glick, B. R., & Gamalero, E. (2021).** Recent developments in the study of plant microbiomes. *Microorganisms*, 9(7), 1533.
- Glick, B. R., Karaturovic, D. M., Newell, P. C. (1995):** A Novel Procedure for Rapid Isolation of Plant Growth Promoting Pseudomonads. – *Canadian Journal of Microbiology* 41: 533-536.
- Govindasamy, V., Senthilkumar, M., Magheshwaran, V., Kumar, U., Bose, P., Sharma, V., & Annapurna, K. (2011).** *Bacillus* and *Paenibacillus* spp.: potential PGPR for sustainable agriculture. *Plant growth and health promoting bacteria*, 333-364.
- Hakim, S., Naqqash, T., Nawaz, M. S., Laraib, I., Siddique, M. J., Zia, R., . . . Imran, A. (2021).** Rhizosphere engineering with plant growth-promoting microorganisms for agriculture and ecological sustainability. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 617157.
- Hallmann, J., Quadt-Hallmann, A., Mahaffee, W., & Kloepper, J. (1997).** Bacterial endophytes in agricultural crops. *Canadian Journal of Microbiology*, 43(10), 895-914.
- Hinsinger, P., Gobran, G. R., Gregory, P. J., & Wenzel, W. W. (2005).** Rhizosphere geometry and heterogeneity arising from root-mediated physical and chemical processes. *New Phytologist*, 168(2), 293-303.
- Hugenholtz, P. (2002).** Exploring prokaryotic diversity in the genomic era. *Genome biology*, 3, 1-8.
- Jourdan, E., Ongena, M., & Thonart, P. (2008).** Caractéristiques moléculaires de l'immunité des plantes induite par les rhizobactéries non pathogènes. *BASE*.
- Karima, A. (2018).** *Caractérisation de quelques modes d'action des PGPR chez 30 souches bactériennes isolées de la rhizosphère et le rhizoplan du blé dur.* Université des Frères Mentouri Constantine p74.

Références bibliographiques

- Kim, J., & Rees, D. C. (1994).** Nitrogenase and biological nitrogen fixation. *Biochemistry*, 33(2), 389-397.
- KIRDI, B. (2011).** *Rôle des PGPR «Plant Growth Promoting Rhizobacteria» dans la croissance végétale et la lutte contre les phanérogames parasites.*
- Kloepper, J. W., Rodríguez-Kábana, R., McINROY, J. A., & Young, R. W. (1992).** Rhizosphere bacteria antagonistic to soybean cyst (*Heterodera glycines*) and root-knot (*Meloidogyne incognita*) nematodes: identification by fatty acid analysis and frequency of biological control activity. *Plant and soil*, 139, 75-84.
- Kumar, P., & Dubey, R. (2012).** Plant growth promoting rhizobacteria for biocontrol of phytopathogens and yield enhancement of *Phaseolus vulgaris*. *J Curr Pers Appl Microbiol*, 1(6), 38.
- Ladau, J., & Eloe-Fadrosh, E. A. (2019).** Spatial, temporal, and phylogenetic scales of microbial ecology. *Trends in Microbiology*, 27(8), 662-669.
- LARADJ ZAZOU, K. (2017).** *Isolement et caractérisation des rhizobactéries promotrices de la croissance des plantes capables de lutter contre le Fusarium.*
- Larsbrink, J., & McKee, L. S. (2020).** Bacteroidetes bacteria in the soil: Glycan acquisition, enzyme secretion, and gliding motility. *Advances in applied microbiology*, 110, 63-98.
- Lemanceau, P. (1992).** Effets bénéfiques de rhizobactéries sur les plantes: exemple des *Pseudomonas* spp fluorescents. *Agronomie*, 12(6), 413-437.
- Ling, N., Wang, T., & Kuzyakov, Y. (2022).** Rhizosphere bacteriome structure and functions. *Nature communications*, 13(1), 836.
- Madjida, B. (2022).** *PGPR et leur action sur les mécanismes de tolérance au stress abiotiques.* university center of abdalhafid boussouf-MILA,
- Mathur, V., & Ulanova, D. (2022).** Microbial metabolites beneficial to plant hosts across ecosystems. *Microbial Ecology*, 1-24.
- Meyer, S., Reeb, C., & Bosdeveix, R. (2019).** *Botanique. Biologie et physiologie végétales:* Maloine.
- MOHAMED AZIZI Bassair, A., & LAKHDAR, F. Z. (2022).** PGPR: outils microbiologiques potentiellement promotrices de la croissance des plantes aux vertus médicinales, cas de Cresson (*Lepidium sativum*). In.
- Morgan J. A. W., Bending G. D. and White P. J. (2005).** Biological costs and benefits to plant-microbe interactions in the rhizosphere. *Journal of Experimental Botany*.56 : 1729-1739.
- Mohamedatni Sana Chikhaoui Mounya, B. S. (2018).** Effet des bactéries productrices de l'indole 3-acétique acide et de leur extrait sur la croissance des plantes.
- Moulin, L., Munive, A., Dreyfus, B., & Boivin-Masson, C. (2001).** Nodulation of legumes by members of the β -subclass of Proteobacteria. *Nature*, 411(6840), 948-950.
- Nabti, E., Adjaoute, L., & Adouane, H. (2018).** Isolement de bactéries telluriques «PGPR» productrices de substances antifongiques et stimulatrices de la croissance des plantes.
- Nada, A. F. B. (2021).** *Effet de l'inoculation de bactéries rhizosphériques sur la promotion de la croissance de la lentille (Lens culinaris) en culture hydroponique.* Université des Frères Mentouri Constantine 1,
- Nadeem, S. M., Naveed, M., Zahir, Z. A., & Asghar, H. N. (2013).** Plant-microbe interactions for sustainable agriculture: fundamentals and recent advances. *Plant microbe symbiosis: Fundamentals and advances*, 51-103.
- Naidji Mériem, B. I. (2020).** *Les bactéries rhizosphériques: Méthodes d'isolement, d'identification et d'étude de leurs activités enzymatiques.*
- Nasution, R. A., Tangapo, A. M., Taufik, I., & Aditiawati, P. (2017).** Comparison of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) diversity and dynamics during growth of Cilembu sweet potato (*Ipomoea batatas* L var. Rancing) in Cilembu and Jatinangor Site, Indonesia. *J. Pure Appl. Microbiol*, 11(2), 837-845.
- Norini, M.-P. (2007).** *Ecodynamique des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) et des communautés microbiennes dans des sols à pollution mixte (HAP, métaux) avant et après*

Références bibliographiques

- traitement par biopile et par désorption thermique: influence de la rhizosphère et de la mycorhization.* Université Henri Poincaré-Nancy 1,
- Parmar, P., & Sindhu, S. (2013).** Potassium solubilization by rhizosphere bacteria: influence of nutritional and environmental conditions. *J Microbiol Res*, 3(1), 25-31.
- Pettersson, M., & Bååth, E. (2004).** Effects of the properties of the bacterial community on pH adaptation during recolonisation of a humus soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 36(9), 1383-1388.
- Pini, F., Galardini, M., Bazzicalupo, M., & Mengoni, A. (2011).** Plant-bacteria association and symbiosis: are there common genomic traits in Alphaproteobacteria? *Genes*, 2(4), 1017-1032.
- Raafat, D., & Sahl, H. G. (2009).** Chitosan and its antimicrobial potential—a critical literature survey. *Microbial biotechnology*, 2(2), 186-201.
- Ramamoorthy, V., Viswanathan, R., Raguchander, T., Prakasam, V., & Samiyappan, R. (2001).** Induction of systemic resistance by plant growth promoting rhizobacteria in crop plants against pests and diseases. *Crop protection*, 20(1), 1-11.
- Rangin, C., Brunel, B., Cleyet-Marel, J.-C., Perrineau, M.-M., & Béna, G. (2008).** Effects of *Medicago truncatula* genetic diversity, rhizobial competition, and strain effectiveness on the diversity of a natural *Sinorhizobium* species community. *Applied and Environmental Microbiology*, 74(18), 5653-5661.
- Shaharouna, B., Arshad, M., Zahir, Z. A., Khalid, A. (2006):** Performance of *Pseudomonas* spp. Containing ACC-deaminase for Improving Growth and Yield of Maize (*Zea mays* L.)
- Sivasakthi, S., Usharani, G., & Saranraj, P. (2014).** Biocontrol potentiality of plant growth promoting bacteria (PGPR)-*Pseudomonas fluorescens* and *Bacillus subtilis*: a review. *African journal of agricultural research*, 9(16), 1265-1277.
- Soufiane, B. (1999).** *Isolement à partir de la rhizosphère des conifères de bactéries et d'actinomycètes antagonistes aux champignons phytopathogènes*: National Library of Canada= Bibliothèque nationale du Canada, Ottawa.
- Souza, R. d., Ambrosini, A., & Passaglia, L. M. (2015).** Plant growth-promoting bacteria as inoculants in agricultural soils. *Genetics and molecular biology*, 38, 401-419.
- Sturz, A., & Christie, B. (2003).** Beneficial microbial allelopathies in the root zone: the management of soil quality and plant disease with rhizobacteria. *Soil and Tillage Research*, 72(2), 107-123.
- Suslow, T. (1982).** Role of root-colonizing bacteria in plant growth. *Phytopathogenic prokaryotes*, 1, 187-223.
- Thomas, F., Hehemann, J.-H., Rebuffet, E., Czjzek, M., & Michel, G. (2011).** Environmental and gut bacteroidetes: the food connection. *Frontiers in microbiology*, 2, 93.
- Timmusk, S., Behers, L., Muthoni, J., Muraya, A., & Aronsson, A.-C. (2017).** Perspectives and challenges of microbial application for crop improvement. *Frontiers in plant science*, 8, 49.
- Toledo, I., Lloret, L., & Martínez-Romero, E. (2003).** *Sinorhizobium americanus* sp. nov., a new *Sinorhizobium* species nodulating native *Acacia* spp. in Mexico. *Systematic and Applied Microbiology*, 26(1), 54-64.
- Tsavkelova, E., Klimova, S. Y., Cherdyntseva, T., & Netrusov, A. (2006).** Microbial producers of plant growth stimulators and their practical use: a review. *Applied biochemistry and microbiology*, 42, 117-126.
- Ventura, M., Canchaya, C., Tauch, A., Chandra, G., Fitzgerald, G. F., Chater, K. F., & van Sinderen, D. (2007).** Genomics of Actinobacteria: tracing the evolutionary history of an ancient phylum. *Microbiology and molecular biology reviews*, 71(3), 495-548.
- Verma, R., & Melcher, U. (2012).** *A Support Vector Machine based method to distinguish proteobacterial proteins from eukaryotic plant proteins.* Paper presented at the BMC bioinformatics.
- York L., Carminati A., Mooney S., Ritz K and Bennett M. , 2016.** The holistic rhizosphere: integrating zones, processes, and semantics in the soil influenced by roots, *Journal of Experimental Botany*, N12, Volume 67, 3629–3643.

Références bibliographiques

- Weller, D. M. (1988).** Biological control of soilborne plant pathogens in the rhizosphere with bacteria. *Annual review of phytopathology*, 26(1), 379-407.
- Weller, D. M., Raaijmakers, J. M., Gardener, B. B. M., & Thomashow, L. S. (2002).** Microbial populations responsible for specific soil suppressiveness to plant pathogens. *Annual review of phytopathology*, 40(1), 309-348.
- Whitman WB, Coleman DC, Wiebe WJ (1998)** Prokaryotes: the unseen majority. *Proc Natl*
- Zamoum, M., Goudjal, Y., Sabaou, N., Barakate, M., Mathieu, F., & Zitouni, A. (2015).** Biocontrol capacities and plant growth-promoting traits of endophytic actinobacteria isolated from native plants of Algerian Sahara. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 122, 215-223.

Annexes

Annexes

Tableau I : Taux de germination des grains à (10j) des souches rhizobactériennes bactériennes isolé

		tige				Racine				taux de germination				
		1	2	3		1	2	3						
tomate	LK1	4.3	5.95	2.7	4.08	1.54	2.75	8	1.69	50%	80%	50%	60%	/
	LK5	6.19	4.95	5.75	5.63	1.56	3.16	3.42	2.71	80%	60%	60%	66.7%	53.3%
	US8	5.03	3.25	/	4.14	1.54	1.79	/	1.66	65%	60%	/	62.5%	/
	MF10	4.73	5.38	4.92	5.01	2.03	2.77	3.42	3.42	75%	85%	70%	76.7%	/
	US9	3.9	2.7	3.93	3.54	2.86	2	1.92	2.26	90%	45%	70%	68.3%	/
	LT1	2.66	4.57	3.33	3.52	1.16	1.36	1.66	1.39	45%	70%	45%	53.3%	42.66%
	MF4	4.54	5.54	3.4	4.49	2.69	3.04	3	2.91	65%	60%	25%	50%	/
l'orge	US9	5.11	4.38	5.33	4.94	4.4	2.31	4.43	3.71	36%	52%	60%	/	49.3%
	MF4	5.4	9.8	5.07	6.75	4.54	5.7	2.28	4.17	44%	20%	28%	/	30.6%
	MF2	8.4	10.3	6.31	8.3	6.31	5.7	3.75	5.25	32%	36%	32%	/	33.3%
	LK5	6.06	7.33	5.9	6.43	3.12	5.16	4.1	4.12	32%	36%	40%	/	36%
	US8	5.02	5.62	5.76	5.64	3.8	4.4	4.9	4.36	68%	68%	68%	68%	/
	LK4	4.7	5	8.9	6.2	2.6	5.6	8.09	5.23	12%	12%	44%	22.6%	/
	MF5	1.7	11.9	4.7	6.08	0.5	5.9	1.16	2.5	12%	32%	12%	18.6%	/
	ME10	7.1	4.9	10	7.33	7	4.5	5.85	5.8	24%	16%	28%	22.6%	/
	US1	9.08	6.5	6.9	7.5	6.4	4.8	3.2	4.8	48%	40%	20%	36%	/
	LT1	5.67	5.71	5.08	5.5	4.6	3.25	4.16	2.61	68%	56%	24%	49.3%	/
US4	6.6	7.45	4.5	6.18	5.25	7.18	3.68	5.37	24%	44%	84%	50.6%	/	

Annexes

Tableau II: Taux de germination des grains à (15j) des souches rhizobactériennes bactériennes isolé

	Les souches	Tige				Racine				Taux de gemination				Poids frais	Poids sec
		1	2	3		1	2	3							
l'orge	US9	6	7.5	7.70	7.16	2.67	2.62	5.6	3.61	92%	84%	92%	89.3%	1.04	0.22
	MF4	7.97	6.18	6.7	6.96	4.6	4.08	2.15	3.6	96%	96%	84%	92%	1.05	0.18
	MF2	8.5	6.72	5.6	6.94	6.5	3.92	3.7	4.7	64%	88%	80%	77.3%	0.68	0.22
	LK5	6.77	7.9	6.1	6.81	3.02	4.23	3.58	3.6	80%	96%	100%	92%	0.90	0.25
	US8	7.1	8.53	7.19	7.6	4.3	3.64	4.7	4.2	80%	92%	76%	82.6%	0.90	0.26
	LK4	6.21	3.70	6.86	5.4	3.8	3.42	5.47	4.77	68%	96%	96%	86.6%	0.78	0.22
	MF5	4.37	8.3	/	6.33	1.57	5.9	1.16	2.5	12%	44%	/	30%	0.36	0.21
	ME10	6.81	4.9	11.1	7.6	3.78	3.6	6.18	4.5	72%	80%	44%	65%	0.96	0.19
	US1	11.3	6.44	6.59	8.11	2.9	3.33	3.54	3.25	72%	100%	88%	86.6%	1.17	0.35
	LT1	6.1	8.3	/	9.09	4.47	4.79		4.63	88%	76%	/	82%	1.16	0.14
	US4	5.33	10.5	10	8.1	2.66	6.01	3.6	2.85	96%	84%	80%	86.6%	1.23	0.25
	control	5.65	7.3	5.78	6.3	4.7	2.93	4.2	3.9	96%	96%	84	92%	1.15	0.26

Annexes

Tableau III: Taux de germination des grains des souches rhizobactériennes bactériennes isolée

Les souches	Longueur des tiges			Moyen longueur tiges	Longueur des racines			Moyen longueur racines	Taux de germination			Moyen de taux de germination	Poids frais			Moyen poids frais	Poids sec			Moyen poids sec
controle	5.65	7.3	5.81	6.3	4.7	2.93	4.2	3.9	96	96	84	92	1.00	1.20	1.27	1.15	0.26	0.27	0.25	0.26
Lt1	6.1	8.3	6.67	7.2	4.22	4.47	4.21	4.3	76	72	80	76	0.97	0.16	1.20	0.77	0.20	0.20	0.24	0.20
Lk1	9.21	8.98	/	9.09	4.47	4.79	/	4.63	88	76	/	82	1.29	1.03	/	1.16	0.26	0.24	0.22	0.24
Lk4	6.21	3.70	6.26	5.4	3.51	3.42	5.47	4.77	68	96	96	86	0.56	0.92	0.87	0.78	0.15	0.22	0.30	0.22
Lk5	6.77	7.9	6.1	6.81	3.02	4.23	3.58	3.6	80	96	100	92	0.82	1.18	0.78	0.92	0.26	0.28	0.21	0.25
Mf2	8.5	6.72	5.6	6.94	6.5	3.92	3.7	4.7	64	88	80	77.3	0.95	0.68	0.42	0.68	0.23	0.24	0.20	0.22
Mf4	7.97	6.18	6.71	6.96	4.6	4.08	2.15	3.6	96	96	84	92	1.10	0.92	1.14	1.05	0.1	0.27	0.23	0.20
Mf5	4.37	8.3	/	6.33	1.57	2.19	/	1.88	16	44	/	30	0.36	0.37	/	0.36	0.12	0.3	/	0.26
Mf10	6.81	4.9	11.1	7.6	3.78	3.6	6.18	4.5	72	80	44	65	1.01	0.56	1.32	0.96	0.20	0.22	0.17	0.17
Us1	11.3	6.44	6.59	8.11	2.9	3.33	3.54	3.25	72	100	88	86.6	1.16	1.17	1.18	1.17	0.26	0.29	0.52	0.35
Us4	5.33	10.5	10	8.61	2.66	6.1	3.6	2.89	96	84	80	86	0.83	1.66	1.22	1.23	0.18	0.34	0.24	0.25
Us8	7.1	8.53	7.19	7.6	4.3	3.64	4.7	4.2	80	92	76	82.6	0.43	1.09	1.18	0.90	0.24	0.71	0.23	0.39
Us9	6	7.5	7.7	7.16	2.67	2.62	5.6	3.61	92	84	92	89.3	0.76	1.15	1.21	1.04	0.17	0.21	0.29	0.22

Annexes

Composition des milieux de culture utilisés :

Gélose Tryptone-Soja (TSA) :

Tryptone (15 g)

peptone de soja (5 g)

NaCl (5 g)

Agar (18 g)

Eau distillée qsp. 1000 mL . pH 7,2.

Milieu Pikovskaya :

Glucose (10 g)

Ca₃(PO₄)₂ (5 g)

(NH₄)₂SO₄ (0,5 g)

NaCl (0,2 g),

MgSO₄•7H₂O (0,1 g),

KCl (0,2g)

Extrait de levure (0,5 g)

MnSO₄•H₂O (0,002 g)

FeSO₄•7H₂O (0,002 g)

Agar (18 g)

Eau distillée qsp. 1000 mL. pH 7,2.

Milieu Aleksandrov :

Glucose (5 g)

MgSO₄•7H₂O (0,5 g)

CaCO₃ (0,1 g)

FeCl₃ (0,006 g)

Ca₃(PO₄)₂ (2 g)

Poudre de mica (3 g)

Agar (18 g)

Eau distillée qsp. 1000 mL. pH 7,2.

Eau peptonée :

Peptone (10 g)

NaCl (5 g)

Eau distillée qsp 1000 mL. pH 7,2.

Skim Milk Agar :

Skim milk powder ou poudre de lait écrémé (28 g)

Hydrolysate de caséine (5 g)

Extrait de levure (2,5 g)

Dextrose (1 g)

Agar (18 g)

Eau distillée qsp. 1000 mL. pH 7,2.

Milieu minimal de Dworkin et Forster (DF) :

KH₂PO₄ (4 g)

Na₂HPO₄ (6 g)

MgSO₄•7H₂O (0,2 g)

FeSO₄•7H₂O (0,1 mg)

H₃BO₃ (0,10 µg)

MnSO₄ (10 µg)

ZnSO₄ (70 µg)

CuSO₄ (50 µg)

MoO₃ (10 µg)

Glucose (2 g)

Acide gluconique (2 g)

Acide citrique (2 g)

Agar (18 g)

Eau distillée qsp. 1000 mL. La quantité d'ACC ou (NH₄)₂SO₄, ajouté au milieu DF est 0,3033 g ou 2 g/L, respectivement. pH 7,2.

Annexes

Milieu semi-solide exempte d'azote :(nitrogen-free semi-solid medium, NFb) :

Acide malique (5 g)

KH_2PO_4 (0,5 g)

$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (0,2 g)

NaCl (0,1 g)

CaCl_2 (0,01 g)

4 mL Fe EDTA [1,64%] solution, 2 mL/L blue de bromothymol [0,5%], 2 mL/L solution de micronutriments [$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (0,2 g), $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (0,235g), H_3BO_3 (0,28 g), $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (0,008 g)].

Agar (1,75 g/L)

Eau distillée qsp. 1000 mL. pH 7,2

الملخص

في هذه الدراسة، تم عزل 77 بكتيريا من جذور خمسة نباتات تلقائية صحراوية في منطقة غرداية. تم فحص العزلات لمعرفة قدرتها على تثبيت نيتروجين الغلاف الجوي، لذوبان الفوسفات غير العضوي والبوتاسيوم وكذلك نشاط الأنزيمات المحللة. كشف التحديد العياني والمجهري وكذلك الاختبارات الكيميائية الحيوية للعزل عن هيمنة الأجناس *Bacillus* و *Pseudomonas*. تم فحص جميع العزلات لمعرفة قدرتها على تعزيز إنبات ونمو بذور الشعير والطماطم في المختبر. من هذا الاختبار، أظهرت السلالات MF2, LT1, MF5, MF4, LK4, MF10, LK1, LK5, US1, US4, US9, US8 قدرات PGP مثيرة للاهتمام وتم اختبار فعاليتها في تحسين إنبات ونمو الشعير (*Hordeum vulgare* L.) وبذور الطماطم (*Solanum lycopersicum*) في المختبر. تمت مراقبة الشتلات. أظهرت نتائج الاختبارات أن السلالات التالية، US4, US9, US8, MF10, LK1, US1، لديها فعالية في تحسين مظهر النبات من ناحية: طول الجذر و السيقان، الأوزان الطازجة والجافة.

الكلمات المفتاحية: بكتيريا، الريزوسفير، في المختبر، *Pseudomonas*، *Bacillus*، PGP.

Résumé

Dans la présente étude, 77 bactéries ont été isolées à partir des racines de cinq plantes spontanées sahariennes autochtones de la région de Ghardaïa.

Les isolats ont été criblés par rapport à leurs capacités à fixer l'azote atmosphérique, à solubiliser le phosphate inorganique et le potassium. L'identification macroscopique et microscopique ainsi que les tests biochimiques des isolats ont révélé la dominance des genres suivant *Bacillus* et *Pseudomonas*.

Tous les isolats ont été examinés pour leurs capacités à promouvoir la germination et croissance des graines de l'orge *in vitro*. A partir de ce test, les isolats (MF2, MF5, MF4, LK4, MF10, LK1, LK5, US1, US9 et US8) ont exprimé des capacités PGP intéressantes et ont été testés pour leur efficacité à améliorer la germination et la croissance des graines de l'orge (*Hordeum vulgare* L.) et de tomate (*Solanum lycopersicum*). Le taux de la germination, longueur des plantules et des racines et les poids frais et secs ont été suivis. L'observation globale des résultats révèle une amélioration de la croissance des plantules dans les conditions *in vitro* par rapport au contrôle. Ces résultats suggèrent que les bactéries rhizosphériques provenant de plantes naturelles dans des habitats arides constituent une source intéressante pour l'isolement de bactéries à potentiel PGP qui peuvent être utilisées dans l'amélioration de la croissance des plantes cultivées.

Mots-clés : Bactéries, rhizosphérique, PGP, *in vitro*, *Bacillus*, *Pseudomonas*.

Abstract

In the present study, 77 bacteria were isolated from the roots of five spontaneous Saharan plants indigenous to the Ghardaïa region.

The isolates were screened for their ability to fix atmospheric nitrogen and to solubilise inorganic phosphate and potassium. Macroscopic and microscopic identification as well as biochemical tests of the isolates revealed the dominance of the following genera: *Bacillus* and *Pseudomonas*.

All isolates were tested for their ability to promote germination and growth of barley seeds *in vitro*. From this test, isolates (MF2, MF5, MF4, LK4, MF10, LK1, LK5, US1, US9 and US8) expressed interesting PGP abilities and were tested for their efficacy in improving germination and growth of barley (*Hordeum vulgare* L.) and tomato (*Solanum lycopersicum*) seeds. Germination rates, seedling and root lengths and fresh and dry weights were registered.

Overall observation of the results revealed an improvement in seedling growth under *in vitro* conditions compared with the control. These results suggest that rhizospheric bacteria from natural plants in arid habitats constitute an interesting source for the isolation of bacteria with PGP potential that can be used to improve the growth of cultivated plants.

Key words: Bacteria, Rhizospheric, PGP, *in vitro*, *Bacillus*, *Pseudomonas*.