



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي برج بوعريرج

Université Mohammed El Bachir El Ibrahimi B.B.A

كلية علوم الطبيعة والحياة وعلوم الأرض والكون

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre et de l'Univers

قسم العلوم الفلاحية

Département des Sciences Agronomiques



Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Domaine des Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Sciences Agronomiques

Spécialité : Amélioration des plantes

Intitulé :

Utilisation des PGPR chez les espèces à intérêt
agronomique

Présenté par :

DAHMOUNI Roula & YESAÂD Asma

Soutenu le 30/ 06/ 2024, Devant le Jury :

	Nom & Prénom	Grade	Affiliation / institution
Président :	M. FELLAHI Zine El Abidine	MCA	Faculté SNV-STU, Univ. de B.B.A.
Encadrant :	Mme. TABTI Dabha	MCB	Faculté SNV-STU, Univ. de B.B.A.
Examineur :	M. BAHLOULI Fayçal	Pr	Faculté SNV-STU, Univ. de B.B.A.

Année Universitaire 2023/2024

Table des matières

Remerciements	
Dédicaces	
Liste des figures	
Liste des abréviations	
Introduction	1

Chapitre I : Généralités sur les PGPR

I. La rhizosphère	2
II. Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR)	3
II.1. Généralités	3
II.2. Les caractéristiques d'un PGPR idéal	3
II.3. Différents genres des PGPR	4
II.3.1. <i>Azospirillum</i>	4
II.3.2. <i>Bacillus</i>	4
II.3.3. <i>Pseudomonas</i>	4
II.3.4. <i>Rhizobium</i>	5
II.3.5. <i>Frankia</i>	5
III. Modes d'action des PGPR	5
III.1. Effets directs des PGPR sur la plante	6
III.1.1. Fixation de l'azote	6
III.1.2. Solubilisation des phosphates	7
III.1.3. Solubilisation du potassium	8
III.1.4. Production des Phytohormones	8
III.1.4.1. Acide indole-3-acétique (AIA)	8
III.1.4.2. L'acide gibbérellique (GA)	9
III.1.4.3. Cytokinine (CK)	10
III.1.4.4. Régulation d'éthylène et production d'ACC désaminase	10
III.2. Effets indirects des PGPR sur la plante	12
III.2.1. Synthèse des antibiotiques et des enzymes lytiques	12
III.2.2. Compétition dans la rhizosphère	12
III.2.3. Résistance systémique induite (ISR)	13

III.3.Composés à double action (direct/indirect).....	13
III.3.1. Sidérophores	13
III.3.2.Composés organiques volatils (COV)	14

Chapitre II : Effet des PGPR sur les céréales et légumineuse

I. Effet des PGPR sur quelques espèces de céréales	16
I.1. Généralités sur les céréales	16
I.2. Effet des PGPR chez le blé	16
I.3.Effet des PGPR chez l'orge	18
I.4.Effet des PGPR chez le maïs	19
II. Effet des PGPR sur quelques espèces des légumineuses	21
II. Généralités sur les Légumineuses	21
II.1. Effet des PGPR chez la fève.....	21
II.2.Effet des PGPR chez la lentille	22
II.3.Effet des PGPR chez le pois chiche	23
Conclusion	25
Références bibliographiques	26
Résumés	

Remerciements

Nous tenons à exprimer nos remerciements avec un grand plaisir et un grand respect à notre encadreur M^{me} Dahbia Tabti pour ses conseils, sa disponibilité et ses encouragements qui nous ont permis de réaliser ce travail dans les meilleures conditions.

Je tiens à remercier Pr. BACHLOUL Fayçal pour avoir accepté de présider le jury de cette mémoire, afin de me bénéficier de son expérience à travers ses remarques et ses suggestions, qui vont être soulevées au cours de la soutenance.

Nous tenons à remercier Dr. FELLAH Zine El Abidine, pour nous avoir fait l'honneur d'accepter la présidence du jury.

Nous tenons également à exprimer notre gratitude à tous ceux qui nous ont apporté leur soutien, que ce soit par leur gentillesse ou leur dévouement

Nous ne saurons jamais assez reconnaissants pour la lumière de nos vies, nos parents qui par leurs prières et leurs encouragements, nous avons pu surmonter tous les obstacles.

*Enfin, nous remercions gracieusement toute personne qui a contribué de
près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

Merci

Dédicace

JE DÉDIE CE TRAVAIL À MES PLUS GRANDS SOUTIENS ET INSPIRATIONS,
AVEC UN AMOUR ET UNE GRATITUDE INFINIS.

À MA MÈRE, QUI A TOUJOURS ÉTÉ MA MAISON ET MA BOUSSOLE.

MERCI POUR TON AMOUR INCONDITIONNEL, TON DÉVOUEMENT ET
TON SOUTIEN INÉBRANLABLE. TU AS ÉTÉ LA LUMIÈRE QUI A ÉCLAIRÉ
MON CHEMIN DANS LES MOMENTS SOMBRES, ET TU AS TOUJOURS
CRU EN MOI.

À MON PÈRE, QUI M'A ENSEIGNÉ L'IMPORTANCE DU TRAVAIL ET DE LA
PERSÉVÉRANCE. TU M'AS INCITÉ À VISER PLUS HAUT ET À POURSUIVRE
MES RÊVES. IL A ÉTÉ MA MOTIVATION, MON SOUTIEN ET MON APPUI
CONSTANT.

À MA SŒUR AÎNÉE IMAN, QUI M'A TOUJOURS SOUTENUE DANS
L'ADVERSITÉ ET N'A JAMAIS CESSÉ DE ME DONNER DES CONSEILS, DE
M'ENCOURAGER ET DE ME SOUTENIR TOUT AU LONG DE MES ÉTUDES.

À MON FRÈRE AÎNÉ KHAÏER, QUI M'A TOUJOURS ENCOURAGÉ ET
SOUTENU TOUT AU LONG DE MES ÉTUDES, JE VOUS SUIS
RECONNAISSANT POUR VOS CONSEILS ET VOTRE SOUTIEN
INDÉFACTIBLE.

A MA SŒUR OUMAIMA ET MES FRÈRES SADEK, ABD RAOUF, ET
ABDALLAH, MERCI D'AVOIR TOUJOURS ÉTÉ LÀ POUR MOI ET DE
M'AVOIR SOUTENUE, JE SUIS FIÈRE DE VOUS AVOIR DANS MA VIE.

À MES NIÈCES ET NEVEUX RABEH, CHAIMA ET HADJER, QUI ONT
REPLI MA VIE DE TANT DE BONHEUR ET DE JOIE.

À TOUT MA FAMILLE DAHMOUNI

A MON BINÔME ASMA QUI M'A ACCOMPAGNÉE PENDANT LE LONG DE
CETTE PÉRIODE POUR RÉALISER CE MÉMOIRE, MERCI POUR TA
GENTILLESSE, TON SOUTIEN ET TON AMOUR. TON COLLABORATION
FRUCTUEUSE ET TON AMITIÉ SINCÈRE.

À MON AMI ICHRAK, QUI A ÉTÉ MON SOUTIEN DANS LES MOMENTS
DIFFICILES ET TOUT AU LONG DE MA CARRIÈRE UNIVERSITAIRE.

À MES CHÈRES AMIS RABIA , OUMESSAAD ET RIHAM QUI M'ONT FAIT
DÉCOUVRIR L'UNIVERSITÉ, MERCI POUR VOTRE AMITIÉ, VOTRE
AMOUR SINCÈRES.

A TOUS CEUX QUE J'AIME ET JE RESPECTE.

ROULA

Dédicaces

Avant toute chose, je remercie tous d'abord Allah le tout puissant, qui a donné la force, le courage, la volonté, et la patience d'accomplir ce modeste travail.

À celui qui m'a donné tout ce qu'il avait pour réaliser ses espoirs, à celui qui m'a poussé à aller de l'avant pour atteindre ce qu'il voulait, à l'être humain qui possédait l'humanité avec toute sa force, à celui qui a veillé à mon éducation avec de grands sacrifices traduits par sa révérence pour la science, à ma première école dans la vie, à mon premier professeur dans la vie. **Papa**, que Dieu prolonge sa vie.

À celle qui a donné à son foie toute la tendresse et la tendresse, à celle qui a été patiente avec tout, qui a pris soin de moi et a été mon soutien dans l'adversité, et a prié pour mon succès, m'a suivi pas à pas dans mon travail, à celle qui m'a réconforté chaque fois que je me suis souvenu de son sourire sur mon visage, la source de tendresse, **Mama**, l'ange le plus cher sur le cœur et l'œil, que Dieu la récompense avec la plus belle récompense pour moi dans les deux mondes.

C'est à eux que je dédie cet humble travail pour leur apporter un peu de bonheur.

À ma sœur **Salsabil** et mes deux frères **Abd Elghani** et **Bilal**, Merci d'être là, votre respect et amour, présence à mes côtés surtout à ce moment, m'ont permis de donner le meilleur.

À mes grands-parents, qui ont toujours été là pour moi, m'ont transmis leur sagesse et m'ont inculqué des valeurs précieuses.

À qui a été le soutien, à qui a veillé à m'encourager, à me donner l'attention, mon très cher fiancé.

Sans oublier mon binôme **Roula** pour sa bienveillance, amour, patience, compréhension et sa soutien moral tout au long de ce projet et mes amies merci pour tous les moments et les souvenirs que nous avons passés ensemble.

Asma

Liste des figures

Figure 1 : Représentation schématique de la rhizosphère	2
Figure 2 : schéma représentant les mécanismes des PGPR.....	6
Figure 3 : Mécanismes d'action de l'ACC désaminase sur la production d'éthylène par la plante sous stress abiotiques.....	11
Figure 4 : Fonctions biologiques des sidérophores.....	14

Liste des abréviations

ACC: 1-AminoCyclopropane-1-Carboxylate

AIA : L'acide Indol-3-Acétique

BNF: British Nutrition Foundation

CFU : Colony-forming unit (Unité formant colonie)

COV: Composés Organiques Volatils

CK : Cytokinine

DAPG : 2, 4 Diacétylphloroglucinol

DMHDA: N diméthylhexadécylamine

DMSD : Disulfure de diméthyle

ePGPR : Extracellular plant growth promotion Rhizobacteria

FAO: Food and Agriculture Organization

HCN : L'acide Cyanhydrique

iPGPR : Intracellular plant growth promotion Rhizobacteria

ISR : Résistance Systémique Induite

GA : L'acide Gibbérellique

K : Potassium

SAR : Résistance Systémique Acquisée

Introduction

Au cours du siècle dernier, l'industrialisation de l'agriculture a provoqué une augmentation significative et essentielle de la productivité, ce qui a conduit à une plus grande quantité de nourriture disponible pour l'ensemble de la population. Cette abondance s'est accompagnée de l'apparition de graves problèmes environnementaux et sociaux qu'il faudra affronter et résoudre dans un avenir pas trop lointain. Aujourd'hui, il est urgent de maintenir cette productivité élevée sans altérer le plus possible l'environnement. Il est donc évident de s'orienter vers une agriculture plus durable sur le plan environnemental, tout en préservant les écosystèmes et la biodiversité. L'utilisation de rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR) est un moyen potentiel de réduire l'impact négatif sur l'environnement résultant de l'utilisation continue d'engrais chimiques, d'herbicides et de pesticides. Ce terme a été défini pour la première fois par **Kloepper et Schroth (1978)** pour décrire les bactéries du sol qui colonisent la rhizosphère des plantes, se développent dans, sur ou autour des tissus végétaux et stimulent la croissance des plantes par plusieurs mécanismes (**Pérez-Montaño et al., 2014**).

La rhizosphère contient une diversité de micro-organismes qui interagissent avec la plante et ont un impact sur sa croissance. Certains de ces micro-organismes sont bénéfiques, tels que les rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR), qui ont la capacité de renforcer la résistance des plantes aux pathogènes et aux stress environnementaux. Les PGPR agissent directement en stimulant la germination des graines, en favorisant la croissance des plantes et en induisant une résistance systémique. Ils agissent également de manière indirecte en compétitionnant avec d'autres communautés microbiennes et en produisant divers composés chimiques bénéfiques (**Welbom et al., 2004 ; Combant et al., 2010**).

L'objectif de cette étude est de faire l'état de l'art sur les effets des PGPR sur quelques espèces à intérêt agronomique notamment les céréales et les légumineuses.

Le mémoire se divise en deux parties :

- Les généralités sur les PGPR
- Effets des PGPR sur quelques espèces de céréales et légumineuses

I. La rhizosphère

La rhizosphère (**Figure 01**) désigne la zone du sol influencée par les exsudats racinaires des plantes, C'est dans cette zone qu'on trouve un groupe spécifique de bactéries appelées rhizobactéries, Ces dernières ont la capacité de se multiplier et de rivaliser avec d'autres microorganismes pour occuper cette zone riche en éléments nutritifs. L'association, le rôle et les effets des rhizobactéries sur la plante dépendent de leur succès d'établissement dans la rhizosphère ; elles peuvent avoir un impact positif, négatif ou neutre sur la croissance des plantes (**Beauchamp, 1993**).

Dans la rhizosphère, jusqu'à 30 % des composés photosynthésés par la plante sont redistribués aux micro-organismes qui y vivent grâce à un processus appelé exsudation racinaire, Ces exsudats racinaires comprennent une grande quantité d'acides organiques, de sucres et de composés organiques complexes. Ils sont ensuite transformés en biomasse microbienne ou oxydés en CO₂, La richesse de la rhizosphère en sucres, en acides aminés, en acides organiques, en iso flavonoïdes, en régulateurs de croissance et en enzymes libérées par la plante en font un site d'une activité biologique remarquable, avec une diversité naturelle en vers de terre, nématodes, protozoaires, champignons, algues et bactéries (**Paul et Clark, 1996**).

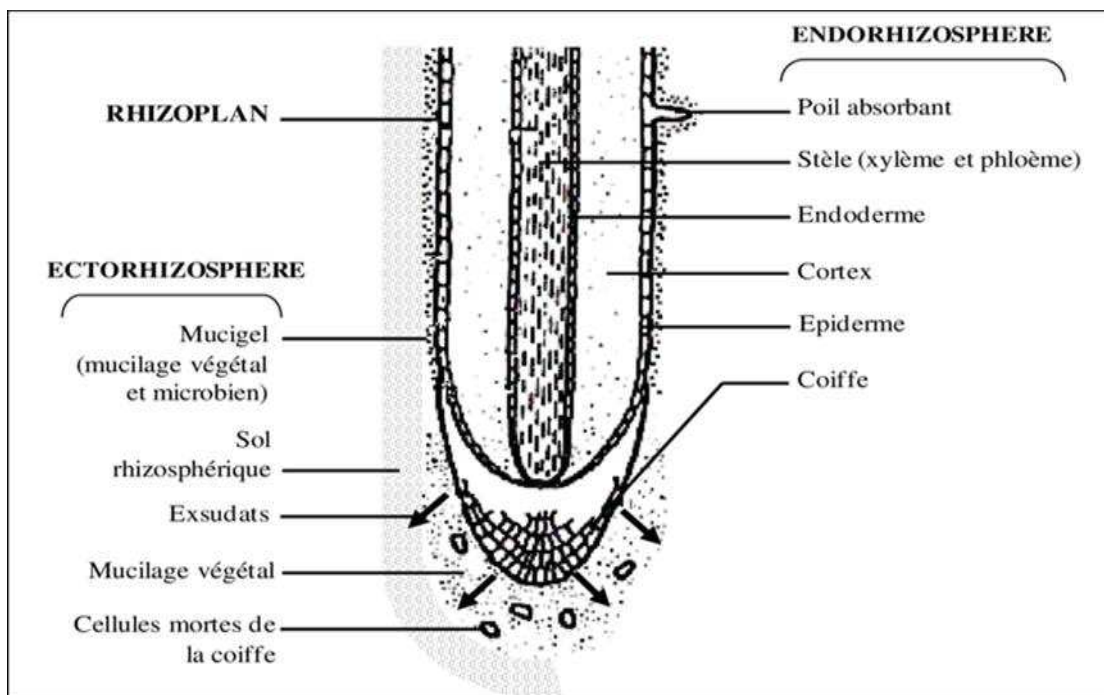


Figure 01 : Représentation schématique des zones de la rhizosphère (**Lepinay, 2015**)

II. Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR)

II.1. Généralités

Basés sur leurs expériences sur les radis, pour désigner les bactéries qui colonisent de manière compétitive les racines des plantes et favorisent leur croissance tout en réduisant les maladies, **Kloepper et Schroth (1978)** ont introduit le terme "Rhizobactérie" ou en anglais Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR).

Les rhizobactéries représentent le groupe le plus important des microorganismes de la rhizosphère, se trouvant à la surface des racines (rhizoplan) ou dans le sol rhizosphérique (**Li et Kremer, 2000**).

Les PGPR ou bactéries rhizosphériques favorisant la croissance des plantes, sont classées en deux catégories principales en fonction de leur interaction avec les plantes : les bactéries de croissance extracellulaire (ePGPR) et les bactéries de croissance intracellulaire (iPGPR) (**Martinez-Viveros et al., 2010**).

Les ePGPR se trouvent principalement dans la rhizosphère, le rhizoplan ou entre les cellules du cortex racinaire. Elles comprennent généralement des bactéries des genres *Azotobacter*, *Chromobacterium*, *Agrobacterium*, *Caulobacter*, etc) (**Gray et Smith, 2005**).

Les iPGPR résident dans des structures nodulaires spécialisées des cellules racinaires, et comprennent des endophytes tels que *Allorhizobium*, *Azorhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Mesorhizobium*, ainsi que des espèces de *Frankia* (**Verma et al., 2010 ; Wang et Martinez-Romero, 2000**).

II.2. Les caractéristiques d'un PGPR idéal

Les caractéristiques d'un PGPR idéal, ou promoteur de croissance des plantes, sont les suivantes (**Vejan et al., 2016**) :

- Compétence et écologie rhizosphérique élevées : La souche bactérienne doit être capable de rentrer en compétition efficacement dans la rhizosphère, l'environnement autour des racines des plantes, et s'adapter à cet habitat spécifique.
- Capacité de colonisation racinaire : Elle doit pouvoir coloniser les racines des plantes en nombre suffisant après inoculation, ce qui est essentiel pour établir une interaction bénéfique avec la plante.

- Promotion de la croissance des plantes : La souche doit être capable de stimuler la croissance des plantes, en favorisant l'absorption des nutriments, en augmentant la résistance au stress, ou en produisant des composés de croissance végétale bénéfiques.
- Large gamme d'actions : Elle devrait présenter une variété de mécanismes d'action, tels que la fixation de l'azote, la solubilisation des phosphates, la production de substances de croissance végétale, ou la suppression des pathogènes des plantes.
- Compatibilité avec d'autres bactéries rhizosphériques : Il est important que la souche de PGPR soit compatible avec d'autres microorganismes présents dans la rhizosphère, afin de maintenir un équilibre écologique bénéfique pour la plante.
- Tolérance aux facteurs physicochimiques : La souche doit être capable de survivre et de maintenir son activité dans des conditions environnementales variées, telles que la chaleur, la sécheresse, les radiations et les agents oxydants présents dans le sol.

II.3. Différents genres des PGPR

II.3.1. *Azospirillum*

Azospirillum est une bactérie mobile, à Gram négatif, appartenant à l'ordre des Rhodospirillales, elle est associée avec les racines des monocotylédones, notamment des cultures importantes comme le blé, le maïs et le riz. Cette bactérie a été initialement sélectionnée par sa capacité fixatrice de l'azote atmosphérique représente un bon candidat PGPR (Antoun et Prévost, 2005).

II.3.2. *Bacillus*

Le genre bactérien *Bacillus* pourrait être intéressant à utiliser comme PGPR. C'est le plus abondant dans la rhizosphère, Ce genre bactérien appartient à la famille des *Bacillaceae* de l'ordre des Bacillales dans l'embranchement des Firmicutes. Les *Bacillus* sont des bactéries Gram positif en forme bâtonnet que l'on retrouve seul ou en pair, parfois en chaîne et occasionnellement en long filaments. Ils sont capables de la dénitrification et de la fixation d'azote (Vessey, 2003). Ces bactéries sont capables de produire des endospores leur permettant de résister à des conditions environnementales défavorables.

II.3.3. *Pseudomonas*

Le genre *Pseudomonas* est un grand groupe bactérien particulièrement important qui appartient à la sous-classe γ des protéobactéries et comprend plus d'une centaine d'espèces ubiquitaires (Bossis *et al.*, 2000 ; Palleroni et Moore, 2004).

Le groupe *Pseudomonas* se compose de bâtonnets, gram négatif, mobiles, non sporulâtes, elles sont aérobies obligatoires. Les *Pseudomonas* ont un métabolisme mésophiles et chimio-organothrophe, la plupart étant saprophytes (**Bossis et al., 2000**).

II.3.4. *Rhizobium*

Les *Rhizobiums*, ou *Rhizobia*, sont des bactéries aérobies du sol appartenant à la famille des Rhizobiaceae (**Sahgal et Johri, 2006**). Les rhizobiums sont des bactéries Gram négatif, possédant une forme de bâtonnets de 0,6 à 0.9 µm de largeur et de 1.2 à 3 µm de longueur et non sporulant (**Jordan, 1984**).

Ces bactéries sont capables d'établir une symbiose fixatrice d'azote avec des plantes de la famille des légumineuses. Cette symbiose présente un haut niveau de spécificité d'hôte, basée sur une communication moléculaire entre les deux partenaires (**Pelmont, 1995**).

Ces bactéries sont capables d'induire la formation de nodules sur les racines et parfois les tiges (**Schultze et Albech et al., 1999**), par une association symbiotique avec la plupart des membres de la famille des légumineuses.

II.3.5. *Frankia*

L'actinomycète *Frankia* est une bactérie Gram-positif filamenteuse, et non un champignon comme le pensaient les microscopistes du XIXème siècle. *Frankia* est le genre type de la famille des *Frankiaceae* (**Normand et Benson, 2012**). Connu pour sa capacité à fixer l'azote moléculaire et à établir une symbiose avec 8 familles de plantes actinorhiziennes (**Lechevalier, 1984; 1989**). Cette symbiose a un grand intérêt écologique et environnemental.

III. Modes d'action des PGPR

Les mécanismes par lesquels les bactéries peuvent influencer la croissance des plantes diffèrent d'une espèce à l'autre et d'une souche à l'autre. Les PGPR affectent la croissance des plantes de deux manières différentes, directement ou indirectement (**Castro et al., 2009**) (**Figure 02**).

Les promotions directes de la croissance des plantes par les PGPR impliquent de fournir à la plante les ressources qui lui font défaut. Cela permet d'augmenter le rendement de la plante. Les moyens biologiques de fournir les nutriments tels que l'azote et le phosphore sont idéaux par rapport aux sources chimiques, qui sont coûteux et néfastes à l'environnement ou par des composés synthétisés par la bactérie, comme les phytohormones (**Lucy et al., 2004; Khalid et al., 2004 ; Glick, 2012**).

Indirectement, les bactéries peuvent exercer une influence positive sur la croissance des plantes en atténuant certains effets délétères d'un organisme pathogène en produisant des substances antagonistes (Haas et Défago, 2005).

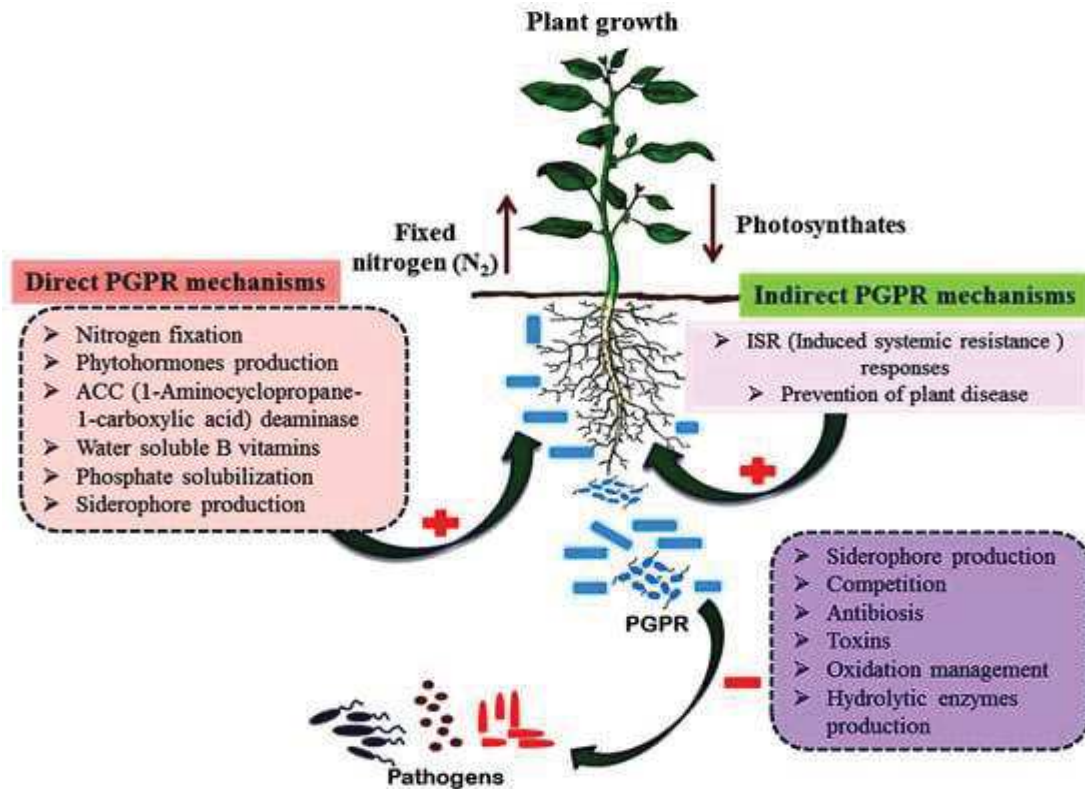


Figure 02 : Schéma représentant les mécanismes des PGPR (Chandran *et al.*, 2021).

III.1. Effets directs des PGPR sur la plante

III.1.1. Fixation de l'azote

L'azote étant un facteur limitant primaire de l'agriculture, est souvent déficient en raison de divers facteurs environnementaux. Près de 65% de l'azote actuellement utilisé dans l'agriculture est obtenu par la fixation biologique, également importante pour soutenir les systèmes de production agricole à l'avenir (Dakora, 2003).

Les souches de PGPR jouent un rôle majeur dans la fixation de l'azote et le rendent assimilable pour les plantes. Dans la fixation symbiotique de l'azote, les cultures de légumineuses subissent la fixation biologique de l'azote par le biais d'une symbiose avec des bactéries et répondent à leurs propres besoins sans dépendre de sources extérieures

(**Bhattacharyya et Jha, 2012 ; Gopalakrishnan et al., 2015**). Les bactéries symbiotiques qui agissent en tant que PGPR sont *Rhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Sinorhizobium* et *Mesorhizobium* avec les légumineuses, *Frankia* avec les arbres et les arbustes non légumineux (**Zahran, 2001**).

Les fixateurs d'azote vivant librement, survivent près des racines sans pénétration, l'azote fixé qui est acquis par l'absorption contribuent au compte d'azote des plantes (**Goswami et al., 2016**). De nombreuses espèces de micro-organismes sont utilisées dans la culture de plantes d'intérêt économiques, facilitant la croissance de la plante hôte sans l'utilisation d'engrais azotés. C'est le cas, par exemple, de la production de soja (*Glycine max*) qui est un excellent exemple de l'efficacité de la fixation biologique à l'aide de différentes souches de *Bradyrhizobium sp.* (**Alves et al., 2004 ; Torres et al., 2012**). Des études ont également montré que ces bactéries peuvent coloniser les racines des patates douces et agir comme des endophytes diazotrophes (**Terakado-Tonooka et al., 2008**).

Des études montrent l'importance de comprendre et d'utiliser les différentes bactéries fixatrices d'azote dans l'agriculture pour améliorer la croissance et la productivité des plantes (**Ikeda et al., 2013**).

III.1.2. Solubilisation des phosphates

Après l'azote, le phosphore est l'élément clé important dans la nutrition des plantes. Il existe sous forme inorganique (liée, fixe ou labile) et organique (liée). La disponibilité du phosphore pour les plantes est influencée par le pH, le compactage, l'aération, l'humidité, la température, la texture et la matière organique des sols, les résidus de culture, l'étendue du système racinaire des plantes et les sécrétions d'exsudats racinaires et les microbes disponibles dans le sol (**Gopalakrishnan et al., 2015**). Le phosphore est impliqué dans les processus métaboliques des plantes, comme la photosynthèse, le transfert d'énergie, la transduction du signal, la biosynthèse macromoléculaire et la respiration (**Khan et al., 2010**). Les PGPR solubilisent et minéralisent directement le phosphore inorganique ou facilitent la mobilité du phosphore organique grâce au renouvellement microbien et/ou à l'augmentation du système racinaire (**Richardson et Simpson, 2011**). Ces bactéries sécrètent différents types d'acides organiques qui abaissent le pH de la rhizosphère et libèrent ainsi le phosphore disponible pour les plantes (**Kaur et al., 2016**). Des bactéries provenant de genres tels qu'*Achromobacter*, *Agrobacterium*, *Bacillus*, *Pseudomonas* sont très efficaces pour solubiliser le phosphate complexé non disponible en ion phosphate inorganique disponible (**Goldstein, 2001**).

III.1.3. Solubilisation du potassium

Le potassium est le troisième macronutriment essentiel à la croissance des plantes. Le potassium (K) existe dans le sol sous quatre formes : sous la forme d'ion K^+ dans la solution du sol, en tant que cation échangeable ; étroitement retenu à la surface des minéraux argileux et de la matière organique ; étroitement retenu ou fixé par les minéraux micacés altérés ou dans le réseau de certains minéraux contenant K^+ . Cependant, la concentration du K est affectée par l'altération du sol, l'historique des cultures et l'utilisation d'engrais (**Kumar et Dubey, 2012**). La concentration du K soluble dans le sol est généralement très faible et plus de 90 % existe sous forme de roches et de silicates minéraux insolubles. En raison d'une application déséquilibrée d'engrais, la carence en K est devenue l'un des principaux facteurs restrictifs dans la production agricole. Sans suffisamment de potassium, les racines des plantes se rabougriront, se développeront lentement, auront de petites graines et produiront de faibles rendements. Cela se concentre sur la recherche de sources primaires alternatives de K pour que les plantes absorbent et maintiennent le K dans le sol pour soutenir la production agricole. Les *rhizobactéries* peuvent dissoudre la roche de K en produisant et en secrétant des acides organiques, parmi lesquelles : *Acidothiobacillus ferrooxidans*, *Bacillus edaphicus*, *B. mucilaginosus*, *Burkholderia*, *Paenibacillus sp* et *Pseudomonas*. Ces bactéries libèrent le K sous une forme accessible à partir de minéraux potassiques. Par conséquent, l'utilisation de PGPR pour dissoudre le K afin de promouvoir les plantes en tant qu'engrais biologiques pour l'amélioration agricole peut réduire l'utilisation de pesticides et promouvoir la production agricole écologique (**Gupta et al., 2015**).

III.1.4. Production des Phytohormones

Les produits chimiques présents naturellement dans les tissus végétaux ont un rôle de régulateur dans la croissance et le développement plutôt que nutritionnel. Ces composés, généralement actifs à de très faibles concentrations, sont appelés phytohormones ou substances de croissance des plantes (**George et al., 2008**). Les classes de phytohormones bien connues comprennent les auxines, les gibbérellines, les cytokinines, l'éthylène et acide abscissique. Les micro-organismes du sol, en particulier les bactéries de la rhizosphère, possèdent le potentiel de produire ces hormones (**Zakir et al., 2004**).

III.1.4.1. Acide indole-3-acétique (AIA)

L'acide indol-3-acétique (AIA), également connu sous le nom d'auxine, est en effet l'une des phytohormones les plus cruciales produites par les plantes et certains micro-

organismes bénéfiques du sol appelés PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria). Son rôle est essentiel dans de nombreux processus vitaux pour les plantes, comme la germination des graines, la formation des racines, la division cellulaire, la résistance au stress et même l'expansion des cellules (**Vessey, 2003**).

Le niveau d'auxine est généralement plus élevé dans la rhizosphère, où un pourcentage élevé de bactéries de la rhizosphère est susceptible de synthétiser l'auxine en tant que métabolites secondaires en raison des riches réserves d'exsudats racinaires. La production d'auxine (AIA) a été reconnue comme un facteur important dans les capacités directes de promotion de la croissance des plantes des bactéries de la rhizosphère (**Dilfuza, 2011**). Pour divers PGPR, il a été démontré qu'une prolifération accrue des racines est liée à la biosynthèse bactérienne de l'AIA. Lors de l'inoculation des plantes avec les PGPR, un changement dans l'architecture des racines est observé, principalement sous la forme d'une augmentation des poils absorbants et des racines latérales et d'un raccourcissement de la longueur des racines. En outre, l'AIA rhizobactérienne desserre les parois cellulaires des plantes et facilite ainsi une quantité croissante d'exsudation des racines qui fournit des nutriments supplémentaires pour soutenir la croissance des bactéries de la rhizosphère (**Glick, 2012**). La biosynthèse de l'AIA est répandue parmi les bactéries associées aux plantes (**Patten et Glick, 1996 ; Giickmann et al., 1998**).

De plus, la régulation négative de l'AIA en tant que signalisation est associée aux mécanismes de défense des plantes contre un certain nombre de bactéries phytopathogènes, comme en témoigne la sensibilité accrue des plantes à l'agent pathogène bactérien par l'application exogène d'AIA ou d'AIA produite par l'agent pathogène (**Spaepen et Vanderleyden, 2011**). Les bactéries peuvent utiliser cette phytohormone pour interagir avec les plantes dans le cadre de leur stratégie de colonisation, notamment la phytostimulation et les mécanismes de défense basaux des plantes. LAIA peut également être une molécule de signalisation chez les bactéries et peut donc avoir un effet direct sur la physiologie bactérienne (**Spaepen et al., 2007**). Plus de 80 % des bactéries isolées de la rhizosphère sont capables de synthétiser l'AIA (**Khalid et al., 2004**).

III.1.4.2. L'acide gibbérellique (GA)

Les gibbérellines sont des hormones végétales qui régulent la croissance des plantes, en particulier l'élongation des cellules. Les bactéries produisent également des gibbérellines, ce qui influence la croissance des plantes en favorisant l'élongation des cellules, la croissance des racines et la croissance aérienne. Les bactéries favorisant la croissance des plantes

(PGPR) sont des bactéries bénéfiques qui aident les plantes à absorber les nutriments du sol. Certaines de ces bactéries PGPR produisent des gibbérellines, favorisant ainsi la croissance des racines et la croissance aérienne des plantes. Cela conduit à des semis plus sains et à des rendements potentiels plus élevés. Ces interactions entre les plantes et les micro-organismes du sol jouent un rôle important dans la santé et la croissance des cultures. (Grover *et al.*, 2020).

III.1.4.3. Cytokinine (CK)

La régulation de la division et de la différenciation cellulaires chez les plantes est vitale pour leur croissance. La croissance des plantes est régulièrement coordonnée avec d'autres hormones dans la plante. L'équilibre entre les niveaux des phytohormones auxine et cytokininine est le principal régulateur de la formation des organes végétaux et de la structure des racines. Alors que la cytokininine inhibe la croissance des racines, l'auxine augmente la différenciation cellulaire à l'extrémité de la racine principale et régule la croissance des racines secondaires. En outre, les cytokinines peuvent activer d'autres fonctions des racines, telles que le transport des nutriments et l'absorption des protéines. La racine principale produit des substances par le biais d'exsudats racinaires contenant de la cytokininine, ce qui augmente l'interaction des racines avec la jeune tige et donc l'interaction de la plante avec l'environnement. (Grover *et al.*, 2020).

III.1.4.4. Régulation d'éthylène et production d'ACC désaminase

Le 1-AminoCyclopropane-1-Carboxylate (ACC) est le précurseur de l'éthylène, une phytohormone bien connue. Une partie de l'ACC est sécrétée dans la rhizosphère et réabsorbée par les racines, où elle est convertie en éthylène. Cette accumulation d'éthylène entraînera une spirale descendante, car une mauvaise croissance des racines réduira la capacité d'obtenir de l'eau et des nutriments, ce qui à son tour entraînera un stress supplémentaire. Par conséquent, les PGPR, dotés de la capacité de dégrader l'ACC de la rhizosphère peuvent aider à briser ce cercle vicieux et à restaurer un système racinaire sain, ce qui est nécessaire pour faire face à la pression environnementale. Le mécanisme principal des rhizobactéries pour détruire l'éthylène est réalisé par une enzyme appelée 1-aminocyclopropane-1-carboxylate (ACC) désaminase. Cette enzyme joue un rôle bien connu dans la régulation de l'hormone végétale éthylène, et joue donc un rôle important dans la croissance et le développement des plantes, sa présence a été largement signalée chez de nombreuses espèces microbiennes (bactéries Gram négatives et Gram positives, endophytes et champignons). Elle est largement étudiée chez de nombreuses espèces bactériennes comme

Bacillus, *Pseudomonas* et *Rhizobium* isolés de la rhizosphère de différents sols ou de différentes plantes. L'ACC désaminase peut réduire ou prévenir certains effets nocifs des niveaux élevés d'éthylène. L'ACC désaminase agit sur l'ACC et la dégrade en α -cétobutyrate et en ammonium. L'éthylène est surproduit en réponse aux stress abiotiques et biotiques, provoquant l'inhibition de la croissance des racines, inhibant ainsi la croissance globale des plantes (**Figure 03**). La synthèse d'éthylène est stimulée par divers facteurs/stress environnementaux qui entravent la croissance des plantes. Ces PGPR ACC désaminase accélèrent la croissance des plantes en régulant la production accélérée d'éthylène en réponse à une variété de stress abiotiques et biotiques, tels que la salinité, l'engorgement, la température, la pathogénicité et les polluants (**Kumar et Dubey, 2012**).

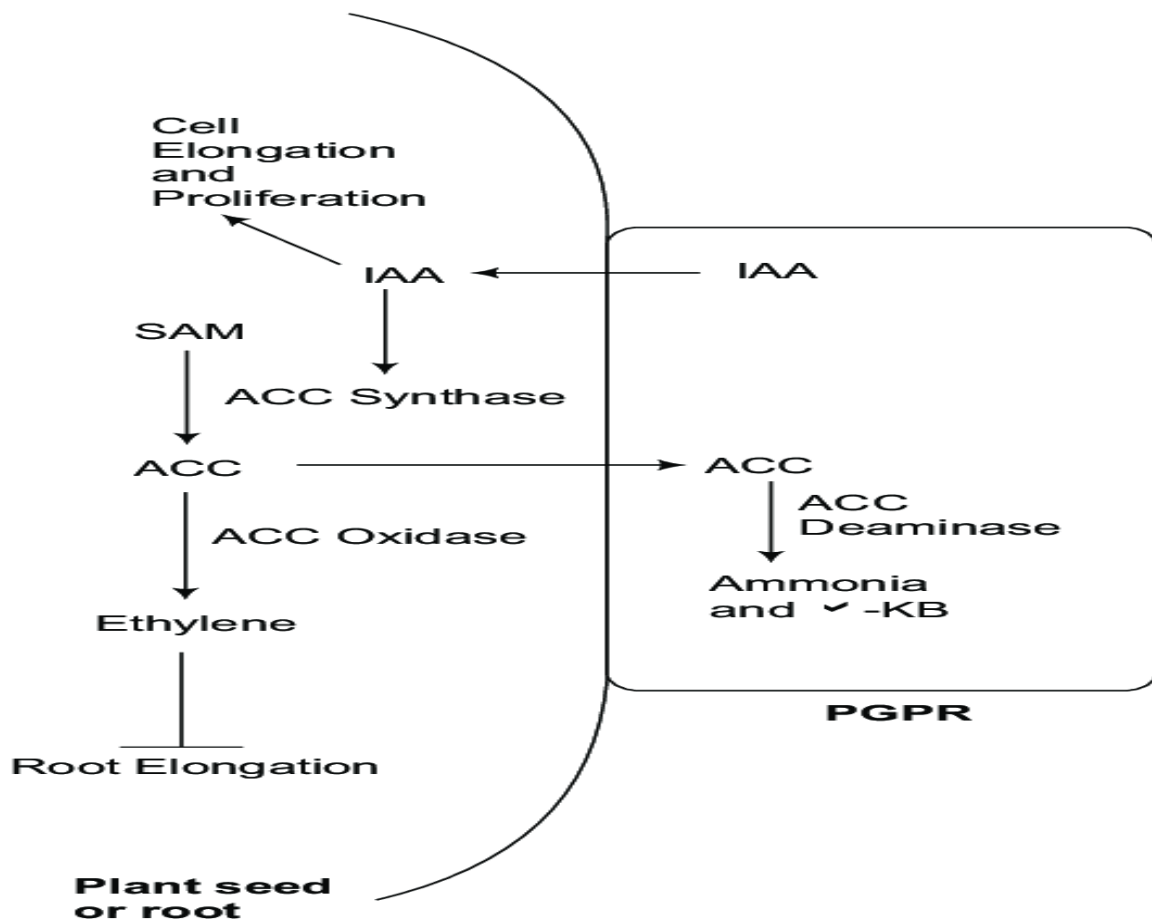


Figure 03 : Mécanismes d'action de l'ACC désaminase sur la production de l'éthylène par la plante sous stress abiotiques (**Glick et al., 1998**).

III.2. Effets indirects des PGPR sur la plante

Il existe de nombreuses façons indirectes par lesquelles les PGPR agissent comme promoteurs de croissance des plantes grâce à leurs propriétés de bio-contrôle et à l'induction d'une résistance systémique contre les phytopathogènes. Les PGPR possèdent certaines propriétés de lutte biologique contre divers phytopathogènes. Cela comprend (**Zahir et al., 2004; Hafeez et al., 2006; Narayanasamy, 2008; Reddy 2013**):

- La production d'antibiotiques ;
- La sécrétion de sidérophores permettant l'absorption du fer privant les agents pathogènes fongiques à proximité ;
- La production d'enzymes lytiques telles que la chitinase, l'α-1, 3 glucanase, la protéase et la lipase qui lysent les parois cellulaires pathogènes fongiques et bactériennes
- L'induction d'une résistance systémique chez les plantes par des métabolites

III.2.1. Synthèse des antibiotiques et des enzymes lytique

Les antibiotiques sont l'un des mécanismes les plus efficaces que les PGPR emploient pour empêcher la prolifération des phytopathogènes. Les antibiotiques comprennent un groupe hétérogène de composés organiques de faible poids moléculaire qui nuisent à la croissance ou aux activités métaboliques d'autres micro-organismes (**Duffy, 2003**).

Un antibiotique efficace, le 2, 4 diacétylphloroglucinol (DAPG), produit par les *pseudomonas*, provoque des lésions membranaires chez *Pythium spp.* et est particulièrement inhibiteur des zoospores de cet oomycète (**Souza et al., 2003**)

La croissance et les activités des agents pathogènes peuvent être supprimées par la sécrétion d'enzymes lytiques. Ce sont des enzymes dégradant la paroi cellulaire telles que les glucanases, les protéases, les chitinases et les lipases, etc., sécrétées par des souches de biocontrôle de PGPR impliquées dans la lyse de la paroi cellulaire fongique (**Neeraja et al., 2010**).

III.2.2. Compétition dans la rhizosphère

La rhizosphère, la zone qui entoure les racines des plantes, est un environnement compétitif où les micro-organismes se disputent les nutriments et l'espace. Cette compétition peut être liée aux nutriments, à l'espace ou à d'autres facteurs limitants. Il a été observé que la

colonisation des racines des plantes par des bactéries bénéfiques peut entraîner une réduction des maladies. En effet, les bactéries bénéfiques occupent les espaces où les micro-organismes pathogènes pourraient se développer, limitant ainsi leur croissance et protégeant la plante (Piano *et al.*, 1997). Cependant, il est important de noter que la corrélation entre la taille de la population de bactéries bénéfiques et le niveau de protection n'est pas toujours cohérente et peut varier.

III.2.3. Résistance systémique induite (ISR)

L'utilisation de souches de PGPR déclencherait la résistance des plantes contre les agents pathogènes (Ramamoorthy *et al.*, 2001). La résistance induite (ISR) est un état de capacité défensive renforcée développée par une plante lorsqu'elle est stimulée de manière appropriée. La résistance systémique acquise (SAR) et la résistance systémique induite (ISR) sont deux formes de résistance induite qui peuvent être différenciées sur la base de la nature de l'éliciteur et des voies de régulation impliquées (Choudhary *et al.*, 2007). La SAR peut être déclenché par l'exposition de la plante à des microbes virulents, avirulents et non pathogènes et implique une accumulation de protéines liées à la pathogenèse (chitinase et glucanase) et d'acide salicylique. L'ISR n'implique pas l'accumulation de protéines liées à la pathogenèse ou d'acide salicylique, mais repose plutôt sur des voies régulées par le jasmonate et l'éthylène et ces hormones stimulent les réponses de défense de la plante hôte contre une variété de pathogènes végétaux (Yan *et al.*, 2002; Glick, 2012). Il a été démontré que la résistance systémique induite par le PGPR supprime efficacement la brûlure phytophthora causée par *Phytophthora capsici* sur la courge (Zhang *et al.*, 2010).

III.3. Composés à double action (direct/indirect)

III.3.1. Sidérophores

Les sidérophores sont en effet des acteurs cruciaux dans la nutrition des plantes, facilitant l'absorption du fer, un élément vital pour leur croissance et leur développement. Leur capacité à chélater le fer, notamment sous sa forme la moins assimilable, l'ion ferrique, aide les plantes à surmonter les difficultés liées à sa disponibilité. Cette action est particulièrement importante dans des environnements où le fer est présent mais peu accessible (Taylor et Konhauser, 2011).

De plus, les sidérophores ne se contentent pas seulement d'améliorer l'absorption du fer par les plantes. Mais aussi contribue également à favoriser la croissance des plantes et à limiter la

disponibilité du fer pour les pathogènes potentiels, offrant ainsi un potentiel de biocontrôle (Klopper *et al.*, 1980) .

Les sidérophores représentent un exemple fascinant de coopération entre les organismes du sol et les plantes pour surmonter les défis nutritionnels, tout en offrant des avantages supplémentaires en matière de croissance des plantes et de biocontrôle (Figure 04).

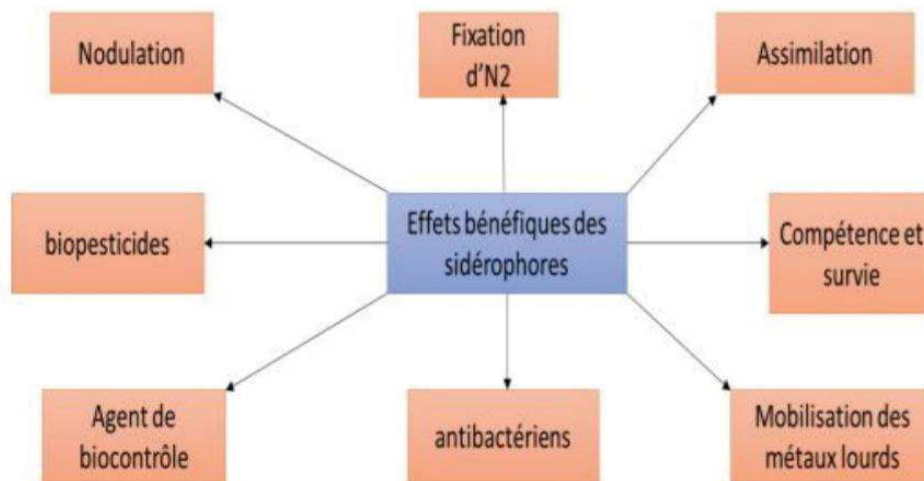


Figure04: Fonctions biologiques des sidérophores (Moustaine *et al.*, 2017).

III.3.2. Composés organiques volatils (COV)

Les composés organiques volatils (COV) produits par les rhizobactéries jouent un rôle important dans la communication entre les micro-organismes du sol et les plantes. Plusieurs études ont mis en évidence la diversité des fonctions des COV (Bitas *et al.*, 2013).

Ryu *et al.* (2003) ont montré que des composés volatils tels que le 2,3-butanediol et l'acétoïne, produits par des PGPR, peuvent favoriser la croissance des plantes comme *Arabidopsis thaliana*.

Les COV ont des fonctions variées, comprenant à la fois des mécanismes directs et indirects pour promouvoir la croissance des plantes. Certains COV, comme l'acide cyanhydrique (HCN), le disulfure de diméthyle (DMSD) et la N, N diméthylhexadécylamine (DMHDA), agissent comme de puissants inhibiteurs de la croissance du mycélium des agents pathogènes tout en favorisant simultanément la croissance des plantes (Rojas-Solis *et al.*, 2018).

De plus, les COV produits par les rhizobactéries peuvent jouer un rôle dans l'induction des réponses de défense chez les plantes. Bien que la plupart de ces composés émis soient spécifiques à chaque espèce bactérienne, il existe également des mélanges volatils qui se chevauchent entre différentes espèces de rhizobactéries telles que *Pseudomonas* et *Stenotrophomonas*, comme rapporté également par **(Rojas-Solis et al., 2018)**.

I. Effets des PGPR sur quelques espèces de céréales

I.1. Généralités sur les céréales

Les céréales peuvent être définies comme des plantes à graines comestibles de la famille des graminées (**Bender, 1999**). Elles sont cultivées pour leurs graines comestibles très nutritives, souvent appelées grains. Depuis le début de la civilisation, certaines céréales sont des aliments de base, à la fois pour la consommation humaine et pour alimentation du bétail (**BNF, 1994**).

Selon la **FAO (2002)**, les céréales sont les sources alimentaires les plus importantes et sont considérées comme une source majeure d'énergie, de protéines, de vitamines B et de minéraux pour la population mondiale. Elles constituent la base de l'alimentation dans de nombreux pays en développement, notamment en Afrique et au Maghreb.

En Algérie, la filière céréalière joue un rôle stratégique dans alimentation et économie nationale (**Djermoun, 2009**).

I.2. Effets des PGPR chez le blé

L'étude de **Kirdi (2011)** sur le rôle des PGPR dans la croissance végétale et la lutte contre les phanérogames parasites a révélé l'effet de différentes souches de rhizobactéries sur la germination des graines de blé et l'élongation des racines des graines germées. Les résultats montrent que les graines traitées avec les souches de rhizobactéries ont commencé à germer plus tôt que les graines traitées avec la souche témoin. La souche FKP424 a donné le meilleur résultat avec un taux de germination de 53%. De plus, toutes les souches de rhizobactéries ont stimulé la croissance des racines, bien que certaines souches aient eu un effet moins prononcé que d'autres. Les souches FKF5100, FKF449, FKP424, BRS895 et FKP584 ont montré une augmentation significative de la longueur des racines par rapport au contrôle. L'effet des souches FKS454 et FKF689 était également différent de celui de la souche de contrôle. Ces résultats suggèrent que l'utilisation de certaines souches de rhizobactéries peut améliorer la germination des graines de blé et favoriser la croissance des racines.

L'étude de **Zhour et al. (2022)** sur les exsudats de bactéries associées à la rhizosphère du blé sauvage et leurs effets sur le développement racinaire du blé moderne a montré des variations dans le développement racinaire en fonction des souches bactériennes, notamment en ce qui concerne les poils racinaires. Il a été observé que la capacité du blé à établir des interactions bénéfiques avec ces bactéries n'est pas toujours évidente et que cela ne semble pas avoir changé de manière significative au cours de la domestication. L'analyse des exo-

métabolites a révélé la présence de divers métabolites secondaires, dont des chélateurs d'ions nutritifs et des molécules de signalisation inter-royaumes. Les protéines spécifiques des souches et les protéines structurales des vésicules de la membrane externe jouent un rôle dans la séquestration des métabolites. Les résultats suggèrent que les bactéries PGPR exsudent un ensemble complexe et constitutif de métabolites. Des bactéries trouvées dans la rhizosphère des blés sauvages cultivés dans le Croissant fertile sont des promoteurs efficaces de la croissance des plantes. Ces bactéries produisent des métabolites secondaires complexes qui peuvent agir comme des hormones végétales et des signaux inter-royaumes.

D'autre part, **Upadhyay et al. (2012)** dans leur étude sur l'impact de l'inoculation de PGPR sur la croissance et le statut antioxydant du blé en conditions salin ont noté que, la croissance de deux souches bactériennes, *Bacillus subtilis* SU47 et *Arthrobacter sp.* SU18 étudiée à différents niveaux de salinité. 0% ,4% et 8% de NaCl, était lente pendant les premières heures, suivie d'une croissance exponentielle et ensuite d'une phase de plateau. Les deux souches bactériennes ont produit de l'IAA à 8% de NaCl, alors que la souche SU47 a également produit de la gibbérelline et du phosphate dissous. La souche SU47 a produit des protéines extracellulaires, de la proline, des sucres solubles et des exo polysaccharides, tandis que la souche SU18 a produit de la proline et des sucres solubles uniquement. L'effet des bactéries PGPR sur la croissance du blé dans un sol salin a également été étudié, montrant une augmentation significative de la croissance par rapport au blé non inoculé. L'augmentation de la matière sèche a été maximale après co-inoculation avec les deux souches citées en haut en comparaison avec l'inoculation de chaque souche seule ou la non inoculation.

Les résultats de l'étude de **Turan et al. (2011)** ont montré que l'inoculation du blé tendre améliore les paramètres de croissance. Il a été démontré que l'utilisation des souches de PGPR fixatrices d'azote et qui solubilisent le phosphore a induit à l'augmentation des rendements en paille et en grains chez tous les cultivars étudiés de 12.9 % et 43.7 % respectivement. La même étude a suggéré aussi que l'utilisation des souches de PGPR fixatrices d'azote et qui solubilisent le phosphore pourrait réduire l'utilisation des engrais azotés et phosphorique.

L'étude de **Kumar et al. (2014)** ont montré que la co-inoculation par plusieurs souches de PGPR augmente significativement la hauteur de la paille de 14 à 17.5 % et le rendement en grain jusqu'à 79.8 %. Cette co-inoculation a aussi augmenté la composition des graines et de la paille en azote qui a atteint un maximum de 126.2 % et 178 % respectivement. De même pour le phosphore qui a été augmenté jusqu'à 154.8 %.

La composition des graines en micro-éléments a été aussi affectée par la co-inoculation. La teneur en cuivre, en zinc, en manganèse et en fer a été augmentée de 83.0%, 58.5%, 104.0% and 49.2% respectivement par rapport au témoin.

I.3. Effets des PGPR chez l'orge

Kasim et al. (2016) ont examiné neuf souches de bactéries PGPR qui forment un biofilm en conditions de stress salin et ont mesuré leur activité en fonction de différentes concentrations de sel. Les résultats ont montré que l'activité de formation de biofilm augmentait avec la concentration en sel, en particulier à 500 mM de NaCl. Les souches HM (5-8) et les souches de référence étaient les plus actives dans la formation du biofilm. Cependant, toutes les souches testées ont été inhibées lorsqu'elles sont traitées avec 1000 mM de NaCl, sauf pour *Azospirillum brasilense* (NO40), V1B1C1, *B. megatherium* et *A. chroococcum*. Une étude a également été réalisée pour évaluer l'effet des biofilms bactériens sur la tolérance au sel des plantules d'orge, qui a montré des résultats basés sur la masse fraîche, la masse sèche et la teneur en eau relative des plantules. La bactérie "B" a été identifiée comme ayant la plus forte activité de formation de biofilm à toutes les concentrations de NaCl testées. Son identification a été réalisée en utilisant le ribosome 16S et on a déterminé qu'elle avait une similitude de séquence de 97,4 % avec *Bacillus amyloliquifaciens*.

Dans l'étude de **Ramazan et al. (2007)** sur l'effet des PGPR sur la croissance de l'orge, des isolats de *Bacillus* ont été utilisés pour évaluer leurs effets sur la solubilisation du phosphore insoluble et la croissance de l'orge. Les résultats ont montré que tous les isolats étaient efficaces pour solubiliser le phosphore, avec une augmentation quotidienne de la quantité de phosphore dissous. Les isolats étaient également capables de réduire le pH du sol, avec des différences statistiques observées pour les isolats *Bacillus* M-13 et RC01. De plus, il a été constaté que les isolats produisaient l'hormone végétale l'IAA (acide indole-3-acétique), qui favorise la croissance des plantes. La quantité d'IAA produite variait selon les isolats et était plus élevée en présence de tryptophane. Ces bactéries pourraient être utilisées en agriculture pour améliorer la productivité des plantes et la qualité du sol.

D'autre part, **Canbolat et al. (2006)**, ont révélé que la disponibilité en phosphore dans le sol a été augmentée par l'inoculation par certaines souches bactériennes. Cependant, l'effet de l'inoculation bactérienne sur la disponibilité en phosphore a diminué avec une densité apparente élevée. Les inoculations bactériennes ont également affecté la longueur des racines, en particulier avec la souche *Bacillus* RC01. L'utilisation d'engrais minéraux et l'inoculation

bactérienne ont augmenté le poids sec des racines et des pousses de l'orge. Cependant, il y avait une différence numérique mais non statistique entre l'inoculation bactérienne et l'engrais phosphaté en termes de poids sec des racines et des pousses.

Ferioun *et al.* (2023), ont étudié l'effet de quatre souches de PGPR dans la tolérance au stress hydrique. Les résultats montrent un impact important de l'inoculation des PGPR même en condition de manque d'eau. La matière sèche des racines a été augmentée de 54% à 74 % selon les souches chez les plantes mises sous stress hydrique inoculées par rapport à celles non inoculées. De même, cette inoculation a eu des augmentations dans les valeurs de la chlorophylle a et b et aussi celles de la proline.

I.4. Effets des PGPR chez le maïs

L'étude de **Peng *et al.* (2021)** a évalué la capacité de trois isolats biologiques différents (P8, P10 et X52) à fixer l'azote, à solubiliser le phosphate et à produire de l'IAA (acide indolacétique). Les résultats ont montré que l'isolat P8 était le plus efficace pour fixer l'azote, tandis que l'isolat P10 avait une meilleure capacité de solubilisation du phosphate. L'isolat X52 a montré une plus grande production d'IAA. De plus, l'isolat X52 a montré les effets inhibiteurs les plus forts sur les champignons phytopathogènes testés. Des analyses ont été effectuées pour comprendre les résultats quantitatifs obtenus. L'étude a conclu que ces isolats bactériens pourraient être utilisés dans la lutte biologique contre les champignons phytopathogènes. De plus, l'inoculation de ces bactéries bénéfiques favorise la croissance des plantes et leur résistance au stress salin. En résumé, les isolats bactériens étudiés améliorent la croissance des plantes, leur résistance à la salinité, fixent l'azote dans le sol et inhibent la croissance des champignons phytopathogènes

Gholami *et al.* (2009) ont mené trois expériences pour tester l'effet des bactéries sur la germination des graines et la croissance des plants de maïs. Six souches bactériennes ont été utilisées dans les expériences. Les résultats ont montré que l'inoculation des graines avec des bactéries augmentait la germination des graines jusqu'à 18,5 % par rapport aux graines non traitées. En outre, les résultats ont montré que l'inoculation bactérienne entraînait une augmentation du poids sec des feuilles et des tiges ainsi que de la surface foliaire. Il y a également eu une augmentation de la hauteur des plantes, du poids de 100 graines et du nombre de graines par épi. Une augmentation du poids sec des épis et des pousses de maïs a été observée, ainsi que pour d'autres cultures telles que le blé et les pommes de terre. Les souches *A.brasilense* DSM 1690 et *P. putida* R-168 ont montré une amélioration significative de leur activité et de leur vigueur.

En conclusion, ces bactéries peuvent être utilisées pour optimiser la productivité agricole et la croissance des cultures.

Noumavo et al. (2013) ont visé dans leur étude à évaluer les effets de trois souches de PGPR, seules ou en combinaison, sur la croissance du maïs dans des conditions de laboratoire et de serre. Les semences ont été inoculées avec une solution unique et une solution combinée de 108 CFU/ml de rhizobactéries. Les traitements avec les souches bactériennes *P. fluorescens*-*P. putida* et *A. lipoferum* ont montré les meilleurs résultats en termes de pourcentage de germination et de longueur des racines. Une augmentation significative du pourcentage de germination a été observée avec ces traitements, atteignant respectivement 22,44% et 20,39%. La plus grande longueur de pousse a été obtenue avec le traitement *P. fluorescens*-*P. putida* et la plus grande longueur de racine avec le traitement *A. lipoferum*. Les graines traitées avec ces combinaisons de bactéries ont également montré une amélioration de l'indice de vitalité. Le sol utilisé pour l'expérience était pauvre en phosphore, en carbone organique et en calcium, mais riche en potassium.

En conclusion, l'utilisation de certaines combinaisons spécifiques de bactéries favorisant la croissance des racines peut être considérée comme une méthode efficace pour augmenter le rendement des cultures de maïs.

II. Effets des PGPR sur quelque espèce des légumineuses

II.1. Généralités sur les légumineuses

Les légumineuses occupent une place particulière dans les systèmes culturaux, et sont considérées comme une source très importante de protéines pour la consommation humaine et animale (**Myllona et al., 1995**) en particulier pour les populations à faible revenu (**Pachico, 2005**). Classées parmi les Angiospermes, Eudicotylédones à gousses, c'est la famille végétale qui fournit le plus grand nombre d'espèces utiles à l'homme, qu'elles soient alimentaires, industrielles ou médicinales (**Tourene, 2018**)

La famille des Légumineuses qui ne compte pas moins de 7.000 espèces répandues sur tous les points du globe terrestre comprend 430 genres d'après **Van Tieghem (1913)**. Elles représentent des herbes, des arbrisseaux, des arbustes et des arbres (**Sornay, 1913**).

Les légumineuses sont cultivées pour leurs graines, on distingue les espèces à graines riches en protéines et en huiles, sans amidon, classées comme oléagineux (soja, arachide, ...) et les espèces à graines riches en protéines, classées comme protéagineux (pois, féverole, fève,...) ou légumes secs (haricot, lentille, pois chiche,...) (**Zhu et al., 2005**). Leurs graines contiennent généralement 20 % à 30 % de protéines et riches en Lysine, complétant les profils nutritionnels des céréales et des tubercules dans l'alimentation (**Duranti et Gius, 1997**).

Elles présentent la faculté de fixer l'azote atmosphérique via la symbiose avec des bactéries *Rhizobia*, Cette caractéristique leur permet d'assurer leur nutrition azotée en dehors de toute fertilisation chimique contrairement aux autres cultures. Environ 175 millions de tonnes d'azote atmosphérique sont fixés annuellement (**Lévêque et Mounoulou, 2001**).

La fève, le pois chiche et la lentille sont parmi les légumineuses cultivées en Algérie

II.2. Effets des PGPR chez la fève

L'étude de **Kirdi (2011)** a montré que les porte-greffes de la fève ont un effet stimulant sur la vitesse de germination des graines. Dans l'expérience menée, le traitement des semences avec ces souches s'est avéré accélérer la germination puisque les semences ont commencé à pousser dans les 48 heures, alors que les semences non traitées ont mis plus d'un jour à commencer à pousser. En outre, les résultats ont montré que les souches rhizobiennes ont augmenté la longueur des racines germées des graines jusqu'à 427,5 %, alors que les autres souches n'ont pas eu d'effet significatif. Par conséquent, FKF5100 et FKS560 peuvent

être considérées comme les souches les plus intéressantes pour leur enrichissement dans ces caractéristiques.

L'étude de **Haballah et Timilali (2018)** indique que le taux de germination des graines de la variété S.aguadulce dans tous les niveaux de salinité et d'inoculation est supérieur à ceux de la variété locale sauf qu'au niveau de traitement non salin en présence de la souche P2 et P3 et au niveau du traitement 100 mM en absence d'inoculation. Il a été constaté une différence significative de taux de germination dans les milieux salins. Les résultats de T50 montre que la variété S.aguadulce est rapide comparativement avec la variété locale dans tous les niveaux de salinité et d'inoculation sauf qu'au niveau de traitement non salin et sans inoculation.

Les résultats de l'expérience **Yala et al. (2018)** indiquent que la croissance fongique et la progression de la maladie ont un effet positif sur les bactéries antibactériennes. Des niveaux inférieurs de croissance mycélienne et de germination des conidies ont été enregistrés lors de l'interaction avec les bactéries antagonistes sur les trois milieux étudiés. Pour l'inhibition de la germination filamenteuse, les souches ont montré des niveaux similaires, bien que dans certains cas la souche F21 ait montré un effet antagoniste plus important que la souche BB10. Tous les génotypes étudiés ont montré des niveaux élevés d'antagonisme localisé. Selon les résultats obtenus, la présence de génotypes de pois réduit le développement de la maladie bactérienne en présence des souches bactériennes F21 et BB10. La valeur de maladie la plus faible a été enregistrée en présence des génotypes G1 et G2. De faibles valeurs de maladie ont également été observées dans les génotypes G3 et G4.

II.3. Effets des PGPR chez la lentille

Les résultats d'une analyse de **İrfan (2020)** sur deux ans de l'application de *Pseudomonas* confirment son impact significatif sur plusieurs caractéristiques de la lentille telles que la floraison, la maturité, la hauteur, les branches primaires et le nombre de gousses. Les résultats ont également montré que les effets sont influencés par l'année et, dans certains cas, par l'interaction entre l'année et l'application. En outre, des études antérieures ont démontré que des bactéries telles que *P. fluorescens* peuvent être utilisées pour améliorer la productivité des cultures dans des conditions hydroponiques ou organiques.

Selon l'étude de **Muscolo et al. (2019)** sur l'utilisation de PGPR pour améliorer les performances des lentilles sous conditions de salinité a indiqué que les inoculants 6K et W10 stimulent la croissance des pousses de lentilles en conditions salines. À une concentration de

sel de 4 dS m⁻¹, les inoculants ont augmenté la longueur des pousses de lentilles chez les variétés UST et CAST. Les inoculants 6 et 6K ont également montré une augmentation de la longueur des pousses de lentilles chez la variété PUN, tandis que toutes les souches ont augmenté la longueur des pousses chez les variétés MAS et EST. Les résultats indiquent également que toutes les souches ont augmenté la longueur des pousses de lentilles dans toutes les variétés de lentilles dans des conditions de salinité de 8 dS m⁻¹ par rapport aux variétés non inoculées. L'effet des souches sur les racines dépendait du cultivar de lentilles, la longueur des racines ayant augmenté pour les variétés UST et CAST uniquement lorsqu'elles étaient inoculées avec W10 dans des conditions non salines. Dans l'ensemble, les résultats montrent que le sel et les inoculants ont des effets différents sur la croissance des lentilles et que certaines souches sont plus efficaces que d'autres dans des conditions salines.

A partir de l'expérience de **Sijilmassi (2020)**, les souches de *Rhizobium* présentent des caractéristiques favorables à la croissance des plantes. Parmi ces caractéristiques, l'activité de solubilisation du phosphate et la production de phytohormones sont importantes. Certaines souches de *Rhizobium* ont montré une capacité élevée de solubilisation du phosphate, tandis que d'autres ont montré une capacité moyenne. Ces souches ont également été classées en deux groupes en fonction de leur pH, avec un groupe à pH inférieur à 4,5 et une capacité élevée de l'activité de solubilisation des phosphates, et un autre groupe à pH supérieur à 4,5 et une capacité faible de l'activité de solubilisation des phosphates. Toutes les souches de *Rhizobium* ont également montré une production significative d'acide indole acétique (IAA) par rapport au témoin, à l'exception d'une souche. La souche 686N5 a montré la production la plus élevée d'IAA, suivie de près par *R. tropici* CIAT 899 et *A. brasilense* DSM-1690. De plus, treize souches étaient productrices de GA3, une autre phytohormone, avec des taux de production significativement différents. La souche 318N2111 a montré la production la plus élevée de GA3, suivie de près par *A. brasilense* DSM-1690, 1145N1 et 996N2.

II.4. Effets des PGPR chez le pois chiche

L'étude de **Patel et al. (2012)** sur l'effet des PGPR sur la croissance de pois chiche en condition de stress salin a montré que les plantes soumises à un stress salin sans traitement avec les PGPR ont enregistré une réduction de 71 % et de 34 % dans la longueur des racines et la hauteur de la tige respectivement en comparaison avec les plantes inoculées avec l'isolat MSC1. La réduction a aussi touché le nombre de feuilles et le nombre de racines latérales. Dans la même étude, les plantes traitées avec les isolas MSC1, MSC4 et B7 ont montré une augmentation du nombre de feuilles de 31% en comparaison avec les plantes non inoculées.

Les plantes inoculées avec l'isolat MSC1 ont montré une augmentation du nombre de branches de 8.6 %, du poids frais de poids sec. Une augmentation du contenu de la chlorophylle et du nombre de fruits a été aussi observée chez les plantes inoculées avec l'isolat MSC4 en comparaison avec les plantes soumises sous stress sans inoculation.

Karnwal et Kumar (2012) ont montré que l'utilisation de 6 isolats des PGPR (*P.aeruginosa*) a un effet positif sur la germination des graines et la vigueur des plantules chez le pois chiche. Dans la même étude, la longueur des racines, la matière fraîche ont été augmentée de 92 % et de 43 % respectivement. La matière sèche la plus élevée a été obtenu avec la souche VA3 et VA1.

Les résultats de **Panjebashi et al. (2012)** ont montré que les souches bactériennes *Pseudomonas* et *Rhizobium* ont des effets significatifs sur la hauteur des plantes, les hauteurs les plus importantes étant obtenues avec la souche *Rhizobium* CP-31 et la souche *Pseudomonas fluorescens* 153. Le nombre de gousses par plante a également été significativement affecté par les différentes souches, le nombre augmentant significativement avec la souche CP-36 de *Rhizobium* et la souche 153 de *Pseudomonas fluorescens*. Le poids de 1000 graines a également été affecté par les souches, le poids le plus élevé étant obtenu avec la souche CP-36 de *Rhizobium* et la souche 153 de *Pseudomonas fluorescens*. Une augmentation significative du rendement biologique a été observée en utilisant la souche CP-3 de *Rhizobium* et la souche 4 de *Pseudomonas fluorescens*. Le rendement en graines a été significativement affecté par l'inoculation de *Rhizobium*, la souche 153 de *Pseudomonas fluorescens* ayant le rendement le plus élevé en graines. Les résultats indiquent que l'interaction entre les souches de *Pseudomonas* et de *Rhizobium* est importante, car le rendement en graines le plus élevé a été obtenu en appliquant la souche 153 de *Pseudomonas fluorescens* et la souche CP-36 de *Rhizobium*.

Conclusion

La rhizosphère est la zone du sol située sous les racines des plantes et est directement affectée par ces dernières. La libération de composés organiques par les racines favorise la reproduction de micro-organismes tels que les bactéries et les champignons. Certaines bactéries connues sous le nom de PGPR optimisent la croissance des plantes et fournissent des récepteurs qui sont impliqués dans le contrôle des maladies et dégradent les pathogènes en produisant des antibiotiques et des enzymes de dégradation et colonisent les racines des plantes et agissent comme une source supplémentaire d'hormones et de facteurs de croissance qui sont utiles pour améliorer la croissance dans le but l'amélioration de la disponibilité des nutriments pour les plantes de manière significative.

Ces connaissances sont utilisées dans l'agriculture pour augmenter les rendements, réduire l'utilisation de pesticides chimiques, améliorer la santé des plantes, augmenter de manière significative la fertilité des sols, favoriser le développement des racines, améliorer la croissance des plantes, combattre les parasites des plantes, stimuler la germination des graines, et sont utilisées pour améliorer les performances dans des conditions de stress salines.

Il serait intéressant d'utiliser les PGPR comme biofertilisants pour la durabilité des agro-écosystèmes. Il est essentiel d'identifier des souches de PGPR efficaces qui fonctionnent avec des mécanismes spécifiques pour obtenir des résultats durables dans l'agriculture pour réduire l'utilisation des engrais chimiques.

Références bibliographiques

1. **Alves B.J.R., Boddey R.M. & Urquiaga S. (2004).** The success of BNF in soybean in Brazil. *Plant Soil* 252,1-9.
2. **Antoun H., & Prévost, D. (2006).** Ecology of plant growth promoting rhizobacteria. *PGPR: Biocontrol and biofertilization*, 1-38.
3. **Beauchamp C. (1993).** Mode d'action des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes et potentiel de leur utilisation comme agent de lutte biologique. *Phytoprotection*, 74(1), 19–27. <https://doi.org/10.7202/706033ar>.
4. **Bhattacharyya P.N. & Jha, D. K (2012).** Plant growthpromoting rhizobacteria (PGPR): emergence in agriculture. *World. J. Microbiol.Biotechnol.*, 28 (4), 1327–1350.
5. **Bitas V, Kim HS, Bennett JW& Kang S. (2013).** Sniffing on microbes: diverse roles of microbial volatile organic compounds in plant health. *Mol Plant-Microbe Interact* 26,835–843.
6. **BNF (British Nutrition Foundation) (1994)** Starchy Foods in the Diet.BNF, London.
7. **Bossis E., Lemanceau, P. P., Latour, X., & Gardan, L. (2000).** The taxonomy of *Pseudomonas fluorescens* and *Pseudomonas putida*: current status and need for revision. *Agronomie*, 20(1), 51-63.
8. **Cakmakci Ramzan, Dönmez, M. F., & Erdoğan, Ü. (2007).** The effect of plant growth promoting rhizobacteria on barley seedling growth, nutrient uptake, some soil properties, and bacterial counts. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 31, 189-199.
9. **Canbolat Mustafa. Y., Bilen, S., Çakmakçı, R., Şahin, F., & Aydın, A. (2006).** Effect of plant growth-promoting bacteria and soil compaction on barley seedling growth, nutrient uptake, soil properties and rhizosphere microflora. *Biology and fertility of soils*, 42, 350-357.
10. **Castro R.O., Cornejo, H.A.C., Rodriguez, L.M. & Bucio, J.L (2009).** The role of microbial signals in plant growth and development. *Plant Signal Behav.*, 4 (8),701–712.
11. **Chandran H., Meena, M., & Swapnil, P. (2021).** Plant growth-promoting rhizobacteria as a green alternative for sustainable agriculture. *Sustainability*, 13(19), 10986.
12. **Choudhary D.K., Prakash, A. & Johr, B. N (2007).** Induced systemic resistance (ISR) in plants: *Mechanism of action*. *Indian J. Microbiol.*, 47(4), 289-297.

13. **Compant S., Clement, C. & Sessitsch, A. (2010).** Plant growth-promoting bacteria in the rhizo- and endosphere of plants: Their role, colonization, mechanisms involved and prospects for utilization. *Soil Biology et Biochemistry* 42, 669-678.
14. **Dakora F.D (2003).** Defining new roles for plant and rhizobial molecules in sole and mixed plant cultures involving symbiotic legumes. *New Phytol.*, 158, 39 – 49.
15. **Dilfuza E (2011).** Indole-Acetic Acid Production by Root Associated Bacteria and its Role -in Plant Growth and Development. In: Auxins: Structure, Biosynthesis and Functions (Andrew, HK, Michelle, DF, ed.). *Nova Science Publishers*, pp1-13.
16. **Djermoun A.(2009).** La production céréalière en Algérie : les principales caractéristiques, *Revue Nature et Technologie*. N° 01/Juin 2009. Chlef 45-53. www.univ-chlef.dz/RevueNatec/art_01_05.pdf.
17. **Duffy B (2003).** Pathogen self-defense: Mechanisms to counteract microbial antagonism. *Ann. Rev. Phytopathol.*, 41,501-38.
18. **Durante M. & C. Gius.(1997).** Legume seeds: protein content and nutritional value. *Field crop Res.*, 53, 31–45.
19. **Erdemci İ. (2020).** Effect of Pseudomonas fluorescent rhizobacteria on growth and seed quality in lentil (*Lens culinaris* Medik.). *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 51(14), 1852-1858.
20. **FAO (Food and Agriculture Organisation) (2002)** World Agriculture: Towards 2015/2030. Summary Report. FAO, Rome.
21. **George E. F., Machakova, I. & Zazimalova, E (2008).** Plant Growth Regulators. I: Auxins, their Analogues and Inhibitors In: *Plant Propagation by Tissue Culture*. (George, EF, Hall, MA, Deklerk, GJ, ed.). Dordrecht, Netherlands: Springer, 175–204.
22. **Glick B R & Penrose D M, LI J. (1998).** A model for the lowering of plant ethylene concentrations by plant growth-promoting bacteria. *Journal of theoretical biology*, 190 ,63-68.
23. **Glick B.R (2012).** Plant Growth-Promoting Bacteria Mechanisms and Applications. *Scientifica.*, 1-16.
24. **Glickmann E., Gardan, L., Jacquet, S., Hussain, S., Elasri, M., Petit, A. & Dessaux, Y (1998).** Auxin production is a common feature of most pathovars of *Pseudomonas syringae*. *Mol. Plant Microbe. Interact.*, 11, 156–162

25. **Goldstein A.H (2001)**. Bioprocessing of Rock Phosphate Ore: Essential Technical Considerations for the Development of a Successful Commercial Technology. New Orleans, USA: IFA technical conference.
26. **Gopalakrishnan S., Sathya, A., Vijayabharathi, R., Varshney, R.K., Laxmipathi Gowda, C.L. & Krishnamurthy, L (2015)**. Plant growth promoting rhizobia: challenges and opportunities. *Biotech.*; 5, 355–377.
27. **Goswami, D., Thakker.J.N & Dhandhukia, P.C (2016)**. Portraying mechanics of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): A review. *Cogent Food Agric.*, 2:1-19.
28. **Govindarajan M., Balandreau, J., Kwon, S.W., Weon, H.Y. & Lakshminarasimhan, C.(2008)**. Effects of the inoculation of Burkholderia vietnamensis and related endophytic diazotrophic bacteria on grain yield of rice. *Microb. Ecol.*, 55,21-37.
29. **Gholami A., Shahsavani, S., & Nezarat, S. (2009)**. The effect of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) on germination, seedling growth and yield of maize. *International Journal of Agricultural and Biosystems Engineering*, 3(1), 9-14.
30. **Gray EJ, Smith DL (2005)**. Intracellular and extracellular PGPR: commonalities and distinctions in the plant-bacterium signaling processes. *Soil Biol Biochem* 37,395–412
31. **Grover M., Bodhankar, S., Sharma, A., Sharma, P., Singh, J. & Nain, L. (2020)**. PGPR mediated alterations in root traits: way towards sustainable crop production. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 287.
32. **Haballah R., Timilali, S., & Ouaini, A. (2018)**. Rôle des Pseudomonas rhézosphériques dans l’allègement de l’effet du stress salin sur la fève (Doctoral dissertation, Université Ahmed Draia-ADRAR).
33. **Hafeez F.Y., Yasmin, S., Ariani, D., Rahman, M., Zafar, Y. & Malik, K.A (2006)**. Plant growthpromoting bacteria as biofertilizer. *Agron. Sustain. Dev.*, 26,143–150.
34. **Haas D., & Défago G. (2005)**. Biological control of soil-borne pathogens by fluorescent pseudomonas. *Nature reviews microbiology*, 3(4), 307-319.
35. **Ikeda A.G, Bassani, L.L, Adamoski, D., Stringari, D., Cordeiro, V.K., Glienke, C., Maria Steffens, B.R., Hungria, M. & GalliTerasawa, L.V (2013)**.

Références bibliographiques

- Morphological and genetic characterization of endophytic bacteria isolated from roots of different maize genotypes. *Microb. Ecol.*, 65,154-160.
- 36. Jordan D, C. (1984).** International comité on systematic bacteriology. Subcomité on the taxonomy of *Agrobacterum* and *Rhizobium*. *Int.J. S yst. Bacteriol.*34, 248.
- 37. Karnwal A., & Kumar, V. (2012).** Influence of plant growth promoting rhizobacteria (pgpr) on the growth of chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Ann Food Sci Technol*, 13(2), 1-6.
- 38. Kasim W. A., Gaafar, R. M., Abou-Ali, R. M., Omar, M. N., & Hewait, H. M. (2016).** Effect of biofilm forming plant growth promoting rhizobacteria on salinity tolerance in barley. *Annals of Agricultural Sciences*, 61, 217-227.
- 39. Kaur H., Kaur, J. & Gera, R (2016).** Plant Growth Promoting Rhizobacteria: A Boon to Agriculture. *Int. J. Cell Sci. Biotechnol.*, 5, 17-22.
- 40. Khalid A., Arshad, M. & Zahir, Z.A (2004).** Screening plant growth-promoting rhizobacteria for improving growth and yield of wheat. *J. Appl. Microbiol.*, 96 (3), 473–480.
- 41. Khan M.S., Zaidi, A., Ahemad, M., Oves, M. & Wani, P.A (2010).** Plant growth promotion by phosphate solubilising fungi - Current perspective. *Arch. Agron. Soil Sci.*, 56, 73-98.
- 42. Kirdi B. (2011).** Rôle des PGPR «Plant Growth Promoting Rhizobacteria» dans la croissance végétale et la lutte contre les phanérogames parasites (Doctoral dissertation) 36,47-83.
- 43. Kloepper J & Schroth M. (1981).** Development of a Powder Formulation of Rhizobacteria for Inoculation of Potato Seed Pieces, *Phytopathology*.71,590-592.
- 44. Kumar P & Dubey R. (2012).** Plant growth promoting rhizobacteria for biocontrol of phytopathogens and yield enhancement of *Phaseolus vulgaris*. *Current Perspectives in AppliedMicrobiology*, 1, 6-38.
- 45. Labeda D. P., & Lechevalier, M. P. (1989).** Amendment of the genus *Saccharothrix* Labeda et al. 1984 and descriptions of *Saccharothrix espanaensis* sp.

Références bibliographiques

nov., *Saccharothrix cryophilis* sp. nov., and *Saccharothrix mutabilis* comb. nov. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 39(4), 420-423.

46. Lévêque C. & Mounoulou J.C. (2001). Biodiversité, Dynamique biologique et conservation. *édition Dunod*, Paris.

47. Lepinay C., (2015). Etude des interactions plantes-microbes et microbes-microbes au sein de la rhizosphère, sous un aspect coûts-bénéfices, dans un contexte de variation environnementale, Université de Bourgogne, 2013, 263p.

48. Li J.M., Kremer R.J., 2000 . Rhizobacteria associated with weed seedling in different cropping systems. *Weed Science* 48, 734-741.

49. Lucy M., Reed, E. & Glick, B.R (2004). Applications of free living plant growth promoting rhizobacteria. *Antonie Van Leeuwenhoek.*, 86 (1), 1–25.

50. Martinez-Viveros O, Jorquera MA, Crowley DE, Gajardo G & Mora ML (2010). Mechanisms and practical considerations involved in plant growth promotion by rhizobacteria. *J Soil Sci Plant Nutr* 10,293–319.

51. Moustaine M, Elkahkahi R, Benbouazza A, Benkirane R & Achbani E. (2017). Effect of plant growth promoting rhizobacterial (PGPR) inoculation on growth in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) and characterization for direct PGP abilities in Morocco. *International Journal of Environment, Agriculture Biotechnology*, 2, 238-708.

52. Muscolo A., Panuccio, M. R., Zahir, Z., Mahmood, S., & Nadeem, S. M. (2019). Use of plant growth-promoting rhizobacteria to ameliorate the performance of lentil under salinity. *Journal of Applied Botany & Food Quality*, 92.

53. Mylona P, Pawlowski K & Bisseling T.(1995). Symbiotic nitrogen fixation. *Plant Cel* 17,869-885.

54. Narayanasamy P (2008). Molecular Biology in Plant Pathogenesis and Disease Management. In: *Disease Development*. India: Springer, pp 7-195.

55. Neeraja C., Anil, K., Purushotham, P., Suma, K., Sarma, P., Moerschbacher, B.M. & Podile, A.R (2010). Biotechnological approaches to develop bacterial chitinases as a bioshield against fungal diseases of plants. *Crit. Rev. Biotechnol.*, 30,231-241.

Références bibliographiques

- 56. Normand P & Benson DR. (2012).** Order XVI Frankiales, p 508–510. In Goodfellow M, et al (ed), Bergey's manual of systematic bacteriology, 2nd ed, vol 5. The actinobacteria. Springer, New York, NY.
- 57. Noumavo P. A., Kochoni, E., Didagbé, Y. O., Adjanohoun, A., Allagbé, M., Sikirou, R. & Baba-Moussa, L. (2013).** Effect of different plant growth promoting rhizobacteria on maize seed germination and seedling development. *American Journal of Pla- Pelmont, J. (1995). Bactérie et envirement. Adaptation physiologique, 899 p.*
- 58. Pachico D H. (2005).** Towards a conceptual model of optimal investment in the conservation of agricultural genetic resources. In: International conference on Agricultural Biotechnology: International trade and Domestic production. *Rome, Italy.*p19.
- 59. Palleroni N. J., & Moore, E. R. (2004).** Taxonomy of pseudomonads: experimental approaches. In *Pseudomonas: Volume 1 Genomics, Life Style and Molecular Architecture* (pp. 3-44). Boston, MA: Springer US.
- 60. Panjebashi M., Hadi, M. R. H. S., & Darzi, M. T. (2012).** Effects of the Rhizobium and PGPRs bacterium on seed yield and yield components in chickpea (*Cicer arietinum*).
- 61. Patel D., Jha, C. K., Tank, N., & Saraf, M. (2012).** Growth enhancement of chickpea in saline soils using plant growth-promoting rhizobacteria. *Journal of Plant Growth Regulation, 31, 53-62.*
- 62. Patten C.L. & Glick, B.R (1996).** Bacterial biosynthesis of indole-3-acetic acid. *Can.J.Microbiol., 42 (3),207–220.*
- 63. Paul E. A., & F. E. Clark (1996).** *Soil Microbiology and Biochemistry, 2nd Edition.* Academic Press, New York.
- 64. Peng J., Ma, J., Wei, X., Zhang, C., Jia, N., Wang, X., & Wang, Z. (2021).** Accumulation of beneficial bacteria in the rhizosphere of maize (*Zea mays L.*) grown in a saline soil in responding to a consortium of plant growth promoting rhizobacteria. *Annals of Microbiology, 71, 1-12.* nt Sciences, 4(5), 1013.
- 65. Pérez-Montaña, F., Alías-Villegas, C., Bellogín, R. A., Del Cerro, P., Espuny, M. R., Jiménez-Guerrero, I.& Cubo, T. (2014).** Plant growth promotion in cereal

Références bibliographiques

and leguminous agricultural important plants: from microorganism capacities to crop production. *Microbiological research*, 169(5-6), 325-336.

66. Piano S, Neyrotti V, Migheli Q, & Gullino M. (1997). Biocontrol capability of *Metschnikowia pulcherrima* against *Botrytis* postharvest rot of apple. *Postharvest Biol. Technol.* 11(3),131-140.

67. Ramamoorthy V., Viswanathan, R., Raguchandar, J., Prakasham, T. & Samiyappan, R (2001). Induction of systemic resistance by plant growth promoting rhizobacteria in crop plants against pest and diseases. *Crop Protection.*, 20, 1-11.

68. Reddy P.P (2013). Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR). In: Recent advances in crop protection. India: *Springer*, pp 131–145.

69. Richardson A.E & Simpson, R.J (2011). Soil microorganisms mediating phosphorus availability. *Plant Physiol.*, 156,989-996.

70. Rojas-Solís D,Zetter-Salmón E, Contreras-Pérez M, Rocha-Granados MC, Macías Rodríguez L & Santoyo G. (2018). *Pseudomonas stutzeri* E25 and *Stenotrophomonas maltophilia* CR71 endophytes produce antifungal volatile organic compounds and exhibit additive plant growth promoting effects. *Biocatal Agric Biotechnol* 13,46–52

71. Ryu CM, Farag M, Hu CH, Reddy M, Wei H, Paré PW & Kloepper JW. (2003). Bacterial volatiles promote growth in *Arabidopsis*. *Proc Natl AcadSci USA* 100,4927–4932.

72. Sahgal M., Johri, B. N. (2006). Taxonomy of Rhizobia: current status. *Current science* .90, 488 .

73. Sijilmassi B., Filali-Maltouf, A., Fahde, S., Ennahli, Y., Boughribil, S., Kumar, S., & Amri, A. (2020). In-vitro plant growth promotion of *Rhizobium* strains isolated from lentil root nodules under abiotic stresses. *Agronomy*, 10(7), 1006.

74. Souza J.T., Weller, D.M. & Raaijmakers, M (2003). Frequency, diversity and activity of 2, 4-diacetylphloroglucinol producing fluorescent *Pseudomonas* spp. in Dutch take-all decline soils. *Phytopathology.*, 93, 54-63.

Références bibliographiques

- 75. Souza R.D., Ambrosini, A., Passaglia & L.M.P (2015).** Plant growth-promoting bacteria as inoculants in agricultural soils. *Genet. Mol. Biol.*, 38, (4), 401-419.
- 76. Sornay P. (1913).** Les plantes tropicales alimentaires et industrielles de la famille des légumineuses. A. Challamel
- 77. Spaepen S., Vanderleyden, J. & Remans.RN (2007).** Indole-3-acetic acid in microbial and microorganismplant signaling. *FEMS Microbiol. Rev.*, 31, 425–448.
- 78. Spaepen S. & Vanderleyden, J(2011).** Auxin and Plant-Microbe Interactions. Cold Spring Harb. *Perspaect Biol.*, 3(4),1-13.
- 79. Taylor KG, Konhauser KO. (2011).** Iron in Earth surface systems: a major player in chemical and biological processes. *Elements* 7,83–88.
- 80. Terakado-Tonooka J., Ohwaki, Y., Yamakawa, H., Tanaka, F., Yoneyama, T., Fujihara, S (2008).** Expresses nifH genes of endophytic bacteria detected in field-growth sweet potatoes (*Ipomoea batata* L.). *Microbes Environl.*, 23,89-93.
- 81. Thaweenut N., Hachisuka, Y., Ando, S., Yanagisawa, S., Yoneyama, T (2011).** Two seasons' study on nif H gene expression and nitrogen fixation by diazotrophic endophytes in sugarcane (*Saccharum* spp. hybrids): Expression of nifH genes similar to those of rhizobia. *Plant Soil.*, 338,435-449.
- 82. Tourene M. (2018).** Identification de bactéries associées au genre *Genista*. Mémoire de Master, Ecologie Microbienne. Université A. MIRA – Bejaia, pp. 9-11.
- 83. Torres A.R, Kaschuk, G., Saridakis, G.P., Hungria, M (2012).** Genetic variability in Bradyrhizobium japonicum strains nodulating soybean *Glycine max* (L.) Merrill. *World J. Microbiol. Biotechnol.*, 28,1831-1835.
- 84. Turan M., Gulluce, M., Cakmakci, R., Oztas, T., & Sahin, F. (2010).** The effect of PGPR strain on wheat yield and quality parameters. Proceedings of the 19th World Congress of Soil Science; *Soil Solutions for a Changing World*, 209-212.
- 85. Upadhyay S. K., Singh, J. S., Saxena, A. K., & Singh, D. P. (2012).** Impact of PGPR inoculation on growth and antioxidant status of wheat under saline conditions. *Plant Biology*, 14(4), 605-611.

Références bibliographiques

- 86. Vejan P.; Abdullah, R.; Khadiran, T.; Ismail, S. & Nasrulhaq Boyce, A (2016).** Role of plant growth promoting rhizobacteria in agricultural sustainability - A review. *Molecules*, 21, 573.
- 87. Van Tieghem, M. P., & Douliot, H. (1888).** Origine, structure et nature morphologique des tubercules radicaux des Legumineuses. *Bulletin de la Société Botanique de France*, 35(2), 105-109.
- 88. Verma JP et al (2010).** Impact of plant growth promoting rhizobacteria on crop production. *Int JAgric Res* 5,954–983.
- 89. Vessey J. K. (2003).** Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant and soil*, 255, 571-586.
- 90. Wang ET & Martinez-Romero E. (2000).** Sesbania herbacea-Rhizobium huautlense nodulation in flooded soils and comparative characterization of S. herbacea - nodulating rhizobia in different environments. *Microb Ecol* 40,25–32.
- 91. Welbaum G., Sturz, A.V., Dong, Z. & Nowak,J.(2004).** Fertilizing soil microorganismsto improve productivity of agroecosystems. *Critical Reviews in Plant Sciences* 23,175-193.
- 92. Went F.W. & Thimann, K.V.(1937).** Phytohormones., New York: *The Macmillan Company*. pp 1-256.
- 93. Yala A., Chouih, S., Rispaïl, N., & Benchabane, M. (2018).** Tracheomycosis biocontrol by PGPR: case of pea fusarium with *Pseudomonas fluorescens*.
- 94. Yan Z., Reddy M.S., Ryu C.M., Mc Inroy J.A., Wilson M. & Kloepper J.W (2002).** Induced systemic protection against tomato late blight elicited by PGPR. *Phytopathol.*, 92, 1329-1333.
- 95. Yang J., Lan, L., Jin, Y., Yu, N., Wang, D., & Wang, E. (2022).** Mechanisms underlying legume–rhizobium symbioses. *Journal of Integrative Plant Biology*, 64(2), 244-267
- 96. Zahir A.Z., Arshad, M. & Frankenberger, W.T. Jr (2004).** Plant growth promoting rhizobacteria: *application and perspectives in Agriculture*. *Adv Agron.*, 81,97 168.

Références bibliographiques

- 97. Zahran H.H (2001).** Rhizobia from wild legumes: diversity, taxonomy, ecology, nitrogen fixation and biotechnology. *J. Biotechnol.*, 91, 143-153.
- 98. Zhang S., Thomas L. White, T.L., Martinez, M.C., McInroy, J.A., Kloepper, J.W. & Klassen, W (2010).** Evaluation of plant growth-promoting rhizobacteria for control of Phytophthora blight on squash under greenhouse conditions. *Biol Control.*, 53,129–135.
- 99. Zhour H., Bray, F., Dandache, I., Marti, G., Flament, S., Perez, A & Peltier, J. B. (2022).** Wild wheat rhizosphere-associated plant growth-promoting bacteria exudates: effect on root development in modern wheat and composition. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(23), 15248.
- 100. Zhu H., Choi, H.K., Cook ,D .R. & Shoemaker, R.C. (2005).** Bridging Model and Crop legumes through Comparative Genomics. *Plant Physiology* 137, 1189–1196P.

Résumé

Les différents groupes de bactéries associées aux racines qui influencent la croissance des plantes par de multiples mécanismes sont connus sous le nom de "bactéries favorisant la croissance des plantes" PGPR. Ces bactéries influencent la croissance des plantes directement par (la fixation de l'azote, la solubilisation du phosphate, la solubilisation du potassium, la production d'hormones, etc). Ou indirectement par (Synthèse des antibiotiques et Compétition dans la rhizosphère etc.)

Ce travail est une revue bibliographique des études et expériences menées sur l'effet des PGPR sur quelques légumineuses et céréales où les différents travaux ont montré des effets bénéfiques sur la germination, la santé, la vitalité et la nutrition des plantes. Ils influencent la fixation de l'azote, la disponibilité des nutriments, la production de phytohormones. Ils jouent également un rôle important dans la fertilité des sols et améliorent considérablement le rendement et la croissance des cultures.

Mots clés : Plantes, PGPR, céréales, légumineuses

Summary

The different groups of root-associated bacteria that influence plant growth by multiple mechanisms are known as 'plant growth-promoting bacteria' PGPR. These bacteria influence plant growth directly through (nitrogen fixation, phosphate solubilisation, potassium solubilisation, hormone production, etc.) or indirectly through (antibiotic synthesis and competition in the rhizosphere, etc.).

This work is a bibliographical review of the studies and experiments carried out on the effect of PGPR on a number of legumes and cereals, where the various studies have shown beneficial effects on germination, health, vitality and plant nutrition. They influence nitrogen fixation, nutrient availability, phytohormone production. They also play an important role in soil fertility and significantly improve

Key words: Plants, PGPR, cereals, legumes

ملخص

تُعرف المجموعات المختلفة من البكتيريا المرتبطة بالجذور التي تؤثر على نمو النبات بأليات متعددة باسم البكتيريا المعززة لنمو النبات "PGPR"

تؤثر هذه البكتيريا على نمو النبات بشكل مباشر من خلال (تثبيت النيتروجين، إذابة الفوسفات، إذابة البوتاسيوم، إنتاج الهرمونات وغيرها) أو بشكل غير مباشر من خلال (تخليق المضادات الحيوية والمنافسة في الغلاف الجذري، إلخ)

هذا العمل عبارة عن استعراض ببليوغرافي للدراسات والتجارب التي أجريت على تأثير PGPR

على عدد من البقوليات والحبوب، حيث أظهرت الدراسات المختلفة تأثيرات مفيدة على الإنبات والصحة والحيوية وتغذية النبات. فهي تؤثر على تثبيت النيتروجين، وتوافر المغذيات، وإنتاج الهرمونات النباتية. كما أنها تلعب دوراً هاماً في خصوبة التربة وتحسن بشكل كبير من غلة المحاصيل ونموها

الكلمات المفتاحية: النباتات، PGPR، الحبوب، البقوليات