



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Larbi Tébessi -Tébessa
Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie
Département : Êtres vivants



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

Domaine : Sciences de la nature et de la vie

Filière : Sciences biologiques

Option : Ecophysiologie végétale

Thème :

Evaluation du pouvoir stimulateur de croissance "*in situ*" par des bactéries
(PGPR) isolées de la rhizosphère du *Citrullus colocynthis* sur des variétés de
blé dur

Présenté par :

MEKAHLIA Roumaïssa

SAIDANI Amara

Devant le jury composé de :

M.MAALEM Souhail	MCA	Université de Tébessa	Présidente
M. DEKAK Ahmed	MCB	Université de Tébessa	Promoteur
Mme. SGHIR Hanane	MAA	Université de Tébessa	Examinatrice

Date de soutenance : 24 /06/2020

2019/2020

Dédicaces

À mes très chers parents. Ils ont toujours été à mes côtés, pour me protéger, me soutenir, m'encourager. Vos bénédictions ont été pour moi le meilleur soutien durant ce long parcours. Aucun mot ne saurait exprimer ma reconnaissance et ma gratitude à votre égard.

À mes frères : Abdelhalim et Amina, je souhaite toute la réussite dans la vie.

À mes chères amies et tous mes collègues de la Faculté des Sciences exactes et des Sciences Naturelles et de la Vie, Université Arab Tébssi, Tébessa.

À ma famille élargie et mon binôme.

Roumaïssa

Nous remercions Dieu pour sa grâce et lui demandons un paiement et un succès permanents.

Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a donné la vie, le symbole de

Tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite,

À ma mère.

A mon père, école de mon enfance, qui a été mon ombre durant

Toutes les années des études, et qui a veillé tout au long de ma vie

À m'encourager, à me donner l'aide et à me protéger Que dieu les gardes et les protège. A Mon frère et à mes sœurs.

** À mes collègues et collègues*

** A mes amies*

**A tous ceux qui me sont chères.*

**A tous ceux que j'aime.*

Amara

Remerciements

Nous tenons à remercier en particuliers cher promoteur, Dr Ahmed Dekak pour m'avoir encadré tout le long de ce travail, pour son soutien. Il fut toujours présente, nous lui avons reconnaissante pour : sa grande disponibilité, son ouverture d'esprit, son dynamisme et son optimisme, ainsi que pour ses multiples et précieux conseils scientifiques, professionnels et tout simplement humains.

Nous tenons à remercier les membres de jury : Docteur. MAALEM Souhail et Mme. SGHIR Hanane nous venons adresser tous mes remerciements à notre collègue Ali Hannachi pour son octroi des variétés de blé dur pour ce travail.

Nous témoignons aussi, notre profonde gratitude à l'égard des enseignants de la faculté de SNV pour l'intérêt qu'ils ont manifesté à notre formation et tous les efforts qu'ils déployés pour nous permettre de réaliser ce travail dans les meilleures conditions. A tous ceux et celles qui nous ont aidés, de près ou loin, nous disons Merci du fond du cœur.

Résumé

Cette étude qui est réalisée pour la première fois, vise à explorer l'effet des isolats PGPR obtenus à partir de la rhizosphère du *Citrullus colocynthis* capable de solubiliser le phosphate, le potassium et synthétiser l'IAA sur la germination des graines de blé dur (*Triticum durum* var. Vitron). En utilisant deux types d'inoculation directe et avec imbibition, de suivre l'évolution de la germination dans différentes périodes. L'utilisation des outils d'analyse statistique comme ANOVA pour le nombre de graines germées et la modélisation des indices standard de germination par GLM ainsi que l'utilisation de GLMM pour la modélisation des interactions significatives nous permet de constater que le mode d'inoculation par imbibition améliore la germination des graines ainsi que pour la période de germination par contre le type d'inoculation directe à causer la diminution de nombre de graines germées. Il est judicieux d'approfondir les recherches sur le mode et le temps d'inoculation pour mieux cerner d'avantage l'effet de ces PGPR sur la germination du blé dur, continuer le travail par combinaison des PGPR avec d'autres substances stimulatrices de germination afin de mettre au point un biofertilisateur.

Mots clés : PGPR ; *Triticum durum* var. Vitron ; *Citrullus colocynthis* ; Germination des graines

Abstract

This study, which is being carried out for the first time, aims to explore the effect of PGPR isolates obtained from the rhizosphere of *Citrullus colocynthis* capable of solubilizing phosphate, potassium and synthesized IAA on the germination of durum wheat seeds (*Triticum durum* var. Vitron). Using two types of inoculation, direct and with imbibition, following the evolution of germination in different periods. The use of statistical analysis tools such as ANOVA for the number of germinated seeds and the modeling of standard indices of germination by GLM thus the use of GLMM for the modeling of significant interactions allows us to note that the mode of inoculation by imbibition improves the germination of the seeds as well as for the period of germination on the other hand the type of direct inoculation caused the reduction in the number of germinated seeds. It is wise to deepen research on the mode and time of inoculation to better understand the effect of these PGPR on the germination of durum wheat, continue the work by combining PGPR with other stimulating substance germination in order to develop a biofertilizers.

Key words: PGPR; *Triticum durum* var. Vitron; *Citrullus colocynthis* ; Seed germination

المخلص :

يهدف هذا البحث الي دراسة تأثير مجموعة من البكتيريا المحفزة لنمو تم عزلها من جذور نبات الحنظل *Citrullus colocynthis*, هزم البكتيريا قادرة علي إذابة البوتاسيوم والفوسفات وتركيب IAA علي إنبات القمح الصلب . استخدمنا في هذه الدراسة نوعين من التطعيم : تطعيم مباشر وتطعيم عن طريق التشرب ,ولمتابعة تطور الإنبات في فترات مختلفة ,استخدمنا أدوات التحليل الإحصائي لحساب بذور المنبئة وتعديل المؤشرات القياسية للإنبات بواسطة GLM وبالتالي فان استخدام GLMM لنمذجة التفاعلات يسمح لنا بملاحظة إن التطعيم عن طريق التشرب تحسن انبات البذور وكذلك بالنسبة لفترة الإنبات من ناحية اخرة , فإن نوع التطعيم المباشر له تأثير سلبي علي عدد البذور المنبئة .

التعمق والقيام بالمزيد من البحوث وتجارب في فترة ودقة وضع التطعيم نستطيع الوصول بيه إلي فهم تأثير البكتيريا المحفزة للنمو علي إنبات القمح الصلب ومواصلة العمل يكون من خلال الجمع بين البكتيريا ومادة محفزة للإنبات من اجل تطوير سماد حيوي طبيعي

الكلمات المفتاحية : البكتيريا المحفزة للنمو ; الحنظل *Citrullus colocynthis* ; القمح الصلب , إنبات البذور

Liste des figures

Figures	Titres	Pages
Figure 1	Schéma présente une coupe de la rhizosphère	4
Figure 2	Représentation schématique des zones de la rhizosphère	6
Figure 3	La structure de la rhizosphère	6
Figure 4	L'activité microbiologique de la rhizosphère	8
Figure 5	Interaction entre PGPR et les plantes	11
Figure 6	Interactions entre les plantes et les bactéries dans la rhizosphère	12
Figure 7	Solubilisation du phosphore utilisé par le PGPR	15
Figure 8	Mécanismes d'action des bactéries solubilisant les phosphates	16
Figure 9	Mécanismes de solubilisation du P et du K par les PGPR	16
Figure 10	Rôle de l'acide indole acétique dans l'amélioration de la croissance végétale	19
Figure 11	Les principales voies métaboliques de la synthèse de l'AIA et ses analogues à partir du tryptophane	20
Figure 12	<i>Citrullus Colocynthis</i>	27
Figure 13	Ajustement du pH de milieu nutritif	29
Figure 14	Boîtes de Pétri des différentes souches bactériennes utilisées	30
Figure 15	Cultures bactériennes dans milieu liquide	31
Figure 16	Placées les grains dans un tube à essai avec la culture bactérienne.	31
Figure 17	Plan expérimentale	32
Figure 18	Histogramme montrant l'effet Isolats, le mode d'inoculation et les périodes sur la graine de blé germination	35
Figure 19	Diagramme des interactions entre les paramètres étudiés	38

Liste des tableaux

Tableaux	Titres	Pages
Tableau 1	Diversité des souches bactériennes identifiées comme inducteurs de la résistance systémique chez les plantes et la diversité des pathogène dans lesquels l'ISR est impliquée	23
Tableau 2	Représentant les souches des bactéries et leur propriétés	27
Tableau 3	Classification de blé dur	28
Tableau 4	Composition des milieux de différenciation des pseudomonas sp	28
Tableau 5	ANOVA Nombre de grains germés	36
Tableau 6	Model linéaire général (GLM) des tests de germination standard	36
Tableau 7	Model linéaire général mixte (GLMM) de nombre de grains germe	39
Tableau 8	Comparaisons multiples des moyennes des interactions des facteurs au témoin a un seuil de signification ($\alpha = 5\%$)	40

Sommaire

Chapitre I : synthèse bibliographique	1
Introduction	2
1. Généralités sur la rhizosphère	4
2. La microbiologie rhizosphérique	6
3. Les Rhizobactéries promotrices de la croissance des plantes	7
3.1. Définition de Rhizobacteria (PGPR)	8
3.2 Biodiversité des PGPR dans la rhizosphère	8
3.2.1. Les Rhizobia	8
3.2.2. Les PGPR diazotrophes	8
3.2.2.1. Azotobacter	8
3.2.2.2. Azospirillum	9
3.2.2.3. Azoarcus	9
3.2.3. Bacillus	10
3.2.4. Pseudomonas	10
3.3. Les interactions PGPR-racine	10
3-4. Mécanismes impliqués dans la stimulation de la croissance des plantes par les PGPR	12
A- Les mécanismes directs	13
A-1. Stimulation de germination des grains	13
A-2. La fixation de l'azote	14
A-3. Solubilisation du phosphore	13
A-4. La solubilisation du potassium	16
A-5. La production des phytohormones	16
A.5.1. Acide salicylique	17
A-5.2. Ethylène	17
A.5.3. Cytokinines	17
A.5.4. Gibbérellines	17
A.5.5. L'auxine	18
a. Synthèse et conjugaison des auxines dans les racines	18

b. L'acide Indole Acétique	18
B -Les mécanismes indirects	20
B-1. La production des antibiotiques	21
B-2. La compétition pour l'espace et les nutriments	21
B-3. La résistance systémique induite	21
B-4. Composés volatiles	23
B.5. Production d'enzymes	24
B.6. Compétition pour le fer et la production de sidérophores	24
Chapitre II : Materials et méthode	25
1. Présentation des souches	27
2. Présentation du matériel végétal	27
3. Le sol	28
4. protocole expérimentale	28
4.1. Préparation les souches	28
4.1.1. Préparation de milieu nutritif	28
4.1.2. Ensemencement des isolats dans milieu solide	29
4.1.3. Transfert des isolats dans milieu liquide	30
4 .2. Inoculation des grains	31
4.2.1. Stérilisation des grains	31
4.2.2. Inoculation des grains	31
5. Conditions d'expérimentation	31
6. plan expérimentale	32
7. Les indices de germination standard	32
7.1. Pourcentage de germination finale (PGF%)	32
7.2. Indice de vitesse de germination (IVG)	33
7.3. Coefficient de germination (Coef Ger)	33
7.4. Taux de germination relatif (TGR)	33
8. Les analyses statistiques	33
Chapitre III : Résultats et discussions	34

1. Résultat	35
1.1. Effet des traitements sur le nombre de graines germées	35
1.2. Tests de germination standard	36
1.3. Effet des interactions des traitements sur la germination	37
2. Discussion	40
Conclusion	42
Chapter IV: Références bibliographies	43
Annexes	

Listes des abréviations

PGPR: plant Growth Promoting Rizobacteria

Ca: calcium

N₂ : Azote Atmosphérique

SPB : les bactéries à potentiel de solubilisation de phosphate

ACC : 1-aminocyclopropane-1-carboxylante

IAI : l'acide Indole Acétique

ml : millilitre

ISR : la résistance systémique

ID : Inoculation directe

II : Inoculation Imbibition

Chapitre 1
Synthèse bibliographique

Introduction

La tâche d'augmenter la production de blé est devenue écrasante. Il est urgent de répondre à la demande croissante sous des contraintes telles que l'épuisement des ressources naturelles, les fluctuations environnementales. La salinité, l'alcalinité, la carence en nutriments et l'engorgement sont quelques-unes des principales contraintes affectant la culture du blé. La faible capacité d'infiltration du sol, la stagnation de l'eau et la réduction des activités biologiques du sol ont un impact négatif sur la germination des semences de blé et la productivité du sol.

Un large éventail de micro-organismes, allant de pathogène à bénéfique, interagissent en continu avec les plantes supérieures dans l'écosystème du sol, influençant la croissance, développement et fonctions des plantes (**Taghavi et al., 2009**). Bactéries capables de coloniser les systèmes racinaires et favoriser la croissance des plantes sont appelés rhizobactéries (PGPR). Ces derniers peuvent affecter la croissance des plantes soit indirectement soit directement. La promotion indirecte de la croissance des plantes se produit lorsque PGPR atténue ou prévient les effets délétères d'un ou de plusieurs organismes phytopathogènes. La promotion directe de la croissance des plantes par PGPR consiste soit à fournir aux plantes certains composés synthétisés par des bactéries ou faciliter l'absorption des nutriments du sol (**Glick, 1995 ; Lugtenberg & Kamilova, 2009**). D'autre part, les bactéries nuisibles de la rhizosphère sont définies comme des rhizobactéries qui inhibent la croissance des plantes sans provoquer de symptômes ou de maladie (**Brimecombe et al., 2007**)

L'utilisation de micro-organismes en agriculture est à un niveau faible malgré l'investissement dans les travaux scientifiques. Les inoculants microbiens peuvent être utilisés comme alternative aux engrais chimiques en raison de l'effet néfaste des pesticides et des insecticides. Promotion de la croissance des plantes les rhizobactéries (PGPR) sont de tels groupes de bactéries qui colonisent la rhizosphère et améliorent la croissance des plantes (**Kloepper et Schroth 1978**).

Lorsqu'elles sont appliquées aux graines ou aux cultures, les rhizobactéries améliorent la croissance de la plante ou réduisent les dommages des agents pathogènes transmis par le sol ou produisent des composés comme les phytohormones, auxines, cytokinines et gibbérellines qui stimulent la croissance des plantes (**Dashti et al., 2000**)

L'utilisation du PGPR peut être utilisée à l'avenir pour améliorer la production agricole. Les PGPR jouent également un rôle important dans l'amélioration de la croissance des racines et agissent comme des concurrents microbiens efficaces dans la zone racinaire. Des effets

significatifs ont été observés sur le blé. L'utilisation de PGPR réduit les agents pathogènes transmis par le sol et améliore ainsi la croissance des plantes directement ou indirectement (Laloo et al., 2017)

Notre travail s'enregistre dans l'évaluation du pouvoir PGPR de cinq isolats obtenus de la rhizosphère du *Citrullus colocynthis* sur la germination des graines de blé dur (*Triticum durum* var. Vitron) caractérisés par trois traits PGPR qui sont la production de l'indole-3-acetic Acid (IAA) et la solubilisation du Phosphate et le Potassium en utilisant deux types d'inoculation directe et avec imbibition, de suivre l'évolution de la germination dans différentes périodes

1. Généralités sur la rhizosphère

La rhizosphère telle qu'elle a été définie par (hiltner ,1904), est le volume du sol qui entoure les racines et dans lequel la microfaune est influencée par ces dernières. C'est un microécosystème abritant les microorganismes qui sont constitués principalement d'algues microscopiques, protozoa, des champignons et de bactéries, certains groupes sont phytopathogènes d'autres sont bénéfiques à la plante (Raaijmakers ,2009). Cette partie du sol est le siège d'interaction mutuelle entre le sol, ses microorganismes et la plante. Le terme rhizosphère signifie étymologiquement rhiza "racine" et sphaera "ce qui entoure » (hiltner ,1904).

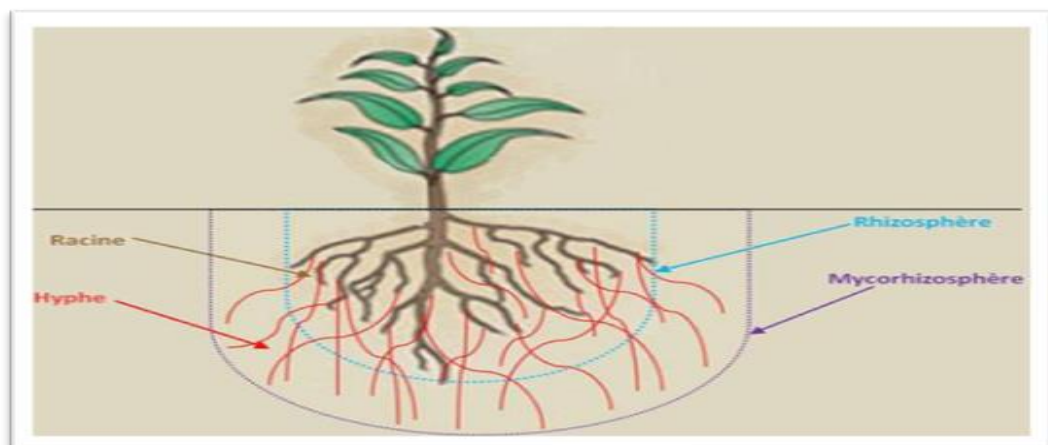


Figure 01. Schéma présente une coupe de la rhizosphère (Stengel et Gelin, 1998)

la rhizosphère est ainsi une niche écologique qui « éveille » et stimule les diverses activités microbiennes qui participeront très significativement au fonctionnement du cycle de nutriments majeurs et des oligo-éléments et aux transformations qui conduiront à des transferts vers les

plantes, les eaux, l'atmosphère (Pedro., 2007), la rhizosphère serait le théâtre de processus de transformation de minéraux (par exemple, altération,...) intervenant dans le cycle des éléments associés au cycle de l'eau et dont les acteurs et leurs jeux sont encore bien mal connus (Gobat et al., 2003 in Pedro 2007). La rhizosphère est un environnement écologique remarquable colonisé par de nombreux micro-organismes. Les communautés distinctes des micro-organismes sont associées aux systèmes racinaires de toutes les plantes supérieures (Khalid et al., 2006). La rhizosphère est un environnement écologique remarquable colonisé par de nombreux micro-organismes. Les communautés distinctes des micro-organismes sont associées aux systèmes racinaires de toutes les plantes supérieures (Khalid et al., 2006). Ces êtres vivants sont requis dans le processus de la décomposition et le recyclage des nutriments dans la rhizosphère (Germida et al., 1998). Par ailleurs, la communauté microbienne joue un rôle notable dans l'amélioration et la stabilisation de la structure du sol. Plusieurs études ont montré que l'agrégation et la stabilité d'un sol dépendent de sa nature et de sa teneur en matière organique (Elustondo et al., 1990). La matière organique produite par les racines a un effet direct sur la stabilisation des agrégats du sol et indirect sur la stimulation des activités microbiennes de la rhizosphère (Angers et Mehuys, 1989). Les communautés microbiennes jouent aussi un rôle significatif dans l'état de santé des plantes, certaines sont nuisibles, d'autres sont bénéfiques et certaines ne semblent avoir aucun effet. De nombreuses interactions, bénéfiques (symbioses) ou non, voire délétères (pathogénie) sont observées entre plantes, bactéries et champignons du sol. Parmi les interactions bénéfiques aux plantes, on peut citer les symbioses fixatrices d'azote, les associations avec les bactéries promotrices de croissance ou de santé (phénomène de suppression de maladie), ou les interactions avec les champignons mycorrhizogènes. Les effets délétères sont souvent liés à l'action de bactéries ou champignons pathogènes. Ils peuvent aussi être liés à des phénomènes de parasitisme végétal qui conduisent à l'impossibilité pour certains végétaux d'occuper le même espace de sol (effet d'inhibition de croissance de l'un des deux sur l'autre). Les protozoaires et nématodes qui se nourrissent sur des bactéries sont aussi concentrés autour des racines. Ainsi, la plupart des cycles des nutriments et des phénomènes de prédation se déroule dans la zone immédiatement adjacente aux racines, siège d'une activité métabolique intense (Dommergues, 1978). Cet environnement particulier incluant autant des micro-organismes bénéfiques que pathogènes exerce une influence importante sur la croissance et le rendement des cultures végétales (Hinsinger, 1998). La diversité et la prédominance de la population microbienne de la rhizosphère dépendent d'un certain nombre de facteurs abiotiques et biotiques prévalant dans une niche écologique particulière. D'une façon générale, la structure des racines et la composition des exsudats

racinaires changent durant le développement de la plante et sous l'effet des conditions environnementales telles que la disponibilité de l'eau et la température. Par conséquent, la dynamique de la population microbienne rhizosphérique peut aussi changer. En effet, les plantes, grâce à l'émission des signaux spécifiques, exercent une pression sélective qui tend généralement à réduire la diversité microbienne et à favoriser des espèces ou des souches particulières (Bertrand et al, 2000). En outre, la compétition entre les microorganismes pour les nutriments, la colonisation des sites, la production des antibiotiques et des bactériocines contribuent à cette dynamique microbienne dans la rhizosphère.

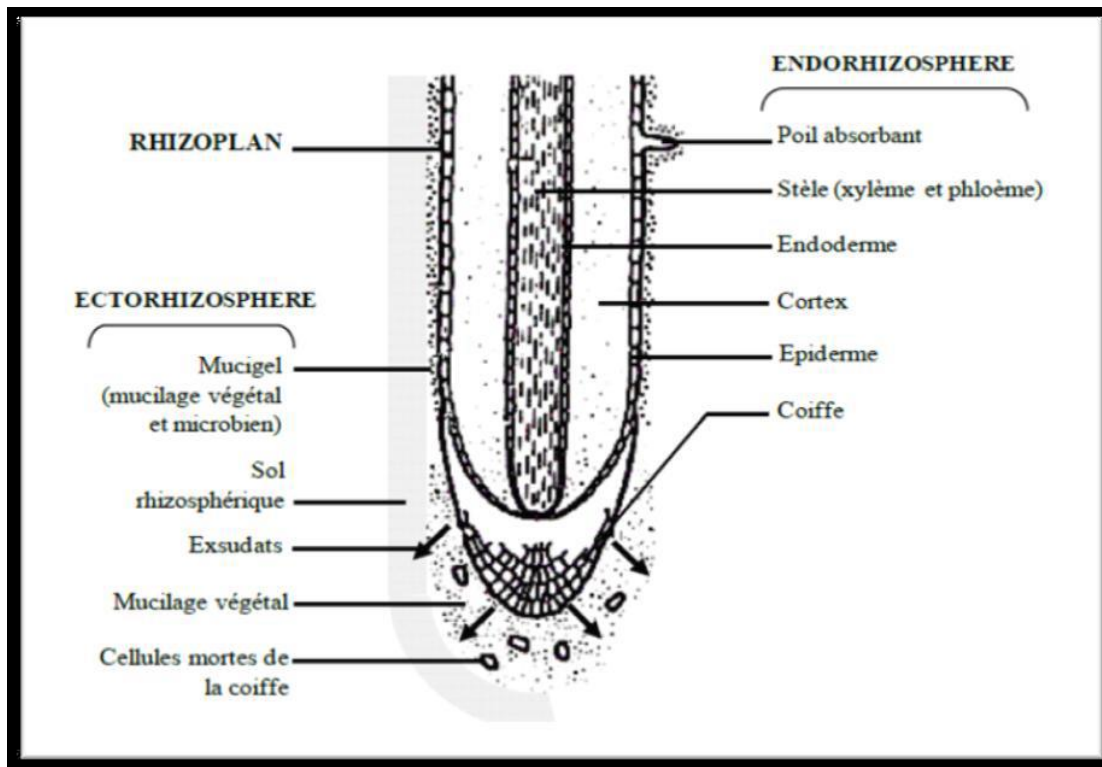


Figure 02 : Représentation schématique des zones de la rhizosphère (LEPINAY, 2015).

2. La microbiologie rhizosphérique

La microbiologie du sol est complexe et varie, elle comprend les bactéries, des champignons, des protozoaires et des virus. La distribution des micro-organismes du sol est hétérogène et dépend des facteurs nutritionnels et des facteurs physico-chimiques (PRESCOTT et al, 2003)

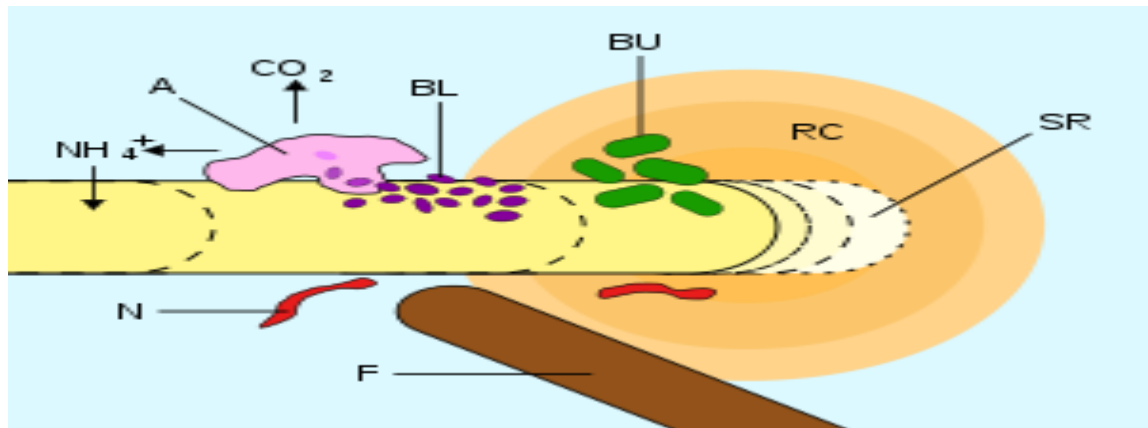


Figure 03 : La structure de la rhizosphère (PRESCOTT et al, 2003)

A=Amibe digérant une bactérie F= Mycélium d'un champignon BL= Bactérie à énergie limitée SR= Poils absorbants racinaires BU= Bactérie à énergie non limitée

Les bactéries sont les organismes les plus nombreux et représentent en moyenne $6 \cdot 10^8$ cellules par gramme de sol et un poids de 10000 kg/ha équivalant à 5% du poids sec des composés organiques du sol. On définit alors les bactéries associées aux racines des plantes comme les rhizobactéries. Celles-ci sont généralement des souches très compétitives capables de coloniser le système racinaire riche en éléments nutritifs, tout au long du cycle de développement de la plante (Kloepper, 1993). Si la plante libère des composés l'inverse elle prélève de l'eau et des éléments minéraux indispensables à son métabolisme. Les échanges entre la plante et le sol sont influencés par les rhizobactéries et ce d'autant plus que leur densité et leur activité sont élevées. Les rhizobactéries sont des hétérotrophes typiques, elles nécessitent donc des composés organiques comme source d'énergie. Leurs besoins sont entièrement comblés à l'intérieur même de la rhizosphère. Les rhizobactéries utilisent en effet de nombreux substrats provenant de la plante : les cellules corticales et épiderme des racines qui se détachent, les polysaccharides du mucilage racinaire, les sucres et les acides aminés et organiques des exsudats racinaires, etc. (Campbell et Greaves, 1990). L'abondance des bactéries dans le sol s'explique par leur multiplication rapide et leur capacité à utiliser une grande variété de substrats comme sources d'énergie et d'éléments nutritifs (Glick, 1995). Les microorganismes rhizosphériques incluent les symbiotes (*Rhizobia*, actinobactéries et champignons mycorhiziens) et les saprophytes libres. Les microorganismes rhizosphériques en général, et les bactéries diazotrophiques en particulier, exercent sur les plantes divers effets. Par ailleurs, l'association des bactéries avec les racines a des influences importantes sur la santé de la plante, la productivité et la qualité du sol (Konate, 2007). La colonisation des racines par les bactéries est observée depuis longtemps, mais seulement dernièrement, son importance pour la croissance et le développement des plantes est devenu clair (Glick, 1995). La quantité et la composition des exsudats racinaires

conditionnent également la nature des activités bactériennes. Ces activités résultent de la synthèse de métabolites tels que les antibiotiques, sidérophores, substances de croissance, acide cyanhydrique, lipopolysaccharides (Voisard et al, 1989 ; Van Peer et al, 1991). Cette influence se manifeste par une modification de la croissance de la plante et de la fréquence

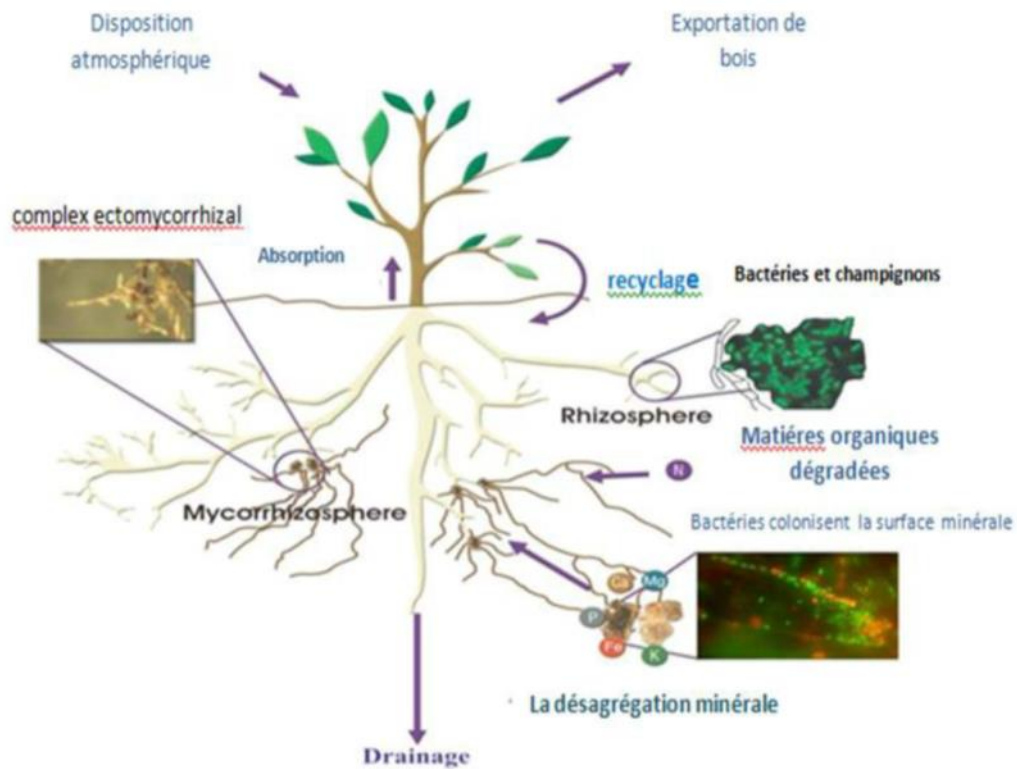


Figure 04 : l'activité microbiologique de la rhizosphère (vittorio et al, 2016)

3. Les Rhizobactéries promotrices de la croissance des plantes.

Des infections fongiques de la racine (Kloepper, 1993). Ces rhizobactéries sont considérées comme des concurrents microbiens efficaces dans la zone racinaire. L'effet visible des associations plante-microbe sur la croissance de plantes peut être positif, neutre, ou négatif. Certaines bactéries inhibent la croissance alors que d'autres la stimulent. Ces dernières sont souvent mentionnées comme des rhizobactéries promotrices de la croissance des plantes (Plant Growth Promoting Rhizobacteria : PGPR) (Kloepper et al., 1989 ; Zahir et al, 2004). Au cours des dernières décennies, un nombre très important de bactéries ont montré une capacité d'améliorer la croissance de la plante (Kloepper, 1992 ; Glick, 1995).

3.1. Définition de Rhizobacteria (PGPR)

Le terme « PGPR » « Plant Growth Promoting Rhizobacteria » synonyme des rhizo bactéries phytostimulatrices a été attribué à ce groupe la première fois par Kloepper et Schroth (1978) Les rhizobactéries sont des bactéries qui présentent l'aptitude à coloniser les racines de façon

intense (SCHROTH et HANCOCK, 1981, 1982). Les bactéries non symbiotiques répondant à cette définition appartiennent à différents genres et espèces dont les plus étudiés sont : *Agrobacterium radiobacter*, *Azospirillum* spp, *Bacillus* spp, *Pseudomonas* spp fluorescents (LEMANCEAU., 1992). Les PGPR sont donc les bactéries qui colonisent la rhizosphère des plantes. Ainsi, une rhizobactérie est dite PGPR si, inoculée dans la rhizosphère d'une plante, elle est capable de lui apporter un effet bénéfique (Aouane et Hamani, 2017). Les PGPR ou « Plant Growth-Promoting Rhizobacteria » sont des bactéries qui se développent dans la rhizosphère, et qui ont un effet positif sur la plante, pour ces effets on les considère comme Rhizobactéries promotrice de la croissance végétale (Dey et al., 2004). Ces bactéries sont utilisées en agriculture pour la biofertilisation des sols (Glick, 1995). PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria). Ces éléments sont connus pour avoir cla racine (Rangarajan et al, 2001). Ces organismes peuvent aussi être bénéfique à la plante en stimulant sa croissance (Bloemberg et Lugtenberg, 2001).

3.2 Biodiversité des PGPR dans la rhizosphère

3.2.1. Les Rhizobia

La mise en place d'une interaction non spécifique des Rhizobia avec les racines des plantes non légumineuses a favorisé les espèces de ce genre de devenir des PGPR, outre leurs activités fixatrices de l'azote atmosphérique, les Rhizobia contribue considérablement à l'amélioration de la disponibilité des phosphates pour la plante par mobilisation de formes organiques et inorganiques (Sahran et Nohr, 2011). Elles peuvent produire des phytohormones, des siderophores et de l'HCN, avec la capacité de coloniser les racines de plusieurs types de plantes non légumineuses. Les Rhizobia ont manifesté un grand intérêt lors de leur utilisation comme agents de bio-control. (Antun et Prevost, 2005).

3.2.2. Les PGPR diazotrophes

Les bactéries libres fixatrices d'azote sont utilisées pour la stimulation de la croissance des plantes. La disponibilité d'une source d'énergie pour l'établissement du processus de fixation de l'azote constitue une principale limitation, compensée par le rapproche vers l'intérieur de la plante. *Azoarcus* sp., *Gluconacetobacter diazotrophicus*, *Herbaspirillum* sp et *Azotobacter* sp forment un groupe bactérien non symbiotique fixateur d'azote. (Ahmad et al., 2008)

3.2.2.1. *Azotobacter*

Azotobacter paspali, décrite par (Dobereiner et Pedrosa, 1987) est une bactérie aérobie stricte, non symbiotique, fixatrice de l'azote atmosphérique, isolée à partir de la rhizosphère de

Paspalumnotatum, une herbe tropicale qui possède une grande spécificité d'hôte. *Azotobacter paspali* affecte positivement la germination des graines et leur développement, il est noté que l'inoculation des cultures de blé par ce genre augmente le rendement de 30% (**Saharan et Nohar, 2011**).

3.2.2.2. *Azospirillum*

Les espèces d'*Azospirillum*, isolées à partir des rhizosphères de plusieurs céréales à travers le monde principalement dans des régions tropicales et tempérées sont utilisées depuis les années 1970. Cette bactérie initialement sélectionnée par sa capacité fixatrice de l'azote atmosphérique représente un bon candidat PGPR (**Antoun et Prevost, 2005**).

3.2.2.3. *Azoarcus*

Azoarcusa gagné une grande attention due principalement à sa grande diversité génétique et métabolique, divisé en trois genres : *Azovibrio*, *Azospira* et *Azonexus*, qui se différencient des autres genres par leur capacité de se développer lors de l'utilisation des acides carboxyliques et de l'éthanol au lieu des sucres avec une température optimale de croissance comprise entre 37-42°C (**Reinhold et al, 1986**). *Azoarcus* est une bactérie endophyte du riz et est considérée comme un modèle de bactéries endophytes fixatrices d'azote (**Ahmad et al, 2008**).

3.2.3. *Bacillus*

Certaines espèces de genre *Bacillus* sont des diazotrophes, notamment *B. subtilis*, isolée à partir des rhizosphères de diverses plantes à des concentrations supérieures à 10⁷ bactéries par gramme de sol rhizosphérique (**Antoun et Prevost, 2005**).

3.2.4. *Pseudomonas*

Les *Pseudomonas* et les *Pseudomonas* fluorescentes sont des bactéries ubiquistes, rencontrées souvent dans les sols, classées comme étant les meilleurs candidats PGPR (**Sahran et Nohra, 2011**). Les effets bénéfiques de la bactériisations des graines sont observés lors de l'inoculation des graines de pomme de terre (*Solanum tuberosum*) par *P. fluorescens* et *P. putida* (**Alabouvette et al, 2012**) ont démontré que lors de l'utilisation de *Fusarium oxysporum* non pathogènes, *P. fluorescens* et *P. putida* se manifestent comme principales candidates de contrôle biologique du flétrissement fusarien, avec une application bénéfique pour la suppression des fusarioses chez plusieurs espèces des plantes (**Chung et al, 2005**).

3.3. Les interactions PGPR-racine

La plupart des plantes terrestres développent leur système racinaire pour explorer le sol et trouver les nutriments nécessaires à la croissance. La racine est un organe complexe constitué de régions distinctes telle que la pointe de la racine, le méristème de la racine, les zones de

différenciation et d'élongation et les racines latérales émergentes (**Scheres et al, 2002**). Ces régions ont des rôles distincts. Par exemple, les poils absorbants sont des cellules épidermiques différenciées importantes pour la nutrition minérale des plantes. La spécificité fonctionnelle des racines se reflète également au niveau des interactions plantes-microorganismes, chez les fabaceae, par exemple l'extrémité de la racine est la région la plus importante pour initier le processus de colonisation rhizobienne, aboutissant de la colonisation à la formation d'un nodule racinaire (**deshosses et stongaard, 2011**). Chez les poaceae, les poils absorbants et les racines latérales sont de préférence colonisés par les PGPR, ou ils peuvent exprimer leurs propriétés bénéfiques pour la plante (**Pothier et al, 2007**). L'architecture du système racinaire (RSA) intègre la topologie du système racinaire, la distribution spatiale des racines primaires latérales, ainsi que le nombre et la longueur de différents types de racines. Plusieurs facteurs abiotiques peuvent influencer le RSA, notamment les souches de PGPR. Les PGPR modifient la RSA et la structure des tissus racinaires principalement par leur capacité à interférer avec l'équilibre hormonal de la plante. Il a été démontré que des composés spécifiques d'exsudats de racine, notamment le sucre, agissent sur la production de composés antimicrobiens sécrétés par les *Pseudomonas fluorescens*, avec certains effets dépendants de la souche (**Duffy et Défago, 1999**). Des études ont révélé que le PGPR modifie les exsudats de racine directement ou indirectement par biais d'autres microorganismes bénéfiques tels que les champignons mycorrhiziens arbusculaires (MA), facilitant ainsi la colonisation des racines en subissant une variation de phase. Les toxines produites par les agents pathogènes présents dans les racines et dans le sol peuvent également être dégradées par les PGPR (**Dutta et podile, 2010**). Outre les effets sur les exsudats racinaires, les PGPR peuvent entraîner des modifications de la composition en métabolites de la plante. *Herbaspirillum seropedicae* ont montré une teneur plus élevée en malate et en acides aminés essentiels que celles des plantes témoins (**Curzi et al, 2008**). D'autres études ont porté sur les modifications des métabolites secondaires, ainsi une augmentation de la teneur en composés alcaloïdes et tétraploïdes d'intérêt pharmaceutique a été démontrée dans les plantes médicinales après inoculation avec des PGPR (**Manero et al, 2003 ; Jaleel, 2007**).

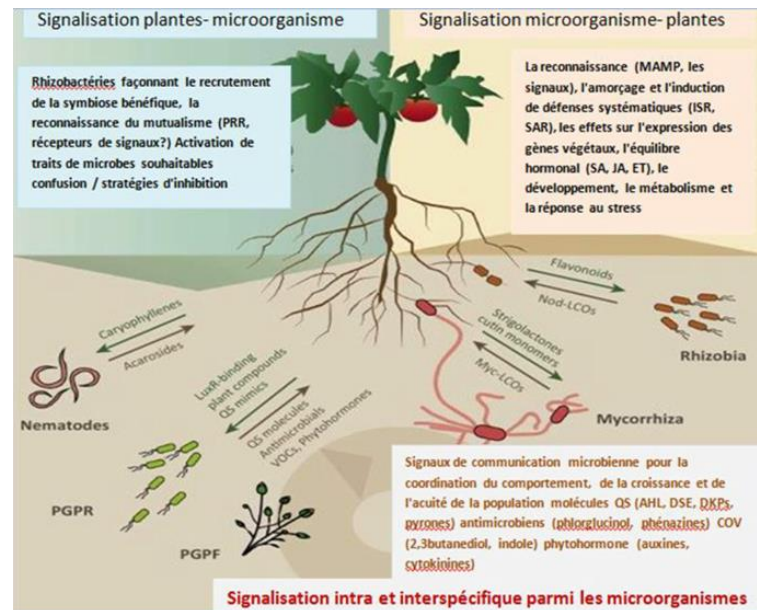


Figure 05 : Interaction entre PGPR et les plantes (Urozet al,2015).

3.4. Mécanismes impliqués dans la stimulation de la croissance des plantes par les PGPR

Plusieurs interactions, bénéfiques (symbioses) ou non, voire délétères (pathogénie) sont observées entre plantes, bactéries et champignons du sol fleuriront l'activité biologique de ce sol. (Emily, 2015). Les PGPR interviennent sur la croissance des plantes selon plusieurs mécanismes, de manière directe ou indirecte (figure. 05). Ces bactéries sont capables de coloniser efficacement les systèmes racinaires et influencent de manière bénéfique la plante en stimulant sa croissance et/ou en la protégeant contre des infections par des agents phytopathogènes. (Hass et Defago, 2005). Les modes directs incluent la fixation d'azote atmosphérique, l'apport de nutriments non disponibles, (phosphore et autres nutriments minéraux), la production de régulateurs de croissance végétale (auxines, cytokinines et gibbérellines) et la répression de la synthèse d'éthylène (Hassen et Labuschagne, 2010). Les mécanismes indirects sont les éliminations des agents phytopathogènes à travers la compétition pour l'espace et les nutriments, la synthèse d'enzymes hydrolytiques, l'inhibition des enzymes ou des toxines produites par les pathogènes, et l'induction des mécanismes de résistance de la plante (Antoun et Prévost., 2005).

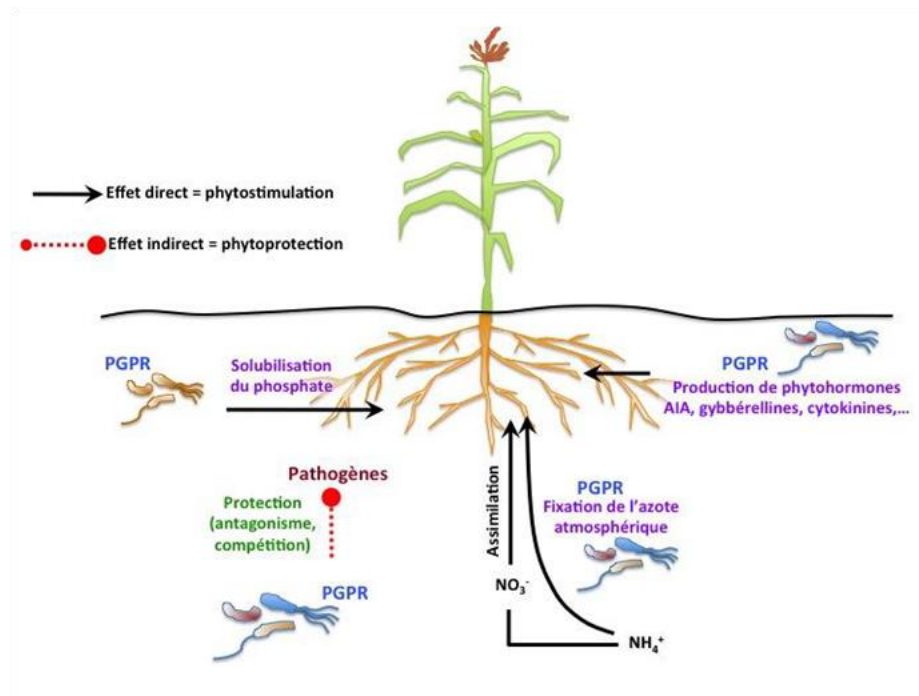


Figure 06 : Interactions entre les plantes et les bactéries dans la rhizosphère (Khan et al., 2009)

A- Les mécanismes directs

L'effet direct de la croissance des plantes peut se produire par plusieurs processus :

A-1. Stimulation de germination des grains

Les PGPR peuvent être utilisées comme biofertilisants efficaces pour l'amélioration des rendements des cultures (**Bashan et al, 2004**). En améliorant les paramètres des rendements, notamment le taux de germination des semences, tel qu'il a été démontré chez des souches d'*Azospirillum*, *Pseudomonas* et *Azobacter* (**Shankat et al, 2006**). Des souches de *Pseudomonas* stimulent la germination de la semence de maïs cultivé dans des sols stérilisés ou non stérilisés sous serre et en plan champ (**Gholami et al, 2009**). L'effet bénéfique des PGPR sur la germination des semences est aussi remarquable par leur pouvoir de coloniser la rhizosphère contre d'autres bactéries inhibitrices de la germination appelées rhizobactéries délétères (DRP) qui sont des saprophytes non pathogènes (**Alstiom, 1991**).

A-2. La fixation de l'azote

L'azote est l'élément nutritif le plus important et sa carence affecte gravement les rendements des cultures. La plupart des sols dans le monde sont pauvres en azote et les applications d'engrais azotés sont essentielles pour atteindre un rendement maximal. Bien que 78% de l'atmosphère est constituée de diazote, mais qui ne peut pas être utilisé par la plupart des organismes et ainsi la disponibilité de l'azote sous une forme appropriée pour l'assimilation

est souvent un facteur limitant majeur pour la croissance des cultures. La production d'engrais azotés chimiques non seulement épuise les ressources énergétiques non renouvelables, mais pose également des risques humains et environnementaux, en plus d'être très coûteuse. L'urée est la source la moins chère et la plus facilement disponible d'azote, mais malheureusement moins de 50% des quantités appliquées sont utilisées par les plantes. Cette faible efficacité d'utilisation est principalement causée par la volatilisation de NH_3 , la dénitrification et les pertes de lessivage. La fixation biologique de l'azote est une source importante d'azote pour les plantes dans le cadre de pratiques agricoles respectueuses de l'environnement. Elle contribue pour 65 % de l'azote total actuellement utilisé dans la production agricole et sera un facteur important pour l'agriculture du futur. Les bactéries symbiotiques fixatrices d'azote comprennent les cyanobactéries et les genres : *Rhizobium*, *Azorhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Sinorhizobium*, *Allorhizobium*, *Mesorhizobium* et *Frankia* (Brock et al, 2000). Les symbioses sont les systèmes majeurs de la fixation de l' N_2 en jouant un rôle significatif dans l'amélioration de la fertilité et en maximisant la productivité des sols pauvres en azote. Les bactéries vivantes librement (non symbiotiques) ainsi que des souches de rhizobia peuvent favoriser la croissance des céréales en contribuant à l'économie de l'azote grâce à leur capacité à fixer l' N_2 (Zahir et al, 2003). Ont également expliqué le rôle possible des mécanismes des bactéries non symbiotiques sur la croissance des cultures du point de vue fixation biologique de l'azote. Fournir aux plantes des éléments nutritifs essentiels, comme le $\text{NH}_4\text{-N}$ par le biais de la fixation de l'azote atmosphérique ou aider la plante à l'absorption des éléments nutritifs sont également considérées comme stimulation de la croissance végétale directe. Les genres les plus importants des bactéries ; non-symbiotiques ; fixatrices d'azote sont : *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Acetobacter*, *Azoarcus*, *Achromobacter*, *Bacillus*, *Burkholderia*, *Clostridia*, *Citrobacter*, *Enterobacter*, *Herbaspirillum*, *Kelbsiella*, *Mycobacterium*, *Pseudomonas*, (Kennedy et Islam, 2001).

A-3. Solubilisation du phosphore

Le phosphore est l'un des principaux éléments nutritifs ; deuxième après l'azote ; dans l'exigence pour les plantes. La plupart du phosphore dans le sol se présente sous la forme de phosphates insolubles et ne peuvent être utilisés par les plantes. Les bactéries à potentiel de solubilisation du phosphate (BSP) pourraient jouer un rôle important dans la fourniture de phosphate aux plantes d'une façon conviviale et durable. Ces microorganismes peuvent convertir les composés phosphatés insolubles en formes solubles et les rendre disponibles aux plantes cultivées. Diverses espèces bactériennes des genres : *Bacillus*, *Rhizobium* et *Pseudomonas* se sont avérés être des bactéries les plus puissantes en solubilisation du phosphate

(Banerjee et al, 2006). Les effets bénéfiques des BSP sur la croissance des plantes varient significativement en fonction des conditions environnementales, des souches bactériennes, du végétale et des conditions du sol (Şahin et al, 2004). La capacité de solubilisation du phosphate dépend également de la nature de la source d'azote utilisée dans le milieu, avec une plus grande solubilisation en présence de sels d'ammonium que lorsque le nitrate est utilisé comme source d'azote. Ceci a été attribué à l'extrusion de protons pour compenser l'absorption de l'ammonium, conduisant à une diminution de pH extra-cellulaire (Roos, 1984). L'abaissement du pH du sol par la production microbienne d'acides organiques tels que (le lactate, le citrate, ...) ainsi que l'extrusion de protons sont les principaux mécanismes de minéralisation de la forme organique du phosphore (Khan et al, 2009). La libération de phosphore à partir de formes insolubles et adsorbées est également un aspect important des BSP concernant la disponibilité du phosphore dans les sols. Ces microorganismes transforment le phosphore du sol en formes qui peuvent facilement être utilisées par les cultures et ils assimilent le phosphore soluble, et le rendent disponible en empêchant son adsorption (Khan et Joergensen, 2009). Les BSP améliorent également la disponibilité du phosphore aux cultures par la solubilisation de ses formes précipitées (Chen et al, 2006). Fe-P, Al-P et Ca-P sont les principales formes de précipité dans les sols acides et alcalins, qui peuvent être solubilisées en impliquant des anions organiques et protons associés. La forme complexe de phosphore adsorbé peut être libérée par des ions métalliques chélateurs par des réactions d'échange de ligands (Bünemann et al, 2004).

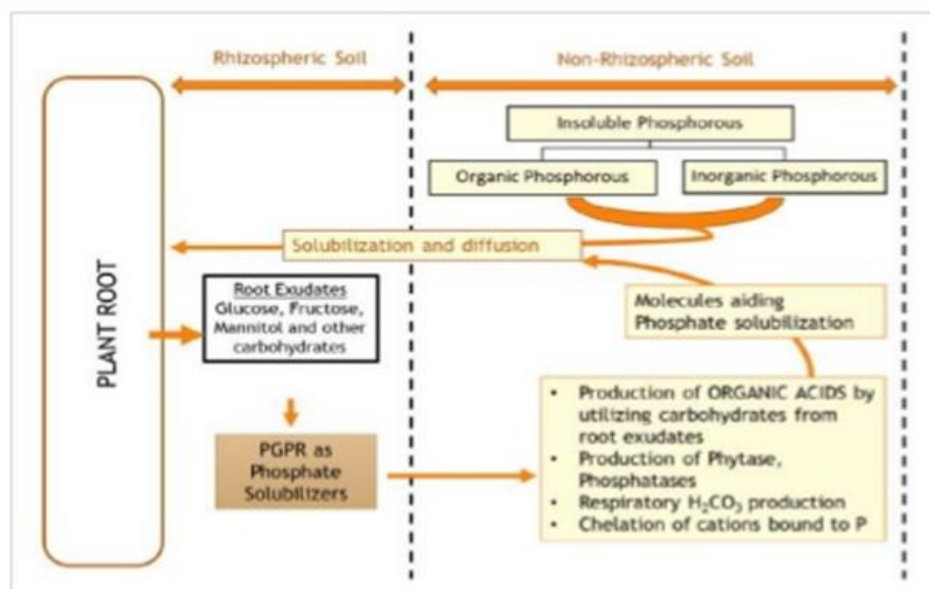


Figure 07 : solubilisation du phosphore utilisé par le PGPR (Goswami et al, 2016)

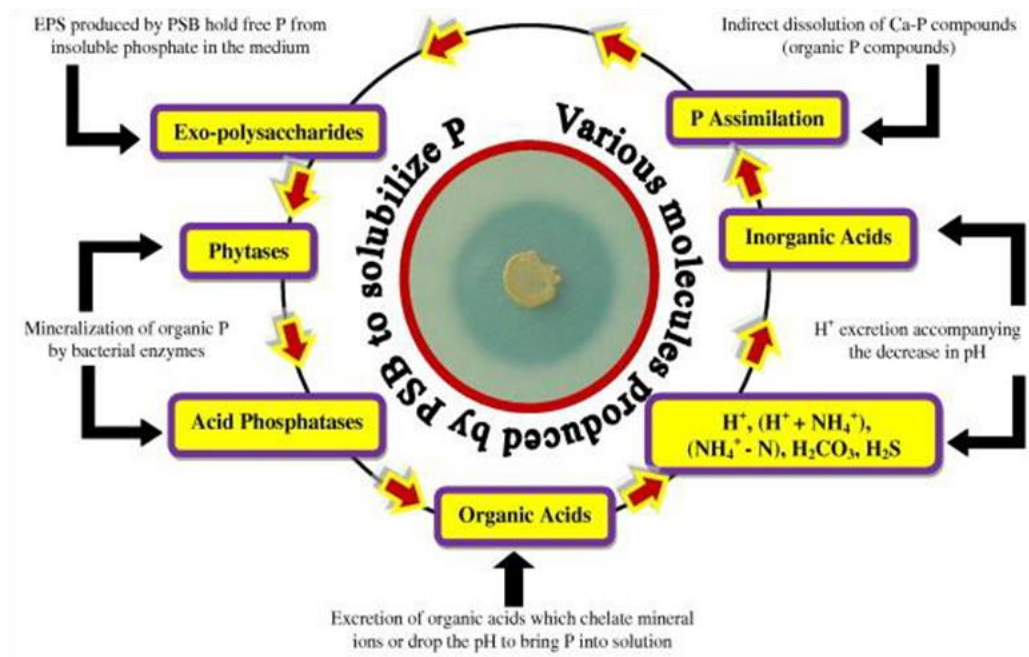


Figure08 : Mécanismes d'action des bactéries solubilisant les phosphates (Khan et al, 2009)

A-4. La solubilisation du potassium

Les concentrations de potassium soluble dans le sol sont généralement très faibles et plus de 90% de potassium dans le sol existe sous forme de roches insolubles et de minéraux de silicate (Parmar et Sindhun, 2013). En raison de l'application déséquilibrée des engrais, la carence en potassium devient l'une des principales contraintes dans la production végétale. Sans potassium adéquat, les plantes ont des racines mal développées, poussent lentement, produisent de petites graines et ont des rendements plus faibles (Kumar et Dubey, 2012). Les microorganismes des sols jouent un rôle clé dans le cycle K naturel. Les microorganismes solubilisant de potassium présent dans le sol pourraient fournir une solution alternative pour rendre le potassium disponible pour l'absorption par les plantes (Rogers et al, 1998).

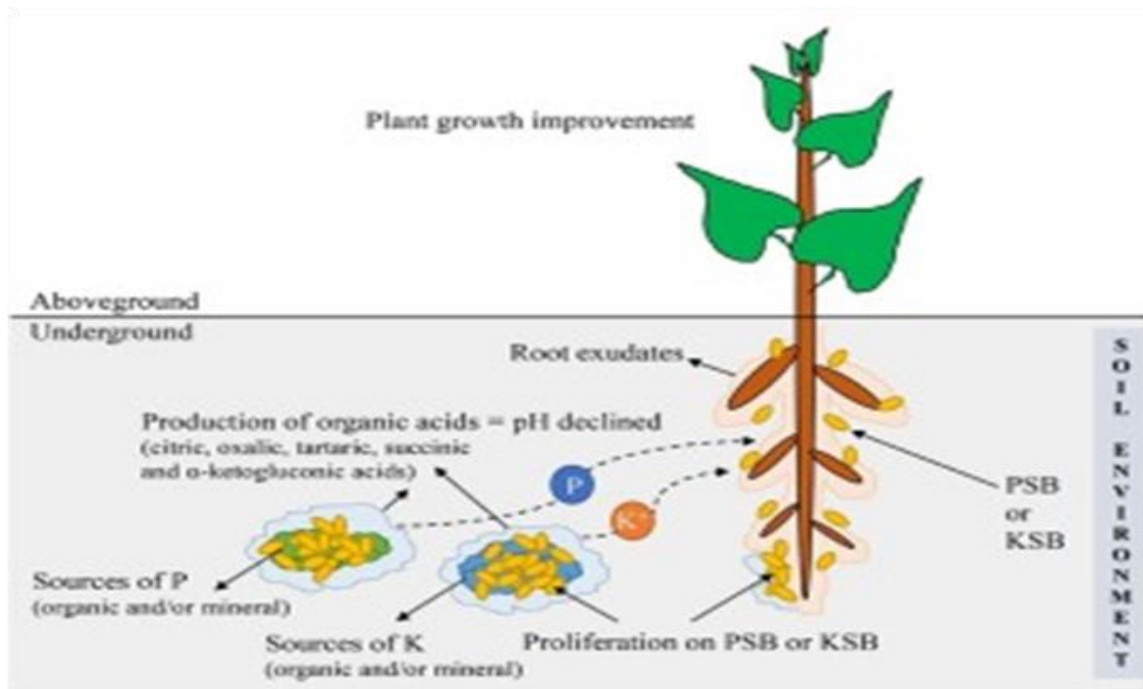


Figure 09 : mécanismes de solubilisation du P et du K par les PGPR (Bakhshandch et al, 2017)

PSB=bactérie solubilisatrice du P

KSB=bactérie solubilisatrice du K

A-5. La production des phytohormones

Plusieurs étapes de la croissance et du développement des plantes telles que l'élongation et la division cellulaires, la différenciation tissulaire, et la dominance apicale sont régulées par des hormones. De nombreuses phytohormones sont produites par les PGPR. Bien que le rôle de la biosynthèse de ces phytohormones par ces micro-organismes ne soit pas entièrement expliqué, il est à noter que les mécanismes directs des PGPR sur la croissance des plantes comprennent la production d'hormones telles les auxines, les cytokinines, les acides gibbérelliques et l'abaissement du taux d'éthylène chez la plante (Glick, 1995).

A.5.1. Acide salicylique

L'acide salicylique a de nombreux rôles dans les systèmes de défense des plantes et il est impliqué dans la signalisation liée à la réponse de la résistance systémique acquise (SAR). En outre, deux souches PGPR, *P. fluorescens* PF4 et P en induisant la production de l'acidesalicylique, elles peuvent augmenter la croissance des plantes (Singh et al, 2003).

A-5.2. Ethylène

Dans des environnements stressés, l'éthylène stimule la sénescence et l'abscission des Feuilles et des fruits, inhibe la croissance des plantes (racines) et déclenche la mort cellulaire à proximité de sites d'infection (Bashan et de-Basan, 2005). En pratiques agricoles, il est

important de contrôler les niveaux d'éthylène, souvent en les abaissant de manière à éviter les pertes économiques. Il a été rapporté que les PGPR qui produisent l'enzyme ACC (1-aminocyclopropane-1-carboxylate) désaminase qui est impliquée dans le catabolisme de la ACC (un précurseur de l'hormone végétale, l'éthylène), peut réduire la concentration de ce dernier dans une plante en développement ou stressée, ce qui les protègent contre les effets délétères du stress de l'éthylène et facilitent la formation de racines plus longues (**Penrose et Glick, 2003**). La même enzyme accroît également d'une manière significative le taux de l'AIA, ce qui favorise la croissance du semis de la tomate (**Holguin et Glick, 2003**).

A.5.3. Cytokinines

Les cytokinines sont des phytohormones dérivées de l'adénine qui contrôlent la division cellulaire, le cycle cellulaire et stimulent le processus de développement chez les plantes (**Srivastava, 2002**). La stimulation des cytokinines à différents processus de développement ont été décrites comme la régulation de la croissance des racines et de la partie aérienne, ainsi que leur ramification latérale, le contrôle de la dominance apicale de la partie aérienne, le développement des chloroplastes et la sénescence des feuilles (**Werner et al., 2001; Oldroyd, 2007**).) ont démontré que des souches de *Pseudomonas fluorescens* sont capables d'améliorer la croissance des plantes par la production de substances telles que les cytokinines (**Neito et Frankenberger, 1989**).

A.5.4. Gibbérellines

Les gibbérellines, elles aussi sont des hormones présentes chez pratiquement toutes les plantes et s'expriment dans différentes parties du végétal. Elles sont des acides diterpénoides qui jouent un rôle important dans l'élongation des tiges et des feuilles des plantes et stimulent la division et l'élongation des cellules. Leur implication peut être durant toutes les phases de croissance des plantes de la germination à la sénescence (**Peter et al, 2003**). Plusieurs PGPR stimulent la croissance des plantes par le biais de la production des gibbérellines (**Vessey, 2003**), notamment les genres les plus connus sont *Azotobacter*, *Azospirillum*, *Pseudomonas*, *Rhizobium* et *Bacillus* (**Kuhad et al, 2004**).

A.5.5. L'auxine

L'auxine est une phytohormone indispensable au développement des plantes. Le terme d'auxine a été étendu à un ensemble de substances naturelles aux propriétés analogues ainsi qu'à des hormones de synthèse. Il agit sur l'élongation et les divisions cellulaires. Ses rôles sont nombreux, sur la dominance apicale, la formation des fruits, la floraison, la réponse à l'environnement (lumière, blessures), le développement des organes, et particulièrement des racines et les racines latérales. De nombreuses revues récapitulent les divers rôles de l'auxine

sur les plantes Au vu des multiples rôles et de la complexité de l'action de l'auxine sur le développement des plantes (**Herrbach, 2013**). L'action de l'auxine dépend à la fois de sa concentration et du tissu sur lequel elle agit. Selon les plantes, une même concentration sur un même organe peut entraîner des conséquences différentes. Ceci implique une régulation très fine en amont et en aval de l'auxine. L'action de l'auxine est dépendante de sa présence et sa concentration dans la cellule, son transport, sa perception, et la régulation de gènes cibles (**Herrbach, 2013**). **a. Synthèse et conjugaison des auxines dans les racines**

L'auxine se présente souvent sous forme conjuguée, en association avec des sucres, des acides aminés ou des protéines, grâce à des liaisons de type ester ou amide. Sous cette forme, l'auxine est inactive : la conjugaison est donc un mécanisme d'appoint permettant de réguler la concentration l'auxine active dans la cellule (**Herrbach, 2013**).

b. L'acide Indole Acétique

L'acide Indole Acétique (AIA) est l'auxine naturelle la plus courante dans le monde végétal. Elle a un effet positif sur la croissance des racines, la prolifération cellulaire et l'absorption des minéraux et des nutriments du sol par la plante. Cette phytohormone augmente le taux de développement du xylème et des racines, contrôle les processus de croissance végétative, initie la formation latérale et l'adventice de la racine, affecte la photosynthèse, la formation des pigments, la biosynthèse de divers métabolites et la résistance aux conditions stressantes (**Vessey, 2003**). Diverses espèces bactériennes possèdent la capacité de produire de l'AIA. En fait, 80% de la flore rhizosphérique est capable de le produire, cependant, les bactéries à Gram positif sont faiblement productrices. Toutefois, l'amélioration de la croissance des plantes par la colonisation racinaire avec des espèces de *Bacillus* et *Paenibacillus* productrices d'AIA est bien connue. La biosynthèse de l'AIA est affectée par plusieurs facteurs environnementaux. En particulier, il y a une augmentation de sa production dans des conditions de pH élevé et en présence de plus grandes quantités de tryptophane. L'AIA est généralement produit sous forme de métabolite secondaire par les PGPR en utilisant les substrats riches exsudés par les racines des plantes. L'AIA et ses analogues actifs dans la plupart des plantes sont synthétisés à partir du tryptophane principal précurseur (**Bouali, 2017**).

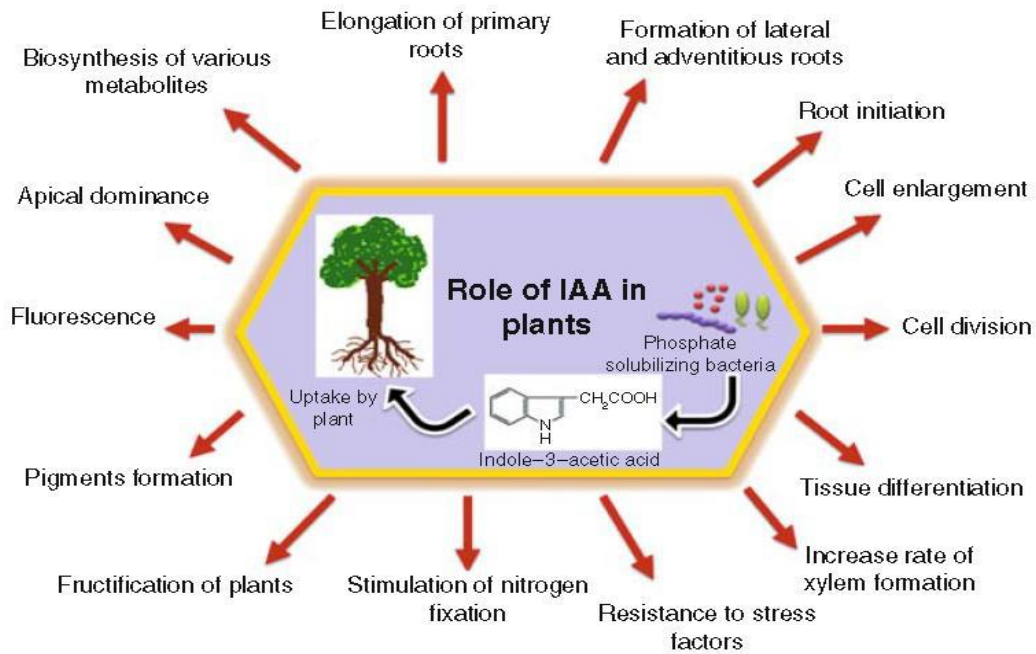


Figure10 : Rôle de l'acide indole acétique dans l'amélioration de la croissance végétale (Khan et al, 2009).

La biosynthèse de l'AIA par les bactéries implique cinq voies dépendantes du tryptophane : voie de l'indole-3-acétamide, voie de l'acide indole-3-pyruvique, voie de la tryptamine, voie de l'indole-3-acétonitrile et voie de l'oxydase de la chaîne latérale tryptophane ; et une voie indépendante (Khan et al, 2014).

antibiotiques est un critère très important de compétitivité des microorganismes aux autres populations microbiennes. C'est un critère de performance pour la promotion indirecte de la croissance végétale. Il consiste à contrecarrer les agents phytopathogènes d'origine tellurique (**Kirdi et Zermane, 2010**).

La sélection des souches rhizobactériennes performantes pour la production des antibiotiques doit prendre en considération l'influence du stade de développement de la plante à inoculer et les conditions environnementales de sa rhizosphère (**Kirdi and Zermane, 2010**).

B-2. La compétition pour l'espace et les nutriments

La compétition pour l'espace et les nutriments est un mécanisme biologique utilisé par les PGPR pour éliminer les phytopathogènes. Cette compétition entre deux ou plusieurs microorganismes concerne soit les éléments nutritifs, l'espace ou les autres facteurs environnementaux qui deviennent limitatifs pour leur croissance (**Shameer et Prasad, 2017**). Dans certains cas, une réduction de la maladie peut être associée à une colonisation importante des racines par les bactéries bénéfiques, ce qui réduit le nombre de sites habitables pour les micro-organismes pathogènes et, par conséquent, leur croissance (**Piano et al, 1997**). Mais, cette corrélation entre l'importance de la population de PGPR sur les racines et la protection observée n'est, dans certains cas, pas vérifiée et ne peut donc pas être considérée comme une règle générale (**Reyes et al, 2004**). L'idée qu'une rhizobactérie à croissance rapide pourrait éliminer les pathogènes fongiques par la compétition pour le carbone et les sources d'énergie fut beaucoup discutée. Le PGPR doit être présent sur les racines en nombre suffisant pour avoir un effet bénéfique et capable d'instaurer une compétition pour les nutriments dans la rhizosphère (**Haas et Defago, 2005**). Toutefois, La compétition pour les nutriments et les différentes sources nécessaires pour la vie se produit généralement entre les microorganismes du sol. Ces PGPR fixateur du fer et du phosphore, inhiberont la croissance des pathogènes d'une part, et favoriseront celle des plantes, d'une autre part (**Pal et al, 2006**).

B-3. La résistance systémique induite

Lors du phénomène appelé « résistance systémique induite » (ISR), des rhizobactéries non pathogènes peuvent conférer à la plante un certain degré de protection à des attaques ultérieures par un phytopathogène via la stimulation de mécanismes de défense systémique.

Cette « immunité » s'initie suite à la perception par la plante de molécules dites « électriques » produites par le microorganisme bénéficiaire. Ce phénomène fait appel séquentiellement à la reconnaissance par l'hôte d'éliciteurs produits par l'agent inducteur, à l'expression de mécanismes de défense *sensu stricto* qui permettent de limiter la pénétration du pathogène dans les tissus de la plante.

Les évènements moléculaires associés à l'ISR sont de mieux en mieux connus. Ainsi, la transmission du signal émis suite à la perception de l'agent infectieux repose sur différentes voies dans lesquelles l'acide salicylique, l'acide jasmonique et l'éthylène jouent un rôle crucial (**Glazebrook et al, 2003**). Cependant, ces voies s'interpénètrent et agissent avec d'autres mécanismes pour former un réseau de régulation modulable permettant à la plante d'initier une réponse défensive spécifique en fonction de la nature du pathogène, qu'il soit virus, bactérie, champignon, insecte ou nématode (**De Vos et al, 2005**).

L'expression phénotypique du phénomène de l'ISR peut être divisée en quatre étapes principales. Ces étapes sont :

- 1- La perception par la plante des molécules bactériennes responsables de la licitation du phénomène,
- 2- La transmission du signal nécessaire à la systémisation du phénomène dans la plante,
- 3- La mise en alerte de la plante au niveau systémique qui, dans la plupart des cas, n'est pas accompagnée de modifications majeures de l'activité transcriptionnelle avant l'attaque du pathogène
- 4- L'expression du ou des mécanisme(s) de défense *sensu stricto* induits permettant de limiter voire inhiber la pénétration du pathogène dans les tissus de l'hôte végétal.

Le survol de la littérature de ces dernières années illustre la diversité des microorganismes non pathogènes capables d'induire l'ISR. Le nombre d'espèces décrites comme inductrices de l'ISR a augmenté rapidement au cours des dernières années (Tab.1). Il inclut des bactéries Gram-positives et en particulier des bacilles comme *Paenibacillus polymyxa*, *B. pumilus*, *mycoides*, *subtilis*, *amylolique faciens*, *pasteurii*, *thuringiensis* ou *cereus* (**Kloepper et al., 2004**). Plusieurs espèces Gram-négatives sont également intensivement étudiées dans le contexte de la lutte biologique basée sur l'induction de la résistance parmi lesquelles certaines entérobactéries telles que *Serratia* (*S. marcesens*, *S. plymuthica*) ou *Pantoeaag glomerans*. La plupart de ces bactéries vivent librement dans la rhizosphère mais d'autres telle que *Rhizobium elti* peut également pénétrer dans les espaces intercellulaires des tissus racinaires et donc se comporter comme endophytes (**Benhamou et al., 2000**).

Tableau.1 : Diversité des souches bactériennes identifiées comme inducteurs de la résistance systémique chez les plantes et la diversité des pathosystèmes dans lesquels l'ISR est impliquée (Van Loon et Bakker, 2005).

Espèces	Plante hôte/pathogène(s)
<i>1- Gram-négatives</i>	
<i>Pseudomonas fluorescens</i> (souche WCS417)	Cacahuète/ <i>Fusarium</i> ; <i>Arabidopsis</i> / <i>Fusarium</i> , <i>Pseudomonas</i> ; Tomate/ <i>Fusarium</i> ; Radis/ <i>Alternaria</i> , <i>Fusarium</i> , <i>Pseudomonas</i>
<i>P. aeruginosa</i> (souche TNSK2)	Haricot/ <i>Botrytis</i> , <i>Colletotrichum</i> ; Tomate/ <i>Botrytis</i> ; Tabac/virus de la mosaïque
<i>Serratia marcescens</i> (souche 90-166)	Concombre/ <i>Colletotrichum</i> , <i>Pseudomonas</i> ; Tabac/ <i>Peronospora</i> ; <i>Arabidopsis</i> / <i>Pseudomonas</i> ; Concombre/coléoptère ; Pin/ <i>Cronartium</i> ; Tomate/virus de la mosaïque
<i>S. plymuthica</i>	Tomate/ <i>Fusarium</i>
<i>Burkholderia cepacia</i>	Tabac/ <i>Phytophthora</i>
<i>Pantoea agglomerans</i>	Pommier/ <i>Erwinia</i>
<i>Kluyvera cryocrescens</i>	Tomate/cucumovirus
<i>Flavomonas oryzihabitans</i>	Concombre/coléoptère
<i>Rhizobium elti</i>	Pomme de terre/nématode
<i>Agrobact. radiobacter</i>	Pomme de terre/nématode
<i>2- Gram-positives</i>	
<i>Bacillus. pumilus</i> (souche SE34)	Tabac/ <i>Peronospora</i> ; <i>Arabidopsis</i> / <i>Pseudomonas</i> ; Concombre/coléoptère ; Tomate/virus de la mosaïque ; Pin/ <i>Cronartium</i> ; Pois/ <i>Fusarium</i> ; Tomate/ <i>Fusarium</i> , <i>Phytophthora</i>
<i>B.amyloliquifaciens</i> (souche IN937)	Tomate/virus de la mosaïque ; Concombre/coléoptère ; <i>Arabidopsis</i> / <i>Erwinia</i>
<i>B. thuringiensis</i>	Café/ <i>Hemileia</i>
<i>B. mycoides</i>	Betterave sucrière/ <i>Cercospora</i>
<i>B. pasteurii</i>	Tabac/ <i>Peronospora</i>
<i>B. sphaericus</i>	Pomme de terre/nématode
<i>B. cereus</i>	Poivre/nématode
<i>Paenibacillus polymyxa</i>	<i>Arabidopsis</i> / <i>Erwinia</i>

B-4. Composés volatiles

L'inhibition de *Pythium* par *Enterobacter cloacae* dans des boîtes de Pétri cloisonnées serait dû à des substances volatiles. L'ammoniac est l'agent inhibiteur identifié. Il est produit comme un intermédiaire du catabolisme des acides aminés des exsudats racinaires assimilés par la bactérie (Howell et al, 1988). Un autre métabolite secondaire produit par certaines rhizobactéries est l'acide cyanhydrique (HCN). Bien que le cyanure soit un inhibiteur métabolique général, il est synthétisé, excrété et métabolisé par certains organismes, y compris les bactéries par la voie de décarboxylation oxydative en utilisant la glycine, le glutamate ou la méthionine comme précurseurs (Castric, 1977). Son rôle est d'éviter la prédation ou la compétition. L'HCN joue un rôle dans la lutte biologique contre les mauvaises herbes (Heydari et al, 2008). La production de HCN est une activité commune chez *Bacillus* (50%) dans le sol rhizosphérique (Ahmad et al, 2008).

D'autres composés volatiles, le 2,3-butanediol et l'acétone libérés par des PGPR entraînent une amélioration appréciable de la croissance de la plante en induisant sa résistance

aux maladies (Ryu et al, 2003).

B.5. Production d'enzymes

L'un des principaux mécanismes utilisés par les agents de lutte biologiques contre les agents pathogènes du sol implique la production d'enzymes dégradant le parois cellulaires (chet et al.,1990).les enzymes dégradants les parois cellulaires telles que B_1,3_glucoses, la chitinase , la cellulase et la protéase sécrétées par les souches de lutte biologiques de PGPR exercent un effet inhibiteur direct sur la croissance lyphaled'agents pathogènes fongiques en dégradants leurs parois cellulaires (Neiendam-Nielsen et sorensen, 1999).Ainsi, les bactéries *pseudomanas spp* .par le biais de la production des chitinase et beta gluconates ,inhibent *rhizoctoniasalan iet phytophthora capsici* ,deux des agents pathogènes des cultures les plus destructeurs au monde (Arore,2008) .

B.6.Compétition pour le fer et la production de sidérophores

Un cas particulier de compétition pour les nutriments concerne la compétition pour le fer. Les micro-organismes ont la capacité de synthétiser des composés s'appropriant les ions ferriques présents dans la rhizosphère et les rendent ainsi indisponibles pour le champignon pathogène entraînant une diminution de sa croissance.

Bien que le fer soit l'un des minéraux les plus abondants sur terre. Dans le sol, il est indisponible pour l'assimilation directe par les microorganismes car l'ion ferrique (Fe^{+3}), forme prédominante dans la nature, est peu soluble (Neilands et al, 1987). La quantité de fer soluble dans le sol est beaucoup trop faible soit environ $10^{-18}M$ à pH 7,4, pour assurer la croissance microbienne, les microorganismes du sol sécrètent des molécules de faible poids moléculaire (~ 400-1000 daltons) appelés sidérophores qui lient le Fe^{+3} avec une très forte affinité ($K_d = 10^{-20}$ à 10^{-50}) (Castignetti et Smarrelli, 1986) et le transportent vers la cellule microbienne où il est repris par l'intermédiaire d'un récepteur cellulaire puis utilisé durant la croissance microbienne (Neilands et Leong, 1986; Briat, 1992). Les bactéries synthétisant les sidérophores lient le complexe fer-sidérophore à l'aide d'un récepteur spécifique situé sur la membrane cellulaire externe de la bactérie (O'Sullivan et O'Gara, 1991). Bien que, les champignons phytopathogènes synthétisent également des sidérophores, ceux-ci ont généralement une plus faible affinité pour le fer par rapport à ceux produits par les PGPR (Schippers et al., 1987). Contrairement aux phytopathogènes microbiens, les plantes ne sont généralement pas lésées par l'épuisement du fer dans le sol. La plupart des plantes peuvent croître à des concentrations de fer beaucoup plus faibles (environ 1000 fois) (O'Sullivan et O'Gara, 1991). En outre, un certain nombre de plantes ont des mécanismes pour lier le complexe fer-sidérophore bactérien, le transportent à travers la plante puis le libèrent sous sa

forme réduite utilisable (**Bar-Ness et al, 1992 ; Wang et al, 1993**). La capacité des sidérophores d'agir comme agents efficaces dépend de la plante cultivée, du phytopathogène spécifique à supprimer, de la composition du sol, de la bactérie productrice, et de l'affinité du sidérophore spécifique pour le fer. Ainsi, même si une PGPR est un agent efficace suppresseur du pathogène dans des conditions contrôlées, son comportement sur le terrain est extrêmement difficile à prédire. Malgré cela, cette mise en garde suppose que la capacité des bactéries produisant des sidérophores inhibant les organismes phytopathogènes est un trait important qui pourrait avoir un impact agronomique important. Les bactéries capables de synthétiser des sidérophores sont : *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Azotobacter* (**Ahmad et al, 2008**). Les bactéries ayant un grand pouvoir de chélation du fer peuvent reconnaître et utiliser les sidérophores produits par d'autres souches, alors que ces dernières ne sont pas capables d'utiliser le sidérophore qu'elles produisent. Cette particularité peut favoriser la souche dans le processus de la colonisation et la compétition pour le substrat mieux que d'autres microorganismes de la rhizosphère (**Ongena et al, 2002**).

D'autre part, bien que la production des sidérophores soit un mécanisme important pour l'activité des PGPR, elle est rarement essentielle dans le bio-contrôle (**Ongena et al, 2000 ; Meziane et al, 2005**). Un grand nombre de facteurs environnementaux (pH, température, la source de carbone) influence leur production (**Duffy et Défago, 1999**). De plus, étant donné que les sidérophores soient principalement spécifiques du fer, ils peuvent aussi complexer d'autres métaux lourds pour atténuer leur toxicité ou posséder d'autres fonctions biologiques (**Khan et al, 2009**).

Chapitre 2
Materials et méthode

1.Présentation des souches

Cinq souches bactériennes isoler d'une plante *Citrullus colocynthis* dans région de Bir El- Ater dans différents sites : **E1, E2, E3** (slama et Chergui, 2019).



Figure 12 : *Citrullus Colocynthis* (Slama et chergui,2019).

Tableau 2 : représentant les souches des bactéries et leur propriétés (Slama et chergui,2019).

Les souches	Caractéristiques
E3B1	-solubilisation du phosphore -solubilisation du potassium -production d’IAA
E3A1	
E2B1	
E1B4	
E3B4	

2.présentation du matériel végétal

Matériel végétal utilisé dans notre expérience des graines de blé dur (*Triticum durum* var. Vitron).

3.Le sol

Le sol utilisé dans notre expérience provient sable à diamètre 2mm existant dans la faculté de la science exacte et la science de nature et de la vie de Tébéssa.

4. Protocole expérimentale

4.1. Préparation les souches

Nous avant la préparation les matériels et le lieu de travail utilisés doivent être désinfectés Les souches rhizobactériennes sélectionnées ont été cultivées individuellement sur le Milieux Nutriment liquides et solides.

4.1. Préparation de milieu nutritif

Tableau 04 : composition des milieux de différenciation des pseudomonas sp (king et al, 1954).

MNG		MNB	
Ingrédients	g/l	Ingrédients	g/l
Agar	8,6	péptone	2,5
Eau distillée500 ml		Beefextrat	1,5
		Eau distillée	500 ml
		pH	6,8

Après préparation, les deux milieux sont remplis dans 50 tubes à essai et flacons pour stérilisation en autoclave.



Figure 13 : Ajustement du pH de milieu nutritif

4.1.2. Ensemencement des isolats dans milieu solide

Les cinq souches sont inoculées à partir de tubes Eppendorf stockés dans du glycérol à -80 °

C. L'inoculation est réalisée sur boîtes de Pétri, en surface et sous forme de rayures sur le milieu de gélose nutritive. Le greffage en conditions de travail est réalisé en stérilité totale, qui consiste à étaler sur la surface des lignes de box réalisées avec une poignée Platine stérile, chaque souche est inoculée dans une boîte de Pétri contenant du milieu nutritif gélose. Cela permet d'obtenir des colonies séparées. Après inoculation, les boîtes sont fermées et incubées dans une étuve à 30 ° C pendant 48 heures.

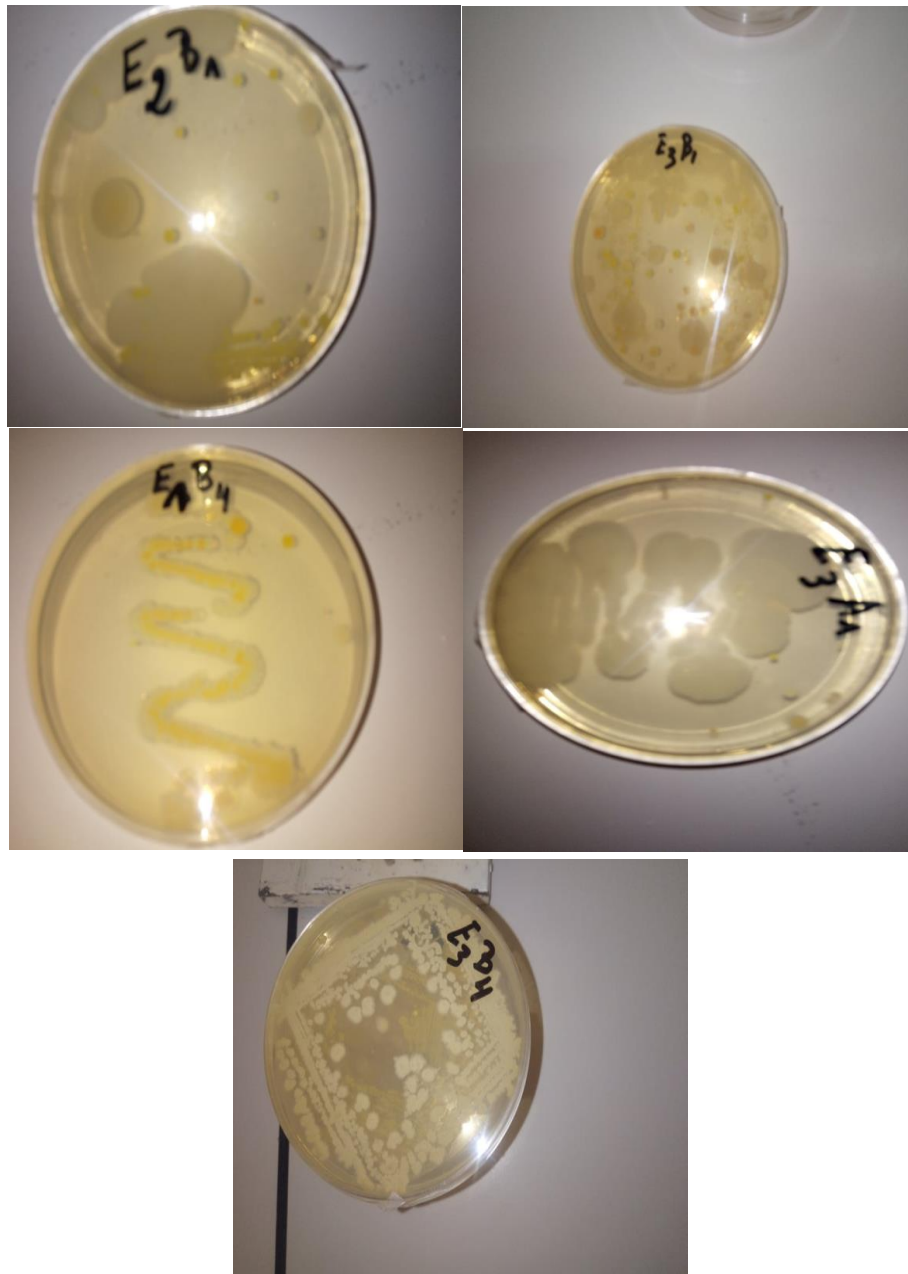


Figure 14 : Boîtes de Pétri des différentes souches bactériennes utilisées.

4.1.3. Transfert des isolats dans milieu liquide

Les bactéries sont mises en culture pendant 24 h dans le milieu liquide, La croissance est assurée à une température de 30 °C sous agitation.

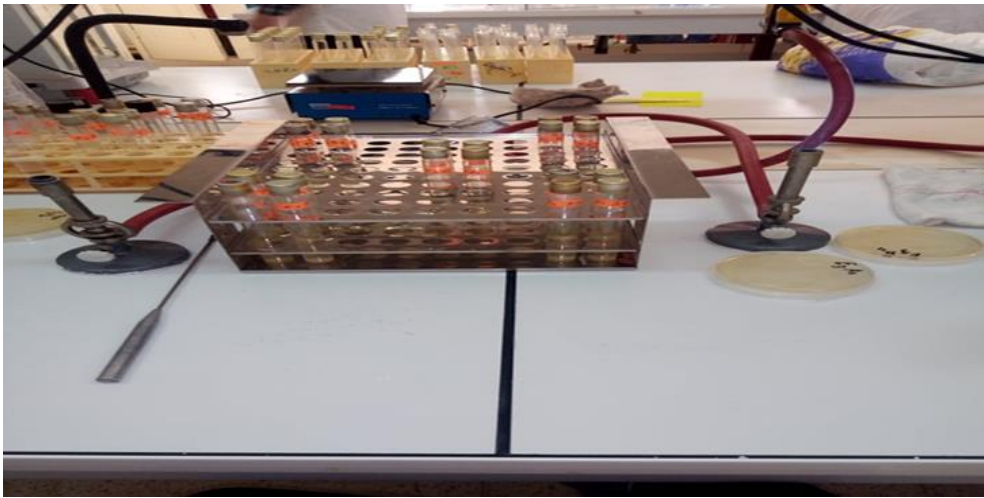


Figure 15 : Cultures bactérienne dans milieu liquide.

4 .2. Inoculation des grains

4.2.1. Stérilisation des grains

Immersion des graines dans de l'éthanol à 70% pendant 1 min, puis dans de l'hypochlorite de sodium à 10% pendant 2 min. Les graines ont ensuite été soigneusement lavées 10 fois avec de l'eau distillée stérile (**Kun Yuan et al., 2020**).

4.2.2. Inoculation des grains

L'inoculation des graines stériles est réalisée selon de méthodes différentes

- Méthode directe (ID) : Après le semis des graines stériles dans des pots contenant du sable stérile sont inoculées par 10 ml de culture bactérienne.
- Méthode par imbibition (II) : Chaque dix graines stériles sont placées pendant 24h dans un tube à essai avec la culture bactérienne.



Figure 16 : placées les grains dans un tube à essai avec la culture bactérienne.

5. Conditions

d'expérimentation.

Les essais sont réalisés sous serre au niveau la faculté de la science exacte et la science de nature et de la vie de Tébéssa. Nous avons mis le sol dans 60 boîtes d'aluminium, dont 20 témoins, et chacun des isolats a deux méthodes d'inoculation ID et II avec quatre répétitions. Les irrigations est assuré chaque jour par l'eau distillée stérile.

6. Plan expérimentale

L'expérimentation est conduite sous serre avec l'installation d'un dispositif aléatoire complet (DAC) assurant quatre répétitions pour chaque unité expérimentale. La répartition de ces derniers étés réalisés en utilisant une table des chiffres aléatoires

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
E2B1 I/D	T	E1B4 I/D	E3B1 I/D	T	T	E1B4 I/I	E3A1 I/I	E3B1 I/D	E3A1 I/I	E3B4 I/I	E3B1 I/I	E3B5 I/I	T	E3B5 I/I
16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
E1B4 I/D	E1B4 I/I	E3B4 I/D	T	E1B4 I/I	E1B4 I/D	T	E3A1 I/D	T	E1B4 I/I	E2B1 I/I	E3B1 I/I	T	E3A1 I/I	T
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
E3B1 I/D	E2B1 I/D	E2B1 I/I	E3B1 I/D	T	T	T	E3B4 I/D	E2B1 I/D	E2B1 I/D	T	E2B1 I/I	T	E3A1 I/I	E3B4 I/I
46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
E3B1 I/I	E3B4 I/D	T	E3A1 I/D	T	E3A1 I/D	T	E3B1 I/I	E1B4 I/D	E3A1 I/D	E2B1 I/I	E3B4 I/D	T	T	T

Figure17 : plan expérimentale

T : Témoins, ID : Inoculation directe, II : Inoculation par imbibition

7. Les indices de germination standard

7.1. Pourcentage de germination finale (PGF%)

Il a été compté dix jours après la plantation selon l'équation suivante décrite par **Ellis et Roberts (1981)**.

$$PGF = \frac{\text{Nombre de grains germés}}{\text{Nombre total des grains semés}} \times 100$$

7.2. Indice de vitesse de germination (IVG)

Compté par l'équation suivante indiquée par l'Association internationale d'essais de semences (**ISTA, 1996**) :

$$IVG = \frac{\text{Nombre de grains germés}}{\text{Nombre de jour du premier comptage}} + \dots + \frac{\text{Nombre de grains germés}}{\text{Nombre de jour du dernier comptage}}$$

7.3. Coefficient de germination (Coef ger)

Il a été compté en utilisant l'équation suivante selon **Copeland (1976)** :

$$PGF = \frac{A1 + A2 + A3 + \dots + An}{A1T1 + A2T2 + A3T3 + \dots + AnTn} \times 100$$

A : Nombre de grains germés

T : Nombre de jour pour le comptage

n : Nombre de jour du dernier comptage

7.4. Taux de germination relatif (TGR)

Les critères de comparaison sont la capacité germinative (**Côme, 1975**), estimée par le taux de germination cumulée (96) 10 jours après le semis, et le taux de germination relatif (GR) (**Sharrna, 1973**). Ce dernier est estimé par $GR = Gx/Gsm$, où Gx est le taux de germination cumulé à 10 jours pour un traitement donné et Gsm le taux de germination au dixième jour (ce dernier traitement approchant au mieux le pouvoir germinatif du lot de graines considéré (**Doran et Gunn, 1986**). L'utilisation de GR permet de comparer des lots de graines dont les pouvoirs germinatifs sont différents.

8. Les analyses statistiques

Les analyses statistiques sont débutées par une analyse de la variance ANOVA tenant en compte l'effet aléatoire du facteur isolats, suivie d'un modèle linéaire général (GLM) pour l'analyse des différents indices de germination standard et afin de mieux comprendre l'effet des interactions significatives entre les paramètres étudiées sur la germination des gaines un modèle linéaire général mixte (GLMM) a été entrepris, suivi par un test de comparaison multiple celui de DUNETT pour comparer les moyennes des traitements au témoin à un seuil de signification ($\alpha = 5\%$).

Chapitre 3

résultats et discussions

1. Résultats

1.1. Effet des traitements sur le nombre de graines germées

L'histogramme (figure18.) montre clairement que l'isolat E2B1 avec une inoculation par imbibition a enregistré un score qui est mieux que celui du témoin après cinq jours de germination, de même pour l'isolat E1B4 mais avec une inoculation directe. Après dix jours de germination les deux isolats E3A1 et E3B4 avec inoculation par imbibition ont montré une meilleure germination en comparaison avec le témoin, après 24 jours de germination on a constaté que le témoin a marqué le plus haut nombre de grains germés de l'expérimentation

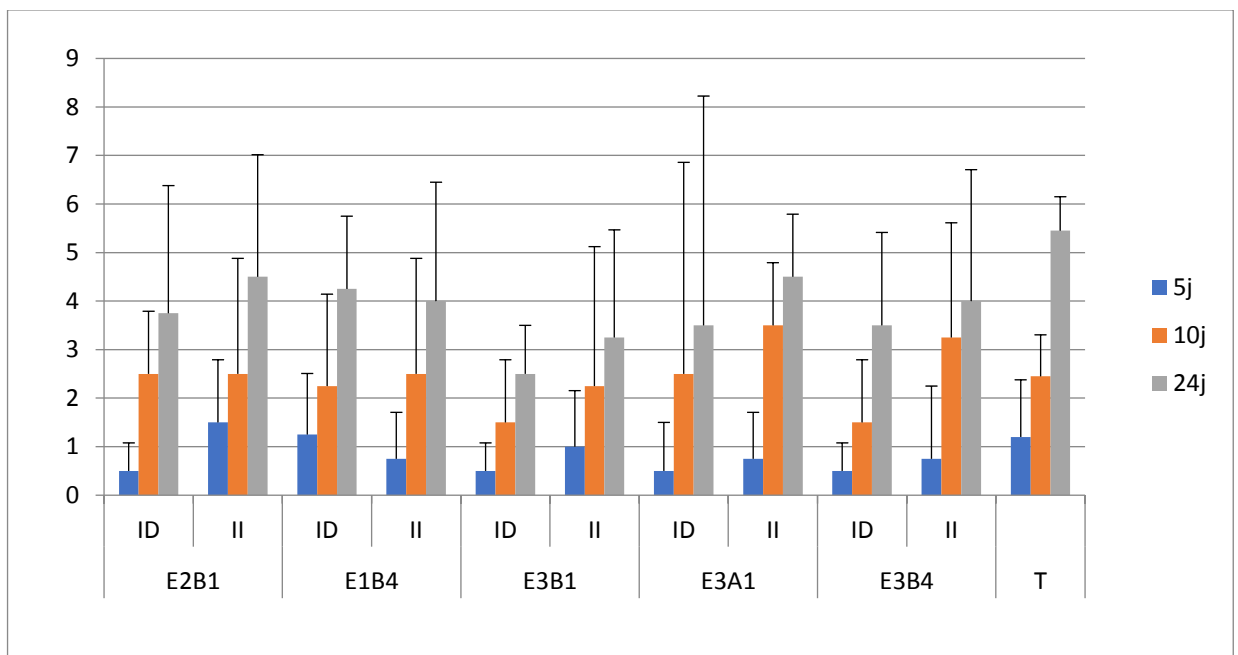


Figure 18 : Histogramme montrant l'effet des isolats, le mode d'inoculation et les périodes sur la germination des graines de blé

L'analyse de la variance de nombre de grains germés (Tableau 05.) fait ressortir que la période a un effet très hautement significatif sur la germination ($p < 0.001$) ainsi qu'un effet significatif du mode de l'inoculation ($p < 0.05$) et l'effet de l'interaction période* isolats qui montre lui aussi un effet significatif.

Tableau 05 : ANOVA Nombre de grains germés

Sources de variations	DL	SC	CM	F	P	
Périodes	2	243,875	121,937	75,23	0,000	***
Inoculations	1	7,111	7,111	6,70	0,049	*
Isolats	5	18,717	3,743	1,66	0,231	NS
Périodes*Inoculations	2	0,847	0,424	1,00	0,402	NS
Périodes*Isolats	10	16,208	1,621	3,83	0,023	*
Inoculations*Isolats	5	5,306	1,061	2,50	0,102	NS
Périodes*Inoculations*Isolats	10	4,236	0,424	0,11	1,000	NS
Erreur	108	398,140	3,686			
Total	143	694,440				

Signification (***): $P < 0,001$; (**): $P < 0,01$; (*): $P < 0,05$; (NS): Non significative

1.2. Tests de germination standard

Les deux principaux traitements, l'ensemble des isolats et les deux modes d'inoculation ils ont affiché des différences non significatives avec les différents tests de germination standard (Tableau 06.).

Tableau06. Model linéaire général (GLM) des tests de germination standard

	Isolats		Inoculations	
	F _(5,41)	P	F _(5,41)	P
PGF% (après 10j)	0,25	0,940 NS	1,12	0,297 NS
IVG	0,40	0,846 NS	1,36	0,249 NS
Coef ger	0,35	0,881 NS	0,05	0,817 NS
TGR	0,41	0,841 NS	0,00	1,00 NS

Signification (***): $P < 0,001$; (**): $P < 0,01$; (*): $P < 0,05$; (NS): Non significative

1.3. Effet des interactions des traitements sur la germination

Le diagramme des interactions entre les paramètres étudiés (Figure 19.) montre que les longs périodes augmentent le nombre de graines germées et l'inoculation par imbibition améliore nettement le nombre de graines germées pour l'ensemble des isolats à l'instar de l'isolat E1B4 qui a enregistré la meilleure germination avec l'inoculation directe. L'isolat E2B1/ID minimise la germination très significativement avec un coefficient de (-1,542. $P < 0,01$) par rapport au témoin de même pour l'isolat E1B4/ID avec un coefficient de (-1,5. $P < 0,01$) et E3B4/ID avec un coefficient de (-1,625. $P < 0,01$) ainsi que l'isolat E3B1/ID qui affiche une diminution de germination significative avec un coefficient de (-1,083. $P < 0,05$) par ailleurs l'isolat E3A1/ID enregistre une diminution de germination très hautement significative avec un coefficient de (-1,917. $P < 0,001$).

L'effet des interactions des traitements sur la germination (Tableau 07.) fait éclaircir certains points, le mode de l'inoculation et les cinq isolats ont un effet non significatif sur la germination par contre l'interaction période*isolats considéré comme facteur aléatoire a pu mettre en lumière la combinaison entre les isolats et le mode de l'inoculation. L'isolat E3A1/ID présente un effet très hautement significatif sur la germination ($p < 0.001$) suivi par les isolats E2B1/ID, E1B4/ID et E3B4/ID qui ont affichés un effet très significatif ($p < 0.01$), l'isolat E3B1/ID a motionné une différence significative.

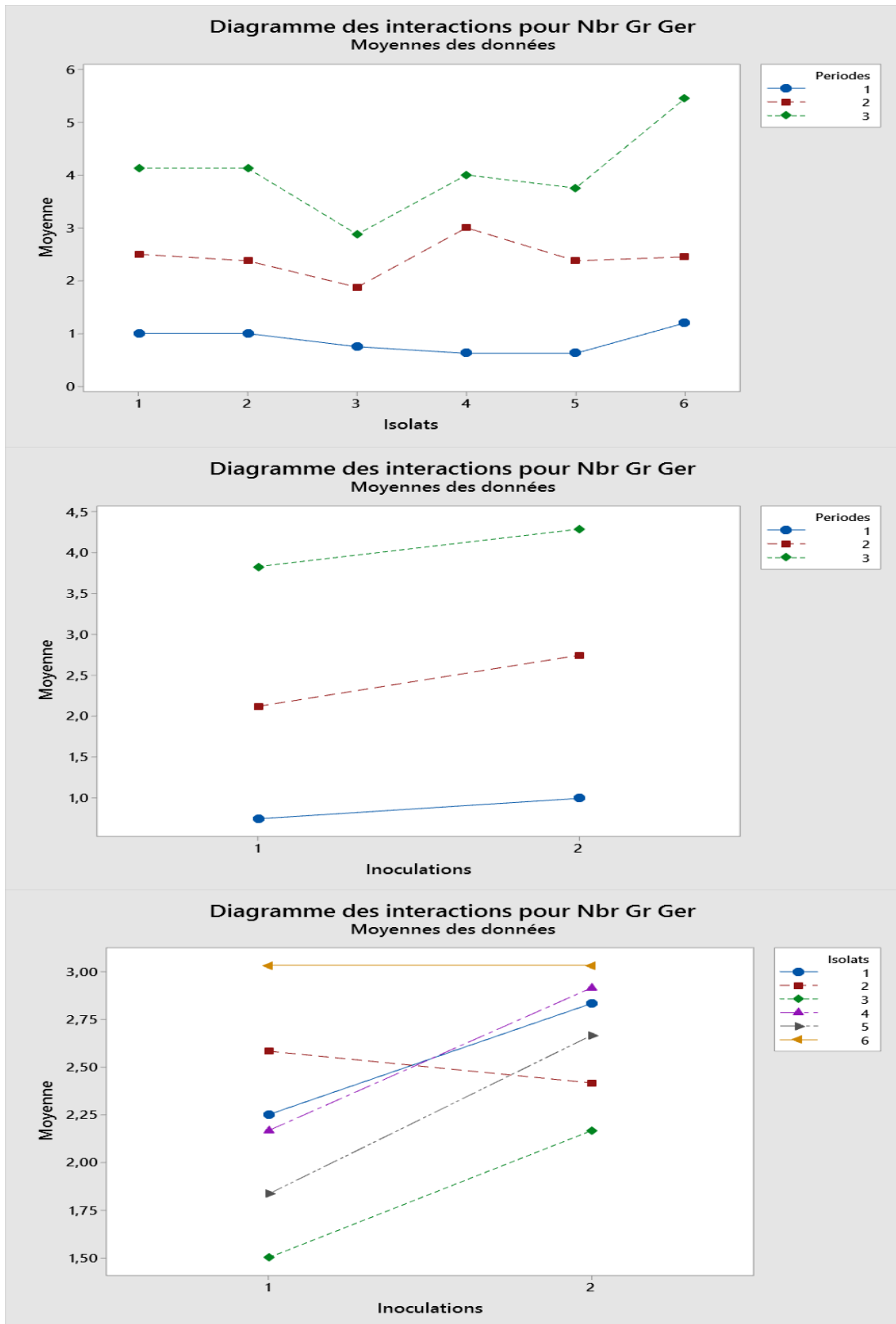


Figure 19 : Diagramme des interactions entre les paramètres étudiés

Tableau 07. Model linéaire général mixte (GLMM) de nombre de grains germe

Termes	Coefficient	Valeur T	Valeur P	Signification
Constante				
	2,45	16,26	P<0,001	***
Inoculations				
1	-0,222	-1,48	0,143	NS
Isolats				
E2B1	0,092	0,27	0,786	NS
E1B4	0,05	0,15	0,882	NS
E3B1	-0,617	-1,83	0,07	NS
E3A1	0,092	0,27	0,786	NS
E3B4	-0,2	-0,59	0,554	NS
Périodes (Isolats)				
E2B1/ID	-1,542	-2,95	0,004	**
E2B1/II	-0,042	-0,08	0,936	NS
E1B4/ID	-1,5	-2,87	0,005	**
E1B4/II	-0,125	-0,24	0,811	NS
E3B1/ID	-1,083	-2,08	0,04	*
E3B1/II	0,042	0,08	0,936	NS
E3A1/ID	-1,917	-3,67	P<0,001	***
E3A1/II	0,458	0,88	0,381	NS
E3B4/ID	-1,625	-3,11	0,002	**
E3B4/II	0,125	0,24	0,811	NS

Signification (***): $P < 0,001$; (**): $P < 0,01$; (*): $P < 0,05$; (NS): Non significative

Le test des comparaisons multiple de DUNETT pour comparer les moyennes des traitements au témoin (Tableau 07.) a un seuil de signification ($\alpha = 5\%$) divise les interactions période*isolats en deux groupes distincts, le premier formé par [25j (E1B4), 25j (E2B1) et 25j (E3A1)] qui affiche une différence avec le témoin. Par ailleurs le reste des combinaisons période*isolats forme un deuxième groupe qui est identique au témoin.

Tableau 08. Comparaisons multiples des moyennes des interactions des facteurs au témoin a un seuil de signification ($\alpha = 5\%$).

Périodes*Isolats	Moyennes	Groupe
T (Contrôle)	1,2	A
25j (E1B4)	4,125	B
25j (E2B1)	4,125	B
25j (E3A1)	4	B
25j (E3B4)	3,75	A
10j (E3A1)	3	A
25j (E3B1)	2,875	A
10j (E2B1)	2,5	A
10j (E3B4)	2,375	A
10j (E1B4)	2,375	A
10j (E3B1)	1,875	A
05j (E2B1)	1	A
05j (E1B4)	1	A
05j (E3B1)	0,75	A
05j (E3B4)	0,625	A
05j (E3A1)	0,625	A

2. Discussion

Cette étude qui est menée pour la première fois et qui représente l'effet des PGPR isolées de la rhizosphère du *Citrullus colocynthis* sur la germination des graines de *Triticum durum* var. Vitron. Les résultats obtenus dans cette étude sont confortés par ceux avancés par un nombre de recherche scientifique qui notent que l'inoculation par les bactéries productrices d'indole-3-acetic Acid (IAA) diminue le pourcentage de germination par ailleurs une relation significative entre les concentrations d'IAA produites par les bactéries et le pourcentage d'inhibition de la germination dans les graines de blé dur par différentes souches bactériennes a été observée (Tabatabaei et al., 2016). Plusieurs mécanismes d'inhibition de la croissance par ce groupe de rhizobactéries ont été proposés, le plus probable étant la production de phytotoxines telles que le cyanure et d'autres composés volatils et non volatils, non encore identifiés. Un autre mécanisme par lequel ces bactéries inhibent la croissance des plantes est la

production de phytohormones (Brimecombe et al., 2007). Il a été démontré que l'acide indole-3-acétique (IAA) produit par certaines rhizobactéries inhibe la germination des graines (Brimecombe et al., 2007). L'inoculation de colza et de fétuque avec des bactéries PGPR, directement pendant la germination ainsi qu'après deux semaines de croissance, était la méthode la plus efficace pour protéger les graines de l'inhibition de la croissance (**Grobelak et al. 2015**)

Par contre d'autre recherche scientifique avance que les PGPR augmente le pourcentage et la vitesse de germination et l'indice de vigueur des graines (**Nehra et al,2016**). Les isolats obtenus de la rhizosphère des espèces de l'*Acacia* appliqués sur les graines de (*Triticum aestivum* L.) Peut accélérer la vitesse de germination et la vigueur de la plante (**Prasad et al.,2017**). L'application d'isolats de PGPR améliore considérablement le pourcentage de germination des graines dans des conditions de culture difficile (**Hossain et al., 2016**). **Deshwal et al. (2019)** avance que les *Pseudomonas* isolées de la rhizosphère des cultures semi-aquatiques comme le riz augment le nombre de graines germées.

Conclusion

Cette étude qui est réalisée pour la première fois, vise à explorer l'effet des isolats PGPR obtenus à partir de la rhizosphère du *Citrullus colocynthis* capable de solubiliser le phosphate, le potassium et synthétiser l'IAA sur la germination des graines de blé dur *Triticum durum* var. Vitron. L'analyse des données obtenues nous permet d'avancer que nos isolats qui sont productrices de l'IAA ont inhibé remarquablement la germination des graines surtout avec le mode d'inoculation avec imbibition et la période de germination qui a montré une amélioration de nombre de graines germées, donc il est judicieux d'approfondir les recherches sur le mode et le temps d'inoculation pour mieux cerner d'avantage l'effet de ces PGPR sur la germination du blé dur, continuer le travail par combinaison des PGPR avec d'autres substances stimulatrices de germination afin de mettre au point un biofertilisateur.

Chapitre 4
Références bibliographiques

- Listes des références bibliographiques

- (A)

- **Ahmad, I., Pichtel, J., et Hayat, S., (2008).** Plant-Bacteria Interactions: Strategies and Techniques to Promote Plant Growth. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH et Co 675-1137 p.
- **Alabouvette, C., Cordier, C (2012).** Les *Trichoderma*. Trois fois bénéfiques Bio-protecteurs.bio-fertilisants. Bio-stimulant Un peu des trois, mais gare aux généralisations. *Phytoma*, **652** :17-21.
- **Alström, S., (1991).** Indication of disease resistance in common bean susceptible to halo blight bacterial pathogen after seed bacterization with rizosphère pseudomonads. *Journal of genetic and applied microbiology* 37,495_501.
- **Antoun, H., and Prévost, D., (2005).** Ecology of plant growth promoting rhizobacteria. Z. A. Siddiqui (ed.), *PGPR: Biocontrol and Biofertilization*. p 1–38.
- **Aouane, M., Hamani, H., (2017)** Etude des PGPR “Plant Growth Promoting Rhizobacteria” des plantesactinorhiziennes : cas de *Casuarina equisetifolia* et d’*Elaeagnus angustifolia*. Mémoire de master en Sciences. Université des Frères Mentouri Constantine.

- (B)

- **Baca, B.E., & Elmerich C., (2007).** Chapter 6: Microbial Production of Plant Hormones.C. Elmerich and W.E. Newton (Eds). *Associative and Endophytic Nitrogen-fixingBacteria and Cyanobacterial Associations*, 113-143.
- **Bakhshandeh, E., Pirdashti, H., Lendehk, S., (2017).** Phosphate and potassium solubizing bacteria effect on the growth of rice, *ecological engineering* volume 103, part A., June 2017:164-169.
- **Banerjee, M. R., Yesmin, L., & Vessey, J. K., (2006).** Plant-growth-promoting rhizobacteria as biofertilizers and biopesticides. *Handbook of microbial biofertilizers*. Food Products Press, Ney York: 137-181.
- **Bar-Ness, E., Y, Hadar, Y, Chen., V, Romheld., & H, Marschner., (1992).** Short-term effects of rhizosphere microorganisms on Fe uptake from microbial siderophores by maize and oat. *Plant Physiol.* 451-456.
- **Bashan, Y., G, Holguin & L. E, De-Bashan., (2005).** *Azospirillum*-plant relationships: physiological, molecular, agricultural, and environmental advances (1997-2003), *Can. J. Microbiol.*521-577.

- **Bashan, Y., Holguin, G.De., Bashan, L.E., (2004).** Azospirillum -plant relationships: physiological, molecular, agricultural, and environmental advances. *canadin journal of microbiology*.50.,521-577.
- **Benhamou, N., DL, Gagné., & Quéré Dehbi., (2000).** Bacterial-mediated induced resistance in cucumber: beneficial effect of the endophytic bacterium *Serratia plymuthica* on the protection against infection by *Pythium ultimum*. *Phytopath*.45–56.
- **Bertrand, H., C, Plassard., X, Pinochet., B. Touraine., P, Normand. And J.C, Cleyet-Marel., (2000).** Stimulation of the ionic transport system in Brassica napus by a plant growth-promoting rhizobacterium (*Achromobacter* sp.). *Can. J. Microbiol.*, 229 237.
- **Bloemberg, G. V., Lustenberger, B. J., (2001).** Molecular basis of plant growth promotion and biocontrol by rhizobacteria. *Current opinion in plant biology*, 4(4), 343-350.
- **Bouali, W., (2017).** Contribution à l'élaboration d'un soucier bactérien et caractérisation de la flore Bacillus cereus dans le Sud -Ouest Algérien. Thèse de doctorat en sciences. Université Abou Bakr Belkaid, TLEMCEM.
- **Briat, J. F., (1992).** Iron assimilation and storage in prokaryotes. *J. Gen. Microbiol.*, 2475-2483.
- **Brimecombe MJ, De Leij FAAM, Lynch JM., (2007).** Rhizodeposition and microbial populations. In: The rhizosphere biochemistry and organic substances at the soil plant interface, 2nd edn; Pinton R, Varanini Z, Nannipieri P (eds). pp. 74-98. CRC Press, New York.
- **Brock, J. L., Albrecht, K. A., Tilbrook, J. C., et Hay, M. J. M., (2000).** Morphology of white clover during development from seed to clonal populations in grazed pastures. *The Journal of Agricultural Science*, 135(02), 103-111.
- **Bünemann, E. K., Bossio, D. A., Smithson, P. C., Frossard, E., & Oberson, A., (2004).** Microbial community composition and substrate use in a highly weathered soil as affected by crop rotation and P fertilization. *Soil Biology and Biochemistry*, 36(6), 889-901.

C)

Campbell, R., and M.P, Greaves., (1990). Anatomy and community structure of the rhizosphere in The Rizosphere (ed. J.M. Lynch), John Wiley & Sons, Ltd, Essex, pp. 11–34.

- **Castric, PA. (1977).** Glycine Metabolism by *Pseudomonas aeruginosa*: Hydrogen Cyanide Biosynthesis. *J. Bacteriol.*826-831.

- Copeland, L.O.,** (1976). Principles of seed science and technology. Burgess Pub. Com., Minneapolis, Minnesota, pp 164 - 165.
- **Chen, Y.P., Rekha, P.D., Arunshen, A.B., Lai, W.A., & Young, C.C., (2006).** Phosphate solubilizing bacteria from subtropical soil and their tricalcium phosphate solubilizing abilities. *Appl. Soil Ecol.*, vol. 34, pp.: 33-41.
 - **Chung, S., Yung, J., Yong, C., (2005).** observation et infection structure on the leaves of cucumber plants per treated with Arbuscular mycorrhiza *Glomus* in radices after challenge Inoculation with *Colletotrichum orbicular.*, National Institute of agricultural science and technology RDA., Suwon 441-707 Korea. **CÔME, D., (1975).** Quelques problèmes de terminologie concernant les semences et leur germination. In *La germination des semences*, Gauthier-Villars, Paris, 1 1-26.
 - **Curzi, M.J., Ribaud C.M., Trimchero G.D., Curzà JE., Pagno EA., (2008).** changes in the content of rice in response to the inoculation with herbas *pirillum seropedicae*. *Journal of plant interactions.*,3:3.16 D)
- Dashti, N., Prithviraj, B., Zhou, X. M., Hynes, R., and Smith, D.L., (2000).** Combined effects of plant growth promoting rhizobacteria and genistein on nitrogen fixation activity in soybean at suboptimal root zone temperatures. *Journal of Plant Nutrition* 23: 593-604
- Desbrosses, G. J., and Stougaard, J., (2011).** Root nodulation: a paradigm for how plant-microbe symbiosis influences host developmental pathways. *Cell Host Microbe*,10,348-358, doi: 10.1016/j.chom,2011.09. 005.
- Deshwal, V. K., & Thapliyal, N., (2019).** PLANT GROWTH PROMOTING PSEUDOMONAS STRAINS EFFECTIVELY ENHANCE PLANT GROWTH OF ORYZA SATIVA. *Journal of Plant Development Sciences Vol, 11(8)*, 471-474.
- **De Vos, M., V, Van Oosten., RMP, van Poecke., JA, Van Pelt., MJ, Pozo., MJ, Mueller., AJ, Buchala., JP, Métraux., LC, Van Loon & M, Dicke., (2005).** Signal signature and transcriptome changes of *Arabidopsis* during pathogen and insect attack. *Mol. Plant Microbe Interact.* 923–937.
 - **Dey, R., Pal, K.K., Bhatt, D.M., and Chauhan, S.M., (2004).** Growth promotion and yield enhancement of peanut (*Arachis hypogaea* L.) by application of plant growth -promoting rhizobacteria microbial res. 371-

394.

Dommergues, Y., (1978). "Mycorrhizes et fixation d'azote". O.R.S.T.O.M. avril 1978 .

DORAN, (J. C.),, GUNN (V.),, (1986). Treatments to promote seed germination in Australian acacias In Australian Acacias in Developing Countries, JW Turnbull Ed, Gympie, Australia, 57-63.

- **Duffy, B.K., and G. Defago., (1999).** Environmental factors modulating antibiotic and siderophore biosynthesis by *Pseudomonas fluorescens* biocontrol strains. *Appl. Environ. Microbiol.*, 2429–2438. **Dutta,**

S., Podile, A.R., (2010). plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): the bugsto debug the root zone. *Critical Reviews in Microbiology*, 36,232, 244.doi:10.3109/1003766806.

▪ (E)

- **Elustondo, J., DA., Anger., MR, Laverdière., et A, N'Dayegamiye., (1990).** Etude comparative de l'agrégation et de la matière organique associée aux fractions granulométriques et sept sols sous culture de maïs en prairie. *Can. J. Soil Sci.* 395- 402.

- **Emily Claudia ricci., (2015).** investigating the role of pseudomonas sp. And bacillus sp biofilms as plant growth promoting Inoculants.McGill University, material. Quebec. Canada)

F)

Feillet, P. (2000) Le grain de blé : Composition et utilisation. INRA, Paris : PP 17-18.

- **Fischer Sonia, E., Fischer Sandra, I., Soledad Magris, Gladys B. Mori., (2007).** Isolation and characterization of bacteria from the rhizosphere of wheat. *World J Microbiol Biotechnology*, 895–903.

▪ (G)

- **Germida, J.J., S. D, Siciliano, R. de Freitas and A. M, Seib., (1998).** Diversity of root-associated bacteria associated with field-grown canola (*Brassica napus* L.) and wheat (*Triticum aestivum* L.). *FEMS Microbiol. Ecol.*, 43–50.

Glick, B., (1995). Genotyping of antifungal compounds producing PGPR *Pseudomonas*. *Canadian Journal of Microbiology*, 41, 107-109

Glick, BR., (1995). The enhancement of plant growth by freeliving bacteria. *Can J Microbiol* 41: 109-117. [http://dx. doi.org/10.1139/m95-01](http://dx.doi.org/10.1139/m95-01)

Gholami, A., Shahsavani, S., Somayeh Nezarat., (2009). The Effect of Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) on Germination, Seedling Growth and Yield of Maize

International journal of Biological and life sciences 5,144-157. **Goswami, D., Janki, N., Thakker, Pinakin, C. Dhandhukia., (2016)**. Portraying mechanics of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): Are view article cogent food & Agriculture (2016), 2:1127500.

Grosbeak, A., Napora, A., & Kacprzak, M., (2015). Using plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) to improve plant growth. *Ecological Engineering*, 84, 22-28.

- (H)

- **Haas, D., & Defago, G., (2005)**. Biological control of soil-borne pathogens Byfluorescent pseudomonads. *Nat. Rev. Microbiol.*, **3(4)**:307-319
- **Hassan, K.A., Johnson, A., Shaffer, B.T., Ren Q., Kidarsa Teresa, A., Elbourne Liam, D. H., Hartney Sierra, Duboy Robert., Goebel Neal, C., Zabriskie, T.M., Paulsen, I.T & Loper, J.E., (2010)**. Inactivation of the Gas A response regulator in *Pseudomonas fluorescens* Pf-5 has far-reaching transcriptomic consequences. *Environnemental Microbiology*, **12(4)** : 899-915.
- **Herrbach, V., (2013)**. Stimulation du développement des racines latérales par des lipochitooligosaccharides (LCOs) symbiotiques chez *Medicago truncatula*. Toulouse3.
- **Heydari, S., P, R, Moghadam., & S, M, Arab., (2008)**. Hydrogen, Cyanide Production Ability by *Pseudomonas Fluorescence* Bacteria and their Inhibition Potential on Weed. Proceedings “Competition for Resources in a Changing World: New Drive for Rural Development”, Tropentag, Hohenheim.
- **Hiltner, L., (1904)**. Über neutered erfahrungen und problemes auf dem gibbeted der bodenbakteriologie enter bewondered berücksichtigung der grinding und brace. Arb DLG 98, 59 78.
- **Hinsinger, P., (1998)**. How do plant roots acquire mineral nutrients? Chemical processes involved in the rhizosphere. *Adv. Agron.*, 225–265.
- **Holguin, G., et Glick, B.R., (2003)**. Transformation of *Azospirillum Brasiliense* Cd within ACC deaminase gene from *Enterobacter cloacae* UW4 fused to the Tetra gene Functions of Soil Micro flora in Development of Plants. *In: Plant Surface Microbiology*.
- **Hossain, M. M., Das, K. C., Yesmin, S., & Shahriar, S., (2016)**. Effect of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) in seed germination and root-shoot development of chickpea (*Cicer arietinum* L.) under different salinity condition. *Research in Agriculture Livestock and Fisheries*, **3(1)**, 105-113.

- **Howell, C. R., R, C, Beier, ET R. D, Stipanovic, (1988).** Production of ammonia by *Enterobacter cloacae* and its possible role in the biological control of *Pythium* preemergence damping-off by the bacterium. *Phytopathology*, 1075- 1078.
- Promoter improves its fitness and plant growth promoting ability. *Microbe Ecole* vol46, n. 1, p.p. 122– 133. **ISTA (INTERNATIONAL SEED TESTING ASSOCIATION).** International rules for seed testing. *Seed Science and Technology.*, 24, 1996, 335 p
- **Jalal, C. A., Sankar, B., Kishorekumar,A., Gopi, R., Somasundaram, R.,& al.,(2007).***pseudomonas fluorescens* enhances biomass yield and ajmalicine production in *Catharanthus roseus* under water defici stress, *colloids surf .B Biointe refaces* 60,7-11.doi :10.1016/crossruff .2007.05.012.
 - (K)
- **Kennedy, I. R., et Islam, N., (2001).** The current and potential contribution of a symbiotic nitrogen fixation to nitrogen requirements on farms: a review. *Animal Production Science*, 41(3), 447-457.
- **Khalid, A., M., Arshad, and Z.A, Zahir., (2006).** Phytohormones: microbial production and applications. *In: Biological Approaches to Sustainable Soil Systems.* (Eds.): N. Up off, A.S. Ball, E. Fernandes, H. Herren, O. Hasson, M. Laing, C. Palm, J. Pretty, P. Sanchez, N. Singing and J. This. Taylor & Francis/CRC, Boca Raton, Florida. p. 207-220
- **Khan, A. A., Jilani, G., Akhtar, M. S., Naqvi, S. M. S ET Rasheed, M., (2009).** Phosphorus solubilizing bacteria: occurrence, mechanisms and their role in crop production. *J Agric Biol Sci*, 1(1), 48-58.
- **Khan, A.L., Waqas, M., Kang, S.-M., Al-Harrasi, A., Hussain, J., Al-Rawahi, A., Al-Khiziri, S., Ullah, I., Ali, L., Jung, H.-Y., Lee, I.-J., (2014).** Bacterial endophyte *Phenomena's* sp. LK11 produces gibberellins and IAA and promotes tomato plant growth. *J. Microbiol.* 52, 689–695. <https://doi.org/10.1007/s12275-014-4002-7>.
- **Khan, K. S., et Joergensen, R. G., (2009).** Changes in microbial biomass and P fractions in biogenic household waste compost amended with inorganic P fertilizers. *Bioresource technology*, 100(1), 303-309. **Khan, M.S., Zaidi, A., Wani, P.A., Oves, M., (2009).** Role of plant growth promoting rhizobacteria in the remediation of metal contaminated soils. *Environ. Chem. Lett.* 7, 1–19. Kim J, D.C, 1994.Rees Nitrogenase and biological nitrogen fixation *Biochemistry*, 33 (), pp. 389–397.

- **King, E. O., Ward, M. K., & Raney, D. E., (1954).** Two simple media for the demonstration of pyocyanin and fluorescin. *The journal of laboratory and clinical medicine*, 44(2), 301-307.
- **Kirdi, B., Zermane, N., (2010).** Rôle des PGPR dans la stimulation de la croissance végétale et la lutte contre les phanérogames parasites : *Orobancha crenata* Forsk. Et *Cuscuta campestris* Yuncker / —Role of PGPR in plant growth promotion and control of the parasitic weeds: *Orobancha crenata* Forsk. And *Cuscuta campestris* Yunckerl.
- **Kloepper, J W., (1993).** Plant-growth-promoting rhizobacteria as biological control agents, In: *Soil Microbial Ecology*, (Ed.) F.B. Jr., and Metting. Marcel Dekker Inc., N.Y. p.255-273.
- **Kloepper, J.W., &Schroth, M.N., (1978).** Development of a Powder Formulation of Rhizobacteria for Inoculation of Potato Seed Pieces. *Phytopathology*.590-592.
- **Kloepper, JW., CM, Ryn et S, Zhang., (2004).** Induced systemic resistance and promotion of plant growth by *Bacillus* sp. *Phytopathology*, 1259-1266.
- **Konate, I., (2007).** Diversité Phénotypique et Moléculaire du Caroubier (*Ceratonia siliqua* L.) et des Bactéries Endophytes qui lui sont Associées. University Mohammed V-Agdal Faculty des sciences, Rabat.
- **Kuhad, R.C., Kothamasi D.M, Tripathi K.K. ET Ajay S., (2004).** Diversity and Promoter improves its fitness and plant growth promoting ability. *Microbe Ecole* vol46, n. 1, p.p. 122– 133.
- **Kumar, P., Dubey, R.C., (2012).** Plant Growth Promoting Rhizobacteria for Biocontrol of Phytopathogens and Yield Enhancement of *Phaseolus vulgaris* L. *J. Cur. Perspex. Appl. Microbiol.* 1, 6–38.
- **Kun Yuan, M, Reckling., M. D, Artigas Ramirez., S, Djedidi., I, Fukuhara, T, Ohyama., T, Yokoyama, S. D, Bellingerite-Kimura., M, Halwani., D, Egamberdieva., and N, Ohkama-Ohtsu., (2020).** Characterization of Rhizobia for the Improvement of Soybean Cultivation at Cold Conditions in Central Europe. *Microbes Environ.* Vol. 35,2-13.
Dio
:10.1264/jsme2.ME19124.

(L)

Lalo, B., Rai, P. K., & Ramteke, P. W., (2017). Effect of PGPR on improving the germination of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) under pH stress condition. *Int. J. Cur. Microbiol. & Appl. Sci*, 6(12), 4294-4302.

- Lemanceau, L., (1992).** Effets bénéfiques de rhizobactéries sur les plantes : exemple des *Pseudomonas* spp fluorescents 413–437, 414.
- **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.
- Prescott L., Harley J., Klein D., (2007).** Microbiology. 2eme edition. P 669-
- 675.1137.
- Lugtenberg B, Kamilova F., (2009).** Plant-growth-promoting rhizobacteria. *Annu Rev Microbiol* 63: 541-556. [Http:// dx.doi.org/10.1146/annurev.micro.62.081307.1](http://dx.doi.org/10.1146/annurev.micro.62.081307.1)
- Manero, F. J., Algar, E., Martin Gomez, M. S., Saco Sierra, M. D., Solano, B. R., (2003).** Elicitation of secondary metabolism in *Hypericum perforatum* by rhizosphere bacteria and derived elicitors in seedlings and shoot cultures. *Pharm. Biol.* 50 1201–1209 [10.3109/13880209.2012.664150](http://dx.doi.org/10.3109/13880209.2012.664150).
- (N)
- Nehra, V., Saharan, B. S., & Choudhary, M., (2016).** Evaluation of *Brevibacillus brevis* as a potential plant growth promoting rhizobacteria for cotton (*Gossypium hirsutum*) crop. *Springerplus*, 5(1), 948.
- **Neilands, JB., & SA. Leong (1986).** Siderophores in relation to plant growth and disease. *Ann. Rev. Pl. Physiol.*, 37: 187-208.
- Neilands, JB., K, Konopka., B, Schwyn., M, Coy., RT, Francis., B, Paw., (1987).** Comparative biochemistry of microbial iron assimilation. *In: Iron Transport in Microbes, Plants and Animals.* Winkelmann, G., van der Helm, D., and Neilands, J.B. (eds). Weinheim: VCH-Verlagsgesellschaft, pp. 3-33.
- **Neito K.F. et Frankenberger W.T. Jr., (1989).** Biosynthesis of cytokinins by *Azotobacter chroococcum*. *Soil Biol. Biochem.*, vol. 21, p.p.: 967-972.
- (O)
- **Oldroyd G.E.D., (2007).** Nodules and hormones. *Science*, vol. 315, n. 5808, p.p.52-57
- Oudjani, W., (2009)** Diversité de 25 géotypes de blé dur (*Triticum durum* Desf.) : étude des caractères de production et d'adaptation. Mémoire de magister, Université Mentouri, Constantine, 113 p.

- **O'Sullivan, D. J., & O'Gara, F., (1991).** Regulation of iron assimilation: nucleotide sequence analysis of an iron-regulated promoter from a fluorescent pseudomonad. *Mol. Gen. Genet.* 228: 1-8
- (P)
- **Pal K. K. and Gardener B. M., (2006).** Biological Control of Plant Pathogens. The Plant Health Instructor: 1-25.
- **Parma, P., Sindhu, S.S., (2013).** Potassium Solubilization by Rhizosphere Bacteria: Influence of Nutritional and Environmental Conditions. *J. Microbiol. RES.* 3, 25–31.
- **Penrose D.M. et Glick B.R., (2003).** Methods for isolating and characterizing Accademia's-containing plant growth-promoting rhizobacteria. *Physiologia Plantarum*, vol. 118, p.p. : 10–15
- **Perrodo Pascal., (2007).** Commissioning of the ATLAS detector and combined beam test results. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. Volume 572, Issue 1, 1 March 2007, Pages 113-116.
- **Peter H.R., Ray F.E. et Susan E.E., (2003).** Biologie végétale. De Boeck Supérieur, NewYork,684p.
- **Piano, S., V. Neyrotti, Q. Migheli et M.L Gullino., (1997).** Biocontrol capability of *Metschni kowiapul cherrima* against *Botrytis postharvest rot* of apple. *Postharvest Biol. Technol.* 11(3):131-140.
- **Pothier, F.J., Wisniewski, F., Weiss-Gayet, M., Moe" nne-Loccoz, Y., and Prigent-Combaret, C., (2007).** Promoter-trap identification of wheat seed extract induced genes in the plant-growth-promoting rhizobacterium *Azospirillum Brasiliense Sp245*. *Microbiology* 153,3608-3622. doi.org/10.1099/mic.0.2007/009381-0.
- **Prasad, J. K., Gupta, S. K., & Raghuwanshi, R. (2017).** Screening multifunctional plant growth promoting rhizobacteria strains for enhancing seed germination in wheat (*Triticum aestivum L.*). *International Journal of Agricultural Research*, 12(2), 64-72.
- **Prigent-Combaret, C., (2007).** Promoter-trap identification of wheat seed extract induced genes in the plant-growth-promoting rhizobacterium *Azospirillum Brasiliense Sp245*. *Microbiology* 153,3608-3622. doi.org/10.1099/mic.0.2007/009381-0.
- **Prescott L., Harley J., Klein D., (2003).** *Microbiology* .2eme edition. .669-675.1137p.

(Q)

- **Qureshi M. A., Ahmad Z. A., Akhtar. N., Iqbal A., Mujeeb F. and Shakir M. A., (2012)** Role of phosphate solubilizing bacteria (psb) in enhancing P availability and promoting cotton growth. *The Journal of Animal & Plant Sciences*, 22(1): 204- 210

(R)

- **Raaijmakers J. M., (2009).** the rhizosphere: a playground and battlefield for soil borne pathogens and beneficial microorganisms. *Plant and soil* 321 ,341361.
- **Rangarajan, S., Loganathan, P., Saleena, L. M., et Nair, S., (2001).** Diversity of pseudomonads isolated from three different plant rhizospheres. *Journal of applied microbiology*, 91(4), 742-749.
- **Reinhard, G., M, Rufa., J, Maruhn., W, Greiner. & J. Friedrich., (1986).** Nuclear ground-state properties in a relativistic Meson-Field theory. *Z. Physic A - Atomic Nuclei* 323, 13–25 (1986). doi.org/10.1007/BF01294551
- **Reyes, MEQ., KG. Rohrbach et RE. Paull., (2004).** Microbial antagonists control postharvest black rot of pineapple fruit. *Postharvest Biol. Technol.* **33(2)**:193-203.
- **Rogers, J.R., Bennett, P.C., Choi, W.J., (1998).** Feldspars as a source of nutrients for microorganisms. *Am. Mineral.* 83, 15321540.
- **Chauhan, J., Tomer, Y., Indra Kumar, S., Seema, A., Debarati, A., 2009.** Effect of growth hormones on seed germination and seedling growth of black gram and horse gram. *J Am Sci* 5, 79 84.
- **Roberts, H. A., (1981).** Seed Banks in Soil. *Adv. Appl. Biol.* 6: 1-55.
- **Roos, W., Luckner, M., (1984).** Relationships between proton extrusion and fluxes of ammonium ions and organic acids in *Penicillium cyclopium*. *Microbiology*, 130(4), 1007-1014
- **Ryu, C. M., Mohamed, A., Farag, chia- Hui., Munagala S. R., Han-Xun We., Paul W. Pare and JW. Kloepper., (2003).** Bacterial volatiles promote growth in *Arabidopsis*. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **100**: 4927-4932.

S

- **Saharan B.S., & Nehra V., (2011).** Plant Growth Promoting Rhizobacteria: A Critical Review. *Life Sciences and Medicine Research*, vol.: LSMR-21
- **Sahin, F., Çakmakçı, R., & Kantar, F., (2004).** Sugar beet and barley yields in relation to inoculation with N₂-fixing and phosphate solubilizing bacteria. *Plant and Soil*,

265(1-2), 123-129.

Scheres, B., Benfey, P., Liam Dolan., (2002). root development arabidopsis book. 1: e0101 doi: 10.1199/tab.0101.

SHARMA, (M. L.), (1973) - Simulation of drought and its effect on germination of five Pasture species. *Agro. J.*, 65: 982-987.

Shankar, K., Affrasayab, S., Hasmian, S., (2006). Growth responses of helianthus annuus to plant growth promoting rhizobacteria used a biofertilizer. *journal of agriculture research* 6,573-581.

- **Schroth MN, Hancock JG., (1981).** Selected topics in biological control. *Annu Rev Microbiol* 34, 453-476 Schroth MN, Hancock JG ,1982. Disease suppressive soil and root colonizing bacteria. *Science* 216, 1376-1381.
- **Singh G. et Mukerji K.G., (2006).** Root exudates as determinant of rhizosphere microbial biodiversity. *In: Microbial activity in the rhizosphere.*

Slama, H., et chergui, M., (2019). Isolement et caractérisation des pseudomonas sp stimulatrices de la croissance des plante (PGPR) à rhizosphère de citrullus colocynthis dans la région de Bir El-Ater. Mémoire de Master 2 Université de Tébessa.

- **Spaepen S., Vanderleyden J. et Remans R., (2007).** Indole-3-acetic acid in microbial and microorganism-plant signaling. *FEMS Microbiol Rev.*, vol. 31, p.p. : 425–428.
- **Srivastava L.M., (2002).** *Plant Growth and Development: Hormones and Environment.* Academic Press, San Diego, 772p.
- **Stengel, P., Gelin, S., (1998).** *Sol : interface fragile,* Inra. ed.

Stepanova, A.N., Yun, J., Likhacheva, A.V., Alonso, J.M., 2007. Multilevel Interactions between Ethylene and Auxin in Arabidopsis Roots. *Plant Cell* 19, 2169-2185. <https://doi.org/10.1105/tpc.107.052068>.

- **Susana. L, Maruri-Avidal. L, Arias.CF., (2008).** Endoplasmic reticulum chaperones are involved in the morphogenesis of rotavirus infectious particles. *J. Virol.* 82:5368–5380
- **Susana. L, Montero .H, Rojas .M, Arias.CF., (2008).** Rotavirus infection induces the phosphorylation of eIF2alpha but prevents the formation of stress granules. *J. Virol.* 82:1496–1504

- **(T)**
Tabatabaei, S., Ehsanzadeh, P., Etesami, H., Alikhani, H. A., & Glick, B. R., (2016). Indole-3-acetic acid (IAA) producing Pseudomonas isolates inhibit seed germination and

α -amylase activity in durum wheat (*Triticum turgidum* L.). *Spanish journal of agricultural research*, 14(1), 15.

- **Tariq M, Hameed S, Yasmeen T, Zahid M, et al., (2014)** Molecular characterization and identification of plant growth promoting endophytic bacteria isolated from the root nodules of pea (*Pisum sativum* L.) *World J Microbiol Biotechnol* 30: 719-725.
 - (U)
- **Uroz S., (20/02/2015).** Miss Marta Torres Béjar, Dr. Laura C. K., Dr. Cendrella, Dr. Christelle C. Dr. Panos I. Interaction Arbre \pm Microorganismes. University dLorraine.
 - (V)
- **Van Loon L.C.& Bakker P.A.H.M., (2005).** Induced systemic resistance as a mechanism of disease suppression by rhizobacteria. In *PGPR: Biocontrol and Biofertilization*, edited by Z.A. Siddiqui: Springer, pp.:39-66.
- **Van oostende, C., (2006).** Analyse quantitative des réponses précoces à l'auxine dans une suspension de cellules de Tabac. These de doctor at end sciences. University Bordeaux
- **Van Peer, R., G.J. Niemann et B. Schippers., (1991).** Induced resistance and phytoalexin accumulation in biological control of *Fusarium* wilt of carnation by *Pseudomonas* sp. strain WCS417r. *Phytopathology*, **81**: 728–734
- **Vittorio V., Christoph K., (2016.01.05).** Signaling in the Rhizosphere. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tplants>. trends in plant science. (W)
- **Wang Y, HN. Brown, DE. Crowley et PJ. Szaniszlo (1993).** Evidence for direct utilization of a siderophore, ferrioxamine B, in axenically grown cucumber. *Plant Cell. Environ.*
 - (Z)
- **Zahir, Z. A., Arshad, M., Frankenberger, W. T., (2003).** Plant growth promoting rhizobacteria: applications and perspectives in agriculture. *Advances in Agronomy*, **81**, 97-168.

Annexes

Tableau de nombres aléatoires

01581	36001	15892	57621	85239
02972	56177	87580	66794	48123
97022	65380	91304	32853	99729
67583	01277	77815	60558	75920
26935	56306	38710	77239	47139
21201	75983	35695	60517	14579
02628	26124	68322	01436	85994
93635	69404	76323	33459	70041
08984	81320	03226	60959	78246
04415	78662	28295	46513	92889
13070	18401	14382	48262	53177
53531	36891	29620	72532	47368
87733	74995	61843	88472	15736
47619	57452	92819	34401	48782
94060	67951	28895	79309	91897