

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Larbi Tebessi -Tébessa

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

Département de Biologie Appliquée



MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE MASTER

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Biologie

Option : Microbiologie Appliquée

THÈME

*Appréciation de l'effet PGPR des rhizobactéries de
figuier de Barbarie (Opuntia ficus-indica)*

Présenté Par :

Benarfa Rania

Akrout Omaira

Chorfi Bouthaina

Date de soutenance : 28/06/2020

Devant le jury :

BOUKOUCHA Mourad	MCA	U. Tébessa	Président
BENHADJ Mabrouka	MCB	U. Tébessa	Examineur
MENASRIA Taha	MAA	U. Tébessa	Rapporteur
DEKAK Ahmed	MCB	U. Tébessa	Co-encadreur

Année universitaire 2019-2020

Dédicace



Le présent travail, fruit de longues
Années d'efforts et de persévérance
Est dédié A toutes personnes qui nous
Sont chères surtout à nous parents
Qui nous ont beaucoup donné
Pour être ce que nous sommes

Rania &

Bouthaina &

Oumaima





REMERCIEMENTS

Avant tous, nous remercions *ALLAH* tout puissant de nous avoir accordé la force, le courage, la patience et la chance d'étudier et de suivre le chemin de la science.

Nos remerciements les plus sincères s'adressent en premier lieu à notre encadreur *Dr. MENASRIA Taha* pour ses conseils judicieux et son appui tout au long de cette étude et surtout pour ses nombreuses critiques constructives. Votre sérieux, votre compétence et votre sens du devoir nous ont énormément marqués.

À *Dr. DEKAK Ahmed* pour ces encouragements et ces précieux conseils.

Nos remerciements s'adressent également à tous les membres de jury qui ont bien voulu accepter de juger ce modeste travail, *Dr. BOUKOUCHA Mourad* qui nous a fait l'honneur de présider ce jury, et *Dr. BENHADJ Mabrouka* qui nous a honoré de bien vouloir examiner ce travail.

Un grand merci aux techniciens et l'équipe des laboratoires SNV de la faculté de Sciences de la nature et de la vie, pour leur aide précieux, leur patience et leurs conseils et grande disponibilité.

Nous n'oublions pas de remercier l'ensemble des enseignants qui ont contribué à nos formations, et tous nos collègues de promotion 2020, Master II Microbiologie appliquée.

Finalement, nous remercions nos amies, nos familles qui nous ont soutenus avec patience et qui nous ont donné leur confiance, merci pour leur encouragement et leur compréhension. Nous leur exprimons notre éternelle gratitude.

A tous ceux qui nous ont aidés à accomplir cette tâche, soit directement ou indirectement, nous



Résumé

Le sol n'est pas simplement le support dans lequel les plantes s'enracinent et puisent les éléments nutritifs indispensables à leur développement. Le sol est un réservoir important de micro-organismes notamment les rhizobactéries, en termes de diversité et de densité. Ces bactéries ont le potentiel de produire une diversité de molécules biologiques actives et antimicrobiennes et jouent un rôle important dans le maintien de l'équilibre du sol, parmi ces deux groupes, il y a celles qui ont montré leur capacité à favoriser la croissance des plantes, elles sont connues sous le terme de Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR). Dans le cas de ces plantes on trouve le Figuiers de Barbarie qui présente un intérêt fondamental en agro-écologie et une source importante en PGPR non exploitée. En effet, ces PGPR peuvent agir positivement sur la croissance de la plante, en augmentant le prélèvement des éléments nutritifs du sol, en induisant et produisant des régulateurs de croissance végétale et en activant les mécanismes de résistance induite chez d'autres végétaux.

Mots clés : Figuiers de Barbarie, PGPR, croissance des plantes

Abstract

The soil is not simply the support in which plants take root and draw the nutrients essential for their development. The soil is an important reservoir of microorganisms, notably rhizobacteria, in terms of diversity and density. These bacteria have the potential to produce a variety of active biological and antimicrobial molecules, which play an important role in maintaining the host plant's soil balance. Among these two groups, there are those which showed their capacity to support the growth of the plants, they are known under the term of Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR). In the case of these plants, we find the Prickly pear, which presents a fundamental interest in agro-ecology and an important source in PGPR not to exploit. Indeed, these PGPRs can act positively on plant growth, by increasing the removal of nutrients from the soil, by inducing and producing plant growth regulators and by activating the resistance mechanisms induced in other plants.

Keywords: Prickly pear, PGPR, plant growth.

ملخص

التربة ليست مجرد الداعم الذي تتأصل فيه النباتات وترسم العناصر الغذائية الأساسية لتنميتها. تعتبر التربة مستودعا مهما للكائنات الحية الدقيقة، لا سيما البكتيريا الجذرية، من حيث التنوع و الكثافة. هذه البكتيريا لديها القدرة على انتاج مجموعة متنوعة من الجزيئات البيولوجية و مضادات الميكروبات النشطة، و التي تلعب دورا مهما في الحفاظ على توازن التربة و النبات المضيف. من بين هاتين المجموعتين هناك تلك التي اظهرت قدرتها على دعم نمو النباتات، و المعروفة تحت مصطلح نمو البكتيريا الجذرية (PGPR). في حالة هذه النباتات، نجد التين الشوكي، الذي يمثل اهتماما اساسيا بالبيئة الزراعية و مصدرا مهما ل PGPR لعدم استغلاله. في الواقع، يمكن لهذه PGPRs ان تعمل بشكل ايجابي على نمو النبات، عن طريق زيادة ازالة المغذيات من التربة، عن طريق حث و انتاج منظمات نمو النبات و تفعيل اليات المقاومة المستحثة في النباتات الاخرى.

الكلمات المفتاحية : التين الهندي، PGPR، نمو النبات.

Liste des figures

Chapitre I		
Figure	Titre	Page
1	Répartition mondiale d' <i>Opuntia ficus-indica</i>	5
2	<i>Opuntia ficus indica</i>	6
3	Aspect général d' <i>Opuntia ficus indica</i>	8
4	Photosynthèse de type CAM	9
5	Figuier de barbarie (<i>Opuntia ficus indica</i>) de la région de Hamma Bouziane, Constantine (Algérie)	10
6	Variété d' <i>Opuntia ficus-indica</i> :(A) : épineuse ; (B):inermes	10
7	Le fruit du Figuier de Barbarie	12
8	Raquette d' <i>Opuntia Ficus Indica</i>	12
9	Fleur d' <i>Opuntia Ficus Indica</i>	13
Chapitre II		
Figure	Titre	Page
1	La rhizosphère	17

2	La structure de la rhizosphère	18
Chapitre III		
Figure	Titre	Page
1	Interactions entre plantes et bactéries coopératives dans la rhizosphère	22
2	Représentation du cycle d'azote selon (Johann Dréo, 2006)	24
3	Structure générale des siderophores citrate-hydroxamate	28

Liste des tableaux

Chapitre III

Tableau	Titre	Page
1	Isolation et sélection de quelque du PGPR	21
2	Substance favorisant la croissance libérée par PGPR	23
3	Termes adoptés pour classer les mécanismes par lesquelles les PGPR stimulent la croissance des plantes	32

Liste des abréviations

PGP: Plant Growth Promoting.

PGPR: Plant Growth Promoting Rhizobacteria.

WANA: Ouest d'Asie et le Nord-africain.

CAM: Crassulacean Acid Metabolism.

CO₂: Carbon dioxide.

PEP : Phosphoénolpyruvate.

PH: potentiel d'Hydrogène.

LDL: Low density lipoprotein.

HDL: High density lipoprotein.

Kg: Kilogramme.

He: Hectare.

N₂: Azote gazeuse.

AIA : Acide Indole Acétique.

(ACC) : 1-aminocyclopropane-1-carboxylate désaminase.

NO₃⁻ : Nitrates.

NH₄⁺ : Ammoniaque.

H₂PO₄ : Ions monobasique.

HPO₄²⁻ : Ions basique.

KSB: Potassium solubilizing bacteria.

EFE : Enzyme formant l'éthylène.

B : Bacillus.

P: Pseudomonas.

DAPG: Diacetylphloroglucinol.

EPS: Extracellular polymeric substance.

RFCP: Rhizobactérie Promotrice De la Croissance des Plantes.

PGPF: Plant Growth-Promoting Fungi.

Table des matières

Remerciements

Résumé

Abstract

ملخص

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Table des matières

SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction1

Chapitre 1 : Le figuier de barbarie

I.1. Origine et diffusion.....5

I.2. Définition.....5

I.3. Classification.....6

I.4. Description morphologique.....7

I.5. Physiologie.....8

I.6. Le Fiquier de barbarie en Algérie.....9

I.7. Exigences écologiques de figuier de barbarie.....10

I.7.1. Facteurs édapho-climatiques.....10

I.7.2. Facteurs biotiques.....11

I.8. Importance agro économique du figuier de barbarie.....11

I.8.1. Utilisation des fruits.....11

I.8.2. Production fourragère.....12

I.9. Propriétés médicinales.....13

Chapitre II : la rhizosphère

II.1. Généralité.....16

II.2. Les microorganismes de la rhizosphère.....17

II.3. Les bactéries rhizosphérique ou rhizobactéries	18
II.4. Les facteurs conditionnant la flore rhizosphérique	19
Chapitre III: Plant Growth Promoting Bacteria (PGPR)	
III.1. Isolement et caractérisation de Plant Growth Promoting Bacteria.....	21
III.2. Rhizobacteries stimulatrices de la croissance végétale.....	22
III.3. Effet directe des PGPR sur la plante.....	23
III.3.1. Acquisition des ressources	23
III.3.1.1. Fixation d'azote	23
III.3.1.2. Solubilisation du phosphate.....	24
III.3.1.3. Solubilisation du potassium.....	25
III.3.1.4. La solubilisation du Zinc	25
III.3.2. Production des phytohormones.....	25
III.3.2.1. Acide Indole Acétique (IAA).....	26
III.3.2.2. 1-Aminocyclopropane-1-carboxylate (ACC) désaminase.....	26
III.3.2.3. Production des cytokines.....	27
III.3.3. Production des sidérophores.....	27
III.4. Effet indirect des PGPR sur les plantes.....	28
III.4.1. Production d'enzymes lytique par PGPR : chitinase et de glucanase.....	28
III.4.2. Productions des antibiotiques.....	28
III.4.3. Induction d'un système de résistance	29
III.4.4. La compétition.....	30
III.5. Formation des biofilm par les PGPR.....	30
III.6. utilisation des PGPR en agri-culture	31
Conclusion	33
Références bibliographiques	35

Introduction

Introduction

Le Nopal originaire d'Amérique centrale, s'est répandu à travers tout le continent, il fut ramené en Europe après la première expédition de Christophe Colomb par les Espagnols. A l'aube du seizième siècle, la plante s'est répandue dans le bassin méditerranéen suite aux expansions espagnoles et aussi par le retour des arabes à leur pays dans le nord-africain suite à leur expulsion par Philippe III en 1610. Les expulsés appelés « morisqués » ont ramené avec eux des raquettes qu'ils ont plantées autours de leurs villages. La plantation du figuier de barbarie a été considérablement étendue dans la région du sud de l'Afrique (1772), l'Inde (1780), les Philippines (1695), la Chine (1700) et l'Indochine (1790) **(Briha, 2012)**.

C'est grâce à l'homme que le Nopal doit d'avoir franchi les océans. Dans notre partie du monde, on trouve donc maintenant la plante à l'état subspontané de l'Afrique du Nord jusque dans la France méridionale et les vallées suisses du Tessin et du Valais. Le cactus mexicain s'acclimate rapidement à l'ensemble des rivages méditerranéens. Ne craignant aucunement l'aridité, il s'adapte facilement à des sols très secs et pauvres **(Benattia, 2017)**.

Le sol héberge une grande diversité de communautés microbiennes qui interagissent entre elles et qui, dans la rhizosphère, interagissent aussi avec les racines des plantes. Les activités de certaines populations microbiennes peuvent être bénéfiques à la croissance des plantes. Ces microorganismes utiles peuvent constituer des associations symbiotiques comme c'est le cas entre les légumineuses et des bactéries fixatrices d'azote ou entre les champignons mycorhizogènes de l'ordre des Glomales et de nombreuses espèces végétales. D'autres microorganismes dits « libres » possèdent aussi la capacité de favoriser la croissance des plantes, en solubilisant des nutriments non ou peu disponibles dans le sol, mais aussi en libérant dans la rhizosphère des substances de croissance de type hormonal. Depuis une dizaine d'année l'industrie des « biostimulants » a mis sur le marché un grand nombre de produits à base de microorganismes bénéfiques, bactéries ou champignons, libres ou symbiotiques. Leur efficacité dépend de nombreux facteurs parmi lesquels, la culture, le type de sol, la qualité du produit et le mode d'application jouent un rôle prépondérant. **(Alabouvette et Cordier, 2018)**.

Les communautés microbiennes associées aux cultures qui poussent dans des conditions de stress abiotiques diverses ont fait l'objet de beaucoup d'attention, car la sécurité alimentaire liée à l'augmentation constante de la population et à l'augmentation de la production agricole est un besoin urgent au 21ème siècle.

Notre travail s'est effectué au niveau des laboratoires de Microbiologie Générale, de l'Université Larbi Tebessi. Afin de sélectionner les bactéries les plus performantes au potentiel d'auxiliaires de la croissance des plantes ; nous avons procédé à la : - pré-identification des bactéries préalablement isolées de la rhizosphère du figuier de Barbarie, en se basant sur leurs caractères morphologiques : macroscopiques, microscopiques - évaluation du potentiel PGP de ces rhizobactéries, en s'appuyant sur le screening de leur capacité à produire des métabolites particuliers (Enzymes hydrolytiques). Notre mémoire se présente en deux grandes parties : - la première est consacrée à une synthèse bibliographique sur les recherches effectuées dans notre domaine de recherche notamment (Figuier, Rhizobactérie et Rhizosphère et PGPR) ; - la deuxième présente le matériel, les méthodes d'analyses suivies lors de cette expérimentation ; la présentation et la discussion des résultats obtenus ; - et enfin, le mémoire se conclura en dégageant quelques perspectives de ce travail.

Chapitre I :

Le figuier de barbarie

I.1. Origine et diffusion

Le genre *Opuntia* est originaire du Mexique (Orwa *et al.* 2009) et figure d'ailleurs sur l'emblème du drapeau mexicain. Sa distribution géographique est très large (Fig.1) : Mexique, Sicile, Chili, Brésil, Turquie, Corée, Argentine et Afrique du Nord (Barbera *et al.* 1992 ; Nerd et Mizrahi, 1994 ; Felker *et al.* 2005 ; Kabas *et al.* 2006 ; Saleem *et al.* 2006 ; Snyman, 2006). Il a été introduit d'abord en Espagne et plus tard au 16^e siècle au Nord et au Sud de l'Afrique. Il s'est diffusé rapidement dans le bassin méditerranéen et s'y est naturalisé au point de devenir un élément caractéristique du paysage (Le Houerou, 1996 ; Erre *et al.* 2009). Il est par essence développé sur la partie Ouest de la Méditerranée : Sud de l'Espagne, le Portugal, et l'Afrique du Nord (Tunisie, Algérie et Maroc) (Bensalem *et al.* 2002 ; Arba, 2009). A titre d'exemple, la superficie cultivée dans la région du WANA (Ouest d'Asie et le Nord-africain) est d'environ 900.000 ha (Nefzaoui et Bensalem, 1998). Dans certains pays tels que l'Italie, l'Espagne, le Mexique, la culture du cactus est pratiquée de façon intensive et moderne avec des programmes de recherche-développement pour la production du fruit ou de fourrage et même pour des usages industriels (Mulas et Mulas, 2004). En revanche, en Australie et en Afrique du Sud (Dean et Milton, 2000 ; Orwa *et al.* 2009), ce végétal, en particulier la variété asperme est considérée comme une mauvaise herbe à cause de la facilité avec laquelle, elle se propage.

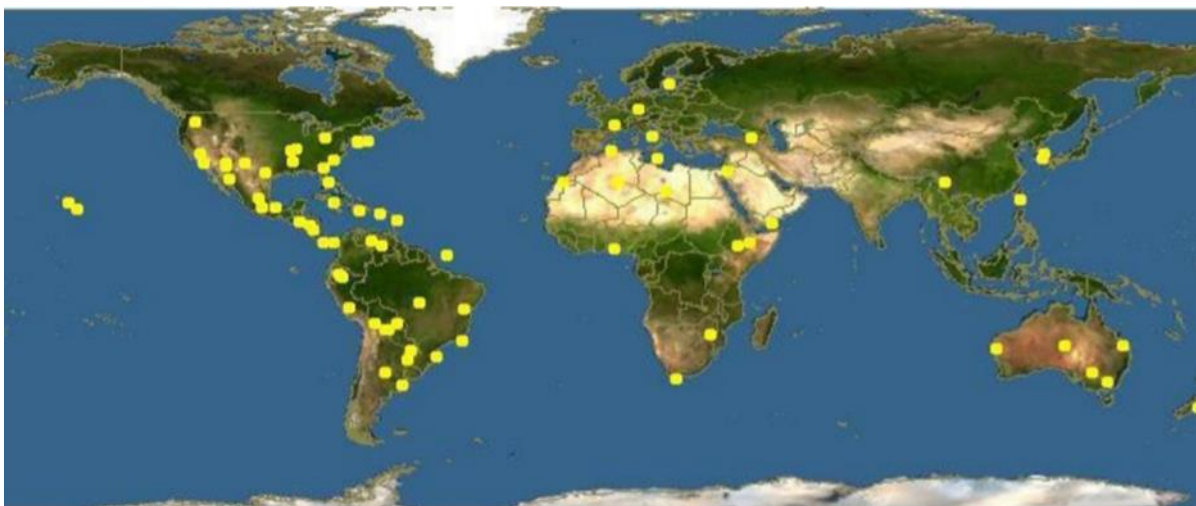


Figure 1. Répartition mondiale d'*Opuntia ficus-indica*.

I.2. Définition

Le figuier de Barbarie est originaire du Mexique, il est bien adapté aux zones arides et semi-arides (Reynolds *et al.* 2003). Il occupe une partie importante dans l'alimentation humaine et il est également utilisé comme fourrage pour le bétail. C'est une plante

intéressante en raison des conditions environnementales dans lesquelles elle se développe et sa résistance aux conditions climatiques extrêmes (**Hernández-Urbiola et al. 2011**). Le figuier de Barbarie qui est une plante xérophyte, produit des fruits comestibles ses raquettes sont riches en eau et éléments nutritifs (**Arba, 2009**). Plusieurs noms sont attribués au figuier de barbarie afin de donner une parfaite présentation de cette plante (**Oued et al. 1990**) :

-Nom scientifique : *Opuntia ficus indica*

-Nom berbère : El hendi, sabara, karmoussnsarra

-Nom français : Figuier de barbarie, le nopal, figuier d'inde

-Nom anglais : Prickly pear

Il est appelé aussi, Cactus-raquette, oponce, figue de chrétien (**Felice, 2004**).



Figure 2. *Opuntia ficus indica*.

I.3. Classification

Règne : Plantae

Sous règne : Tracheobionta

Embranchement : Phanérogames

Sous Embranchement : Magnoliophyta

Classe : Magnoliopsida

Sous classe : Caryophyllidae

Ordre : Opuntiales

Famille : Cactaceae

Sous-famille : Opuntioideae

Tribu : Opuntieae

Genre : *Opuntia*

Sous-genre : *Platyopuntia*

Espèce : *Opuntia ficus indica* (L.) (Wallace et Gileson, 1997)

I.4. Description morphologique

Le figuier de Barbarie est une plante arborescente, caractérisée par des tiges en forme de raquettes plates charnues et ovales pouvant atteindre 3 à 4 mètres de haut (**Fig.3**). Les raquettes, appelées cladodes, mesurent 30 à 40 centimètres de long, sur 15 à 25 cm de large et 1,5 à 3 cm d'épaisseur. De couleur verte, elles s'unissent les unes aux autres, en formant des sortes de branches. Elles sont recouvertes d'une cuticule cireuse (la cutine) qui limite la transpiration de la plante et la protège tout en assurant la fonction chlorophyllienne à la place des feuilles. Leur surface est parsemée d'alvéoles au sein desquelles naissent, sur les cladodes en formation, des feuilles fragiles, éphémères et caduques. Elles portent de redoutables épines munies de minuscules aiguillons recourbés vers leur base. Les cladodes de la base, en vieillissant, finissent par se lignifier pour former un véritable tronc. Le figuier de Barbarie donne des fleurs et des fruits en abondance. Les fleurs apparaissent sur le dessus des raquettes, larges de 4 à 10 cm et de couleur jaune, orange ou rouge. Ces fleurs sont comestibles, comme le fruit auquel elles donnent naissance qui se présente sous la forme d'une grosse baie ovoïde et charnue, dont la peau verte jaunâtre est, elle aussi, ornée de petites épines. Dans les climats tempérés, la floraison a lieu en avril, mai et les fruits sont cueillis fin juillet à septembre, dès qu'ils deviennent un peu mous. Dans certaines contrées arides et chaudes, la plante peut donner des fruits deux fois par an. Appelé figue de Barbarie, ce fruit a une chair d'une couleur variant du jaune clair au rouge violacé et dont le goût se révèle délicieux et subtil. Ses graines, riches en vitamines et en oligoéléments, lui confèrent de nombreuses propriétés et c'est à partir de ces graines que l'on obtient une huile très recherchée (**Revue nature et santé, 2011**).

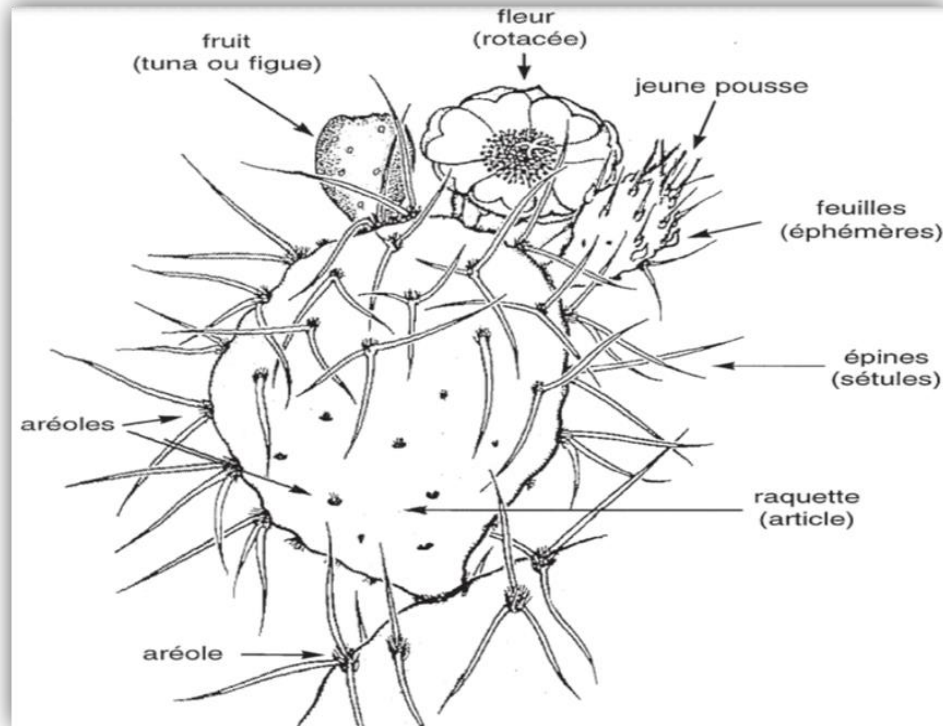


Figure 3. Aspect général d'*Opuntia ficus indica* (Schweizer, 1997).

I.5. Physiologie

Le figuier de Barbarie est une plante qui a une photosynthèse de type CAM (Crassulacean Acid Metabolism). Elle a la particularité de fixer le CO_2 pendant la nuit, le stocker et de fermer ses stomates pendant le jour. Une telle stratégie permet d'éviter les pertes en eau par évapotranspiration qui peuvent avoir lieu le jour et d'optimiser ainsi l'utilisation d'eau (Stintzing *et al.* 2005). Les stomates s'ouvrent uniquement la nuit, car à ce moment, la température est plus basse que durant la journée et le taux d'humidité est plus élevé. Cela provoque une faible évapotranspiration et donc de faibles pertes d'eau. C'est pourquoi les plantes CAM se sont spécialisées dans la fixation du CO_2 pendant la nuit. Cette fixation est réalisée par la phosphoénolpyruvate carboxylase (PEP), qui provient de la dégradation de l'amidon et du saccharose produit dans le chloroplaste le jour. Cette fixation permet de former de l'oxaloacétate, qui sera immédiatement réduit en malate, puis stocké dans une vacuole sous forme d'acide malique, d'où le nom de plante à métabolisme acide.

Autrement dit, durant la nuit, le figuier de Barbarie fait "le plein" de CO_2 sous forme d'acide malique, mais il ne peut pas le transformer tout de suite en sucre du fait de l'obscurité. En effet, comme toutes les autres plantes, les plantes CAM ont besoin de l'énergie lumineuse

du jour pour compléter le cycle de Calvin et pour ainsi accomplir la photosynthèse en entier (Goldstein *et al.* 1991) (Fig.4).

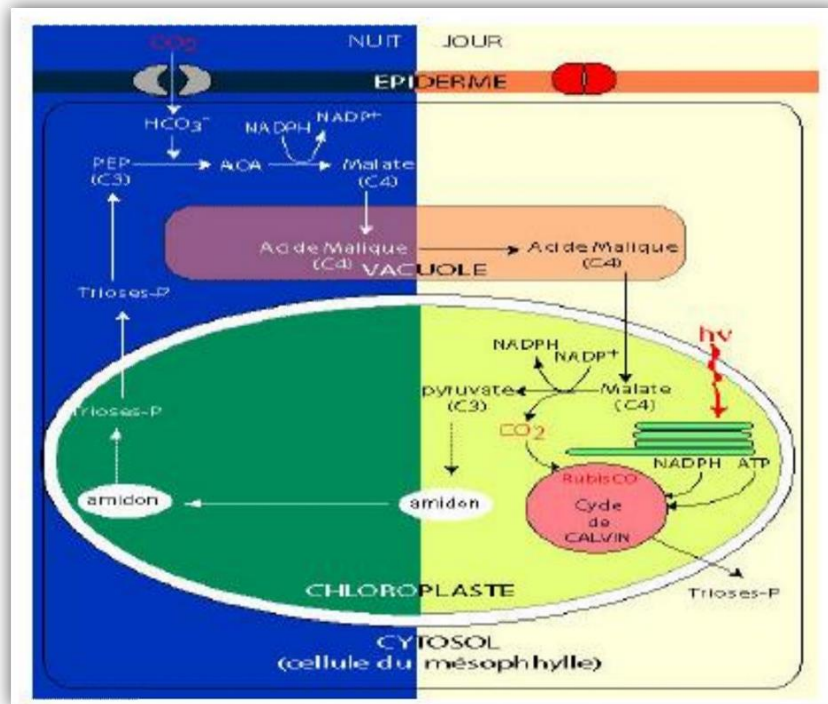


Figure 4. Photosynthèse de type CAM.

I.6. Le Fiquier de barbarie en Algérie

Les espèces de cactus les plus largement répandues dans les pays du Maghreb, sont *Opuntia dillenii*, *Opuntia vulgaris*, *Opuntia compressa* et *Opuntia ficus indica*. Cette dernière est la principale espèce qui produit les fruits comestibles (Araba *et al.* 2000). Deux formes d'*Opuntia ficus indica* (L.) (Fig.5) poussent dans plusieurs steppes Algériennes étudiées par Chaouche et Abdul-Hussain, (2008): une inerme et une épineuse (Fig.6).

- ✚ Les formes inerms présentent des différences au niveau de leurs pores, de la couleur du fruit et de la période de fructification. Les dimensions et le poids du fruit est influencés par la période sèche et par la période de précipitation.
- ✚ Les formes épineuses font partie de trois étages bioclimatiques différents et elles diffèrent entre elles par la couleur de la chaire et par la présence des épines (Su et Zhao, 2003).



Figure 5. Fiquier de barbarie (*Opuntia ficus indica*) de la région de Hamma Bouziane, Constantine (Algérie).

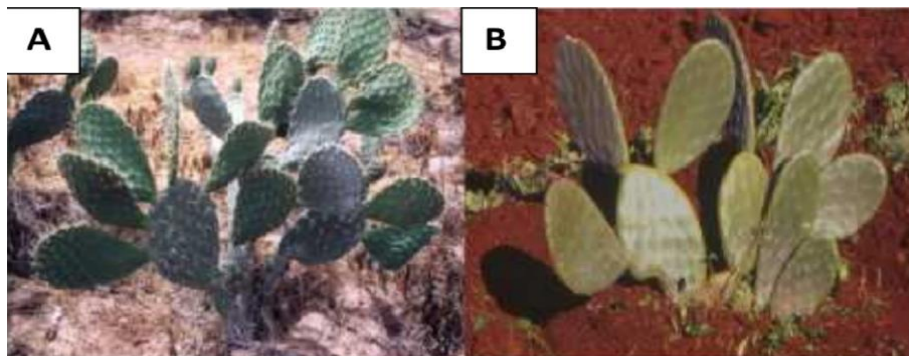


Figure 6. Variété d'*Opuntia ficus-indica*: (A) : épineuse ; (B): inerne (Mulas et Mulas, 2004).

L'Algérie déploie ces dernières années un effort important pour encourager la culture de la figue de Barbarie, pour son importance socioéconomique et écologique (Temagoult, 2017).

I.7. Exigences écologiques de figuier de barbarie

I.7.1. Facteurs édapho-climatiques

Le figuier de barbarie possède une grande adaptation aux conditions les plus hostiles (aridité du climat, salinité des sols, terrains de faible potentiel agricole). Son extension est limitée surtout par les basses températures hivernales, son seuil de tolérance étant de -10°C . Le cactus s'accommode mal des sols hydro morphes et asphyxiants. Les sols préférés sont les sols légers, sablonneux-limoneux. Il s'agit des sols légèrement pauvres en matière organique (0.1-1.8 %) ayant des pH légèrement acides (5.1-6.7). Pour plusieurs espèces *Opuntia* le pH

est un facteur limitant, mais l'*Opuntia ficus indica* est rencontré même dans des sols calcaires (Abidi, 2010).

I.7.2. Facteurs biotiques

De nombreuses parasites et maladies sont rencontrés dans le cactus :

✚ La rouille (*Phyllostica opuntiae*) : se manifeste par des tâches de couleur jaune-rouille, circulaires, pouvant s'étendre en plaques irrégulières d'un blanc sale ou cendré sur les raquettes.

✚ Le mildiou des cactus (*Phytophthora cactorum*) : les symptômes de la maladie se présentent sous forme de cloques soulevant l'épiderme, d'état chlorotique prononcé et de taches brunâtres qui envahissent les fruits et les raquettes.

✚ La cératite (*Ceratitis capitata* Wied) : une mouche méditerranéenne des fruits qui peut occasionner des dégâts importants dans les plantations mal entretenues.

✚ Les cochenilles : bien que généralement polyphages, certaines espèces de cochenilles sont des parasites spécifiques à l'espèce *Opuntia* (Nerd et al. 1991).

I.8. Importance agro économique du figuier de barbarie

L'adaptation du figuier de barbarie aux conditions désertiques et semi désertiques lui permet de constituer une culture à intérêts écologiques et socioéconomiques indéniables. En effet, il constitue un bouclier contre la désertification et l'érosion des sols. Il est également cultivé pour la régénération des terres. Il ne demande pas de pratiques culturales spécialisées ni d'apport de fertilisants (Saenz, 2000).

I.8.1. Utilisation des fruits

Les fruits sont appréciés et donnent lieu à plusieurs produits, dont quelques-uns sont connus et d'autres sont récemment développés ou en cours de recherche.

La pulpe et le jus sont les utilisations les plus communes et domestiques du figuier de barbarie. Plusieurs études ont été faites sur le jus et ont montré que ce produit a un goût et un parfum agréables. Une autre possibilité est la production des jus concentrés qui manifestent une bonne stabilité microbiologique.

La pulpe peut être utilisée pour préparer des gels comme les gels de pomme et cognassiers. La confiture est un autre produit qui peut être préparé à partir du fruit. Elle présente une bonne qualité sensorielle et une stabilité microbiologique. Les fruits déshydratés sont une autre forme comestible du produit, ils peuvent être aussi conservés en boîtes ou

congelés (Saenz, 2000). Le figuier de barbarie est utilisé aussi dans la préparation des boissons alcoolisées à partir de la pulpe tamisée (Espirad, 2002).

La couleur des figes de barbarie est due à des bétalaines et aux pigments azotés de couleur rouge ou jaune. Ces pigments peuvent être extraits et utilisés comme additifs dans les préparations alimentaires, dans les domaines pharmaceutiques et cosmétiques (Piga, 2004).



Figure 7. Le fruit du Fiquier de Barbarie (Benkaddouri, 2011).

I.8.2. Production fourragère

L'Opuntia ficus indica représente une source alternative de fourrage, en particulier durant les périodes de sécheresse (Bensalem *et al.* 2002 ; Dubeux *et al.* 2006 ; Snyman, 2006 ; Tegegne *et al.* 2007). Les cactées fourragères sont riches en hydrates de carbone digestibles, en lipides, en vitamines, en eau, en minéraux et pauvres en protéines (Hernandez *et al.* 2004 ; Tegegne *et al.* 2007 ; Costa *et al.* 2009).

Il reste important de rappeler qu'il s'agit d'une culture strictement nécessaire en milieux aride et semi- aride, vu qu'en certaines périodes de l'année, elle est le seul aliment disponible pour le bétail. La consommation des raquettes passe par l'élimination des épines, éventuellement les aréoles avec des torches alimentées à l'essence, action directe du feu à la surface, l'immersion dans l'eau, l'utilisation de la vapeur, lavage avec la soude (Mulas et Mulas, 2004). Le bétail élevé dans le Sud-est des Etats unis, au Mexique et en Algérie est alimenté avec les raquettes coupées ou les fruits de nombreuses espèces indigènes (Neffar, 2012).



Figure 8. Raquette d'Opuntia Ficus Indica (Benkaddouri, 2011).

I.8.3. Utilisation des fleurs

Avec un calendrier apicole qui dure 7 mois (mars-septembre), l'activité des abeilles a lieu sur les fleurs de *l'Opuntia ficus-indica* pendant 3 mois (avril- juin), ce qui permet de développer l'apiculture en parallèle. Les rendements des ruches sont de 1- 4 litres de miel (**Habibi, 2004**). Les fleurs sont aussi utilisées à des fins médicinales. En effet, les capsules des corolles des fleurs séchées sont utilisées comme remède du dysfonctionnement de la prostate (hypertrophie ; bénigne de la prostate), et aussi comme régulateur diurétique (**Palevitch, 1994**). En Sicile, le thé préparé avec les fleurs de *l'Opuntia ficus-indica* est utilisé comme traitement contre les douleurs rénales (**Park et al. 2001**)



Figure 9. Fleur d'*Opuntia Ficus Indica* (**Benattia, 2017**).

I.9. Propriétés médicinales

En Australie et en Afrique du Sud, l'effet hypoglycémique des "Nopalitos" est utilisé dans le traitement des diabètes non dépendants de l'insuline. Le mucilage isolé des raquettes permet de réduire le cholestérol total dans le sang. Les femelles des cochenilles *Dactylopius coccus costa* ou *Dactylopius opuntiae cockerell*, qui prolifèrent sur des raquettes de *l'Opuntia ficus indica*, sont utilisées pour la production d'un colorant de couleur rouge « le carmin » ou l'acide carminique. Ce colorant (E-120) est très utilisé par les industries alimentaires, cosmétiques et médicinales (**Habibi, 2004**).

En Afrique du Nord comme au Mexique, on utilisait les raquettes hachées sous forme de cataplasmes dans le pansement des foulures, des entorses et dans la réduction des fractures. Les médecins coloniaux préconisaient l'*Opuntia* dans le traitement des abcès, des cors, des durillons, des furoncles et de toutes les inflammations digestives et cutanées.

La recherche moderne a non seulement confirmé les vertus du Nopal, que la médecine traditionnelle seule reconnaissait jusqu'à nos jours, mais découvre chaque année de nouvelles propriétés (**Schweizer, 1997**).

I.9.1. Hyperglycémie

Le Nopal, par sa forte teneur en fibres régularise et freine l'assimilation des molécules de sucre tant au niveau de l'estomac que de l'intestin ce qui induit une diminution du taux de sucre dans le sang. Selon le Dr J.Robert, certaines enzymes faisant partie de sa structure chimique agiraient comme une insuline naturelle, combattent souvent avec succès les dangereux effets secondaires d'un excès de sucre dans le sang: la détérioration de la vision, des vaisseaux sanguins et des tissus nerveux (**Schweizer, 1997**).

I.9.2. Hyperlipidémie (taux élevé de cholestérol)

De par sa teneur élevée en fibres et en gommes, le Nopal est réputé pour son action bénéfique d'interception des graisses dans l'estomac et dans l'intestin, abaissant ainsi les niveaux de Cholestérol et de lipides dans le sang à leurs proportions normales (**Cern, 2003**).

Le Nopal évite ainsi l'accumulation exagérée des graisses dans le sang des personnes sujettes à risques en améliorant la microcirculation artérielle et veineuse. Il contribue à la prévention des problèmes cardiaques en régulant la tension. D'autres recherches sur la niacine (vitamine du groupe B3), présente dans le Nopal ont démontré qu'elle a pour effet de transformer le mauvais cholestérol (LDL) en bon cholestérol (HDL) (**Schweizer, 1997**).

I.9.3. Artériosclérose (durcissement des artères)

Les acides aminés et les fibres, en particulier le principe antioxydant des vitamines A et C que contient Nopal ont pour effet de diminuer le risque de détérioration des parois artérielles et la formation de plaquettes graisseuses, des chercheurs indépendants spécialisés Enethnomédecine ont remarqué que des populations de la tiers-monde habituées à consommer des figues de barbarie semblaient préservées de l'artériosclérose et l'artérite (**Schweizer, 1997**).

I.9.4. Femmes enceintes

Chez les Aztèques, les femmes enceintes consommaient le Nopal sous toutes ses formes car il était considéré comme le meilleur des fortifiants et un excellent galactogène, durant le temps de leur grossesse et lorsqu'elles allaitent leur enfant, il est une tradition bien établie chez les femmes de certaines tribus indiennes de boire du jus de figue ou, lorsque la saison de fructification est passée, une décoction de fleurs séchées ou de racines d'*Opuntia ficus indica* (**Schweizer, 1997**).

Chapitre II :

La rhizosphère

II.1. Généralité

Le mot rhizosphère a été introduit en 1904 par **Lorenz Hiltner (Anton et al. 2008)**, bactériologiste spécialiste de microbiologie du sol et professeur d'agronomie au collège Technique de Munich (**Lombi et al, 2001**). « Rhizo » vient du grec rhiza signifiant racine. « Sphère » vient du latin sphaera, définit le champ d'influence du système racinaire (**Vacheron et al. 2013**).

La rhizosphère définit aujourd'hui le lieu d'interaction entre le sol, la plante et les microorganismes (**Norini, 2007**).

La rhizosphère est généralement divisée en deux parties:

- La rhizosphère au sens strict correspond à la fine couche de sol qui adhère fermement aux racines.
- Le rhizoplan ou surface des racines dont la microflore est extraite par agitation vigoureuse des racines (**Soufiane, 1998**).

La géométrie de la rhizosphère dépend donc de la structure du couvert végétal, des espèces considérées, de l'âge des plantes, du cortège microbien associé aux racines, et des actions racinaires considérées. Ses limites sont de ce fait difficiles à préciser. Sa limite externe se confond insensiblement avec l'ensemble du volume de sol colonisé par les racines des plantes.

Les racines des plantes exercent des actions physique (prélèvement de l'eau), chimiques (échanges d'ions minéraux et de molécules gazeuses) et biochimiques (exsudation de substances carbonées), auxquelles le sol réagit dans ses composantes physiques (teneur en eau et potentiel hydrique), chimiques (variations de pH, absorption d'anions organiques sur les argiles), et microbiologiques (excrétion d'enzymes par les bactéries et les champignons du sol). Ces modifications de l'environnement sont à l'origine d'une adaptation des racines, qui se traduit en particulier par la formation d'organes symbiotiques rhizobiens (nodosités incluant des bactéries) et mycorhiziens (endo- et ecto- mycorhizes), et des communautés microbiennes du sol (**Girad et Water, 2005**).



Figure1. La rhizosphère.

Filearchide.cnews.ru/img/reviews/2010/11/14/mushroom_f3ce1.pg.

II.2. Les microorganismes de la rhizosphère

L'activité microbiologique dans la rhizosphère est de grande importance et a diverses conséquences pour les plantes. Tout d'abord, elle joue un rôle important dans le recyclage des éléments minéraux, entraînant alors presque toujours leur meilleure assimilation par les plantes. D'autre part, la respiration des racines et des microorganismes qui consomment de grandes quantités d'oxygène, elle provoque une diminution du potentiel d'oxydo-réduction, ce qui peut favoriser l'absorption de certains cations par les plantes, tels le fer, le manganèse et le zinc (**Fuchs S.A ; Biophyt, 1999**).

La microflore du sol est complexe et varie. Elle comprend des 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. 2013**).

Les bactéries sont les microorganismes les plus abondants et métaboliquement les plus actifs du sol. D'où un gramme de sol forestier contient en moyenne environ 4×10^7 bactéries, tandis qu'un gramme de prairie ou le sol cultivé en contient selon les estimations 2×10^9 bactéries (**Prescott et al. 2013**). Les bactéries représentant plus de 1000 espèces, sont responsables de nombreux processus : libération des éléments nutritifs à partir de la matière organique et des minéraux du sol, Production d'hormones de croissance qui favorisent le développement des racines et Compétition avec les micro-organismes pathogènes limitant ainsi les risques de maladie (**symbiotech.over-blog.com, 2017**).

La croissance des champignons est aussi stimulée mais dans une moindre mesure. Les mycètes sont également présents dans le sol comme *Mucor*, *Trichoderma* et *Aspergillus*. La biomasse fongique est sans doute très variable suivant les cas peut atteindre entre 120 Kg/ha et plus d'une tonne, Ces derniers couvrent environ 20 à 30% de la biomasse microbienne du sol (Girard, 2011).

Dans les sols normaux Leurs activités métaboliques sont multiples et fondamentales à l'équilibre écologique des sols. De nombreux travaux indiquent leur prédominance telle : les champignons mycorrhiziens aident leurs plantes hôtes à acquérir des nutriments minéraux du sol contenant notamment du phosphore et de l'azote (Girad et Water, 2005).

Les actinomycètes constituent l'ordre des actinomycètes. Ce sont des bactéries filamenteuses, aérobies, septées, ramifiées et sporulées (Kebabi et Merouane, 2010).

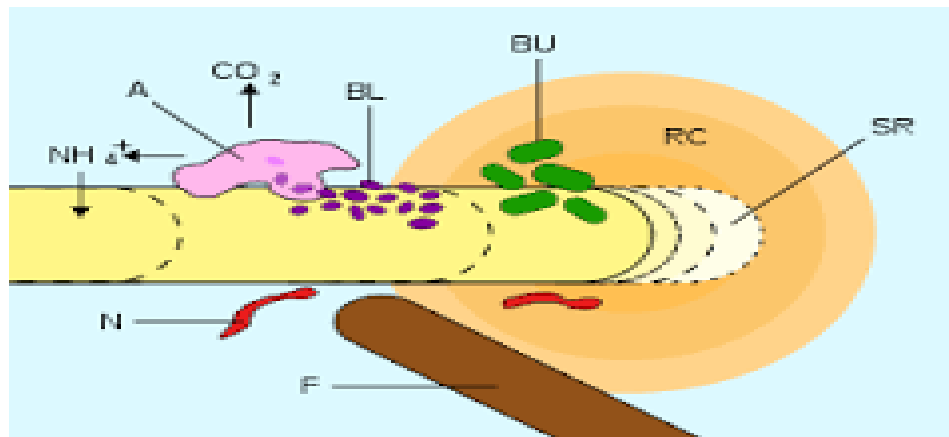


Figure 2. La structure de la rhizosphère.

<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/37/Rhizosphere.svg/1200pxRhizosphere.svg.png>

A=Amibe digérant une bactérie, BL= Bactérie à énergie limitée, BU= Bactérie à énergie non limitée, RC=Racine, SR=Poils absorbants racinaires, F=Mycélium d'un champignon, N=Ver nématode.

II.3. Les bactéries rhizosphériques ou rhizobactéries

La rhizosphère est la zone de sol qui est sous l'influence des exsudats racinaires. Dans cette zone se trouve un groupe particulier de bactéries, les rhizobactéries. Ces dernières sont capables de se multiplier et de coloniser les racines de façon intense et de rivaliser avec les autres microorganismes pour occuper cette zone riche en éléments nutritifs.

L'association, le rôle et les effets que les rhizobactéries exercent sur la plante sont fonction du succès de leur établissement dans la rhizosphère, elles peuvent avoir un effet positif, négatif ou neutre sur la croissance des plantes. Près de 5% des rhizobactéries favorisent la croissance des plantes c'est une flore bactérienne diversifiée, connue sous l'abréviation PGPR (plant growth promoting rhizobacteria), rhizobactérie promotrice de la croissance des plantes est bénéfique à la croissance et à la santé des plantes. Et les protègent contre les agents pathogènes tels les bactéries, les champignons et les nématodes. L'inoculation des semences avec ces rhizobactéries se traduit généralement par des accroissements de rendement d'environ 10 à 30% (**Beauchamp, 1993**). On en distingue deux grands groupes : les PGPR phytostimulatrices et les PGPR phytoprotectrices (**Lugtenberg, 2009**).

II.4. Les facteurs conditionnant la flore rhizosphérique

D'une façon générale, l'activité microbienne dans la rhizosphère est influencée par des facteurs climatiques de l'environnement (humidité, aération, température, teneur en CO₂, etc.) et par des facteurs édaphiques (teneur du sol en eau et oxygène, pH, teneur en éléments assimilable, etc.). La profondeur des racines jouent aussi un facteur de variation de la flore rhizosphérique où le nombre de microorganismes diminue selon l'augmentation de la distance (**Freitas, 2012**).

Chapitre III :

Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR)

III.1. Isolement et caractérisation de Plant Growth Promoting Bacteria

Les communautés microbiennes associées aux cultures qui poussent dans des conditions de stress abiotiques diverses ont fait l'objet de beaucoup d'attention, car la sécurité alimentaire liée à l'augmentation constante de la population et à l'augmentation de la production agricole est un besoin urgent au 21ème siècle. Les microbes associés aux cultures peuvent être caractérisés à l'aide de techniques dépendantes de la culture. Les microbes pourraient être isolés à l'aide de méthodes d'enrichissement et de dilution en série suivies d'une technique de propagation ou de coulée de plaques (Yadav *et al.* 2015). Les microbes rhizosphériques, endophytes et phyllosphériques peuvent être isolés en utilisant une méthode standard de dilution en série, de stérilisation de surface et d'impression de feuilles (Verma *et al.* 2015). Les différents milieux de croissance spécifiques et sélectifs doivent être utilisés pour isoler le plus grand nombre possible de morphotypes cultivables, tels qu'Arthrobacter (gélose trypticase soja), *Methylobacterium* (sel d'ammonium), bactéries fixatrices de N₂ (gélose Jensen N₂), *Pseudomonas spp.* (Agar Kings 'B), *Rhizobium* (mannitol de levure rouge du Congo) et *actinobactéries* spécifiques au sol (gélose à l'extrait de sol) (Verma *et al.* 2013) (Tableau. 1). Les microbes isolés doivent être examinés pour déterminer leur tolérance aux différents stress abiotiques que sont la salinité, le pH, la température et la sécheresse (Yadav *et al.* 2016).

Strains	Relevant characteristics
Bacterial strains	
<i>Bacillus spp.</i>	
<i>B. subtilis</i> UMAF6614	Antagonist of <i>P. fusca</i>
<i>B. subtilis</i> UMAF6619	Antagonist of <i>P. fusca</i>
<i>B. subtilis</i> UMAF6639	Antagonist of <i>P. fusca</i>
<i>B. subtilis</i> UMAF8404	Antagonist of <i>R. necatrix</i>
<i>B. subtilis</i> UMAF8407	Antagonist of <i>R. necatrix</i>
<i>B. subtilis</i> UMAF8417	Antagonist of <i>R. necatrix</i>
<i>B. subtilis</i> UMAF8561	Antagonist of <i>P. fusca</i>
<i>B. subtilis</i> UMAF8563	Isolated from melon rhizoplane
<i>B. cereus</i> UMAF8564	Isolated from melon rhizoplane
<i>Pseudomonas spp.</i>	
<i>P. fluorescens</i> PCL1606	Antagonist of <i>R. necatrix</i>
<i>P. fluorescens</i> UMAF6031	Isolated from melon rhizoplane
<i>P. fluorescens</i> UMAF6032	Isolated from melon rhizoplane
<i>P. fluorescens</i> UMAF6033	Isolated from melon rhizoplane
<i>P. putida</i> UMAF8036	Isolated from melon rhizoplane
<i>P. putida</i> UMAF8037	Isolated from melon rhizoplane
Fungal and bacterial phytopathogenic strains	
<i>Podospaera fusca</i> SF48	Causes melon powdery mildew
<i>Botrytis cinerea</i> CECT2850	Causes rot of ripening fruit
<i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>lycopersici</i> CECT2866	Causes crown and foot rot of tomato
<i>Pseudomonas syringae</i> pv. <i>lachrymans</i> UMAF6002	Causes angular leaf spot

Tableau 1. Isolation et sélection de quelque du PGPR.

III.2. Rhizobactéries stimulatrices de la croissance végétale

Pour connaître la capacité PGP et les autres applications potentielles des bactéries, il convient de rechercher qualitativement les attributs directs de PGP, notamment la solubilisation du phosphore (Pikovskaya, 1948), du potassium (Hu *et al.* 2006) et du zinc (Fasim *et al.* 2002); production de phytohormones acide indole-3-acétique (Bric *et al.* 1991), acide gibbérellique (Iambrecht *et al.* 2000 ; Shishido *et al.* 1996) fixation biologique de N₂ (De Oliveira *et al.* 1995) production de 1-aminocyclopropane-1-carboxylate (ACC) désaminase (Jacobson *et al.* 1994), de sidérophore (Zloch *et al.* 2016) . Les bactéries devraient également être criblées pour rechercher des attributs de PGP indirectement qualitatifs, notamment la production d'ammoniac (Cappucino et Sherman, 1992), d'enzyme lytique (Yadav *et al.* 2016) et d'agents de biocontrôle contre différents agents pathogènes fongiques (Yadav *et al.* 2016).

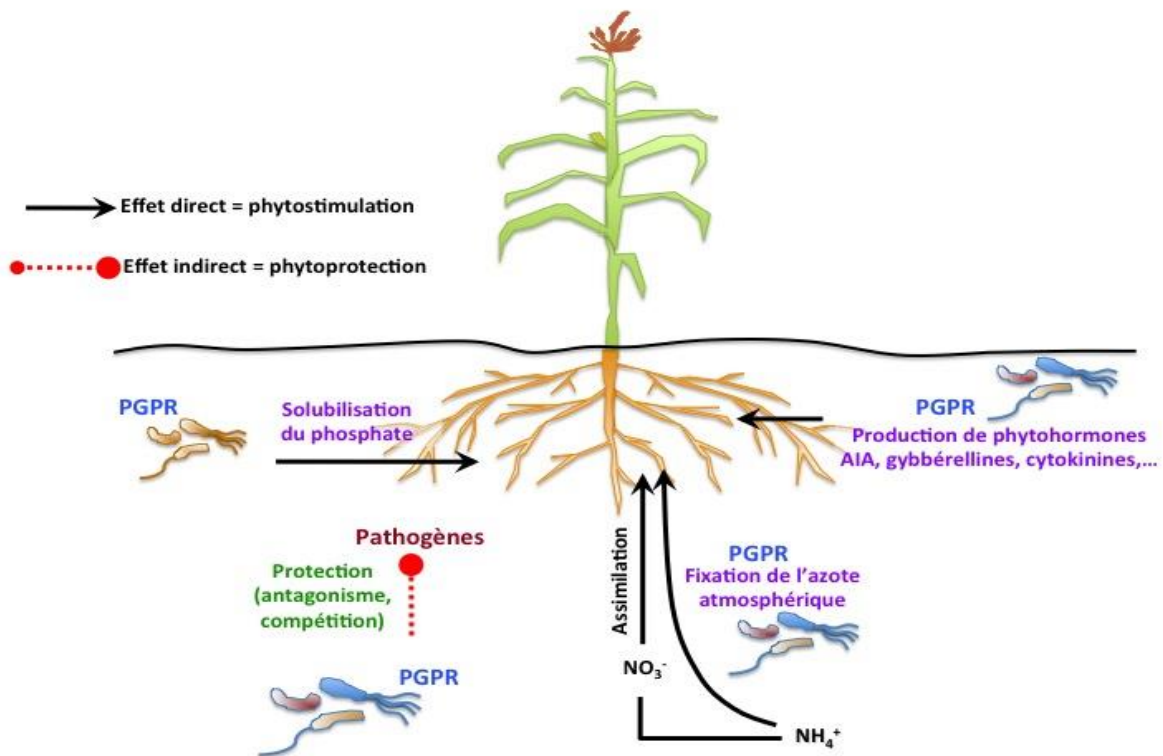


Figure 1. Interactions entre plantes et bactéries coopératives dans la rhizosphère (Khan *et al.* 2009).

Tableau 2. Substance favorisant la croissance libérée par PGPR (Munees et Mulugeta, 2013)

PGPR	Traits de promotion de la croissance des plants
<i>Pseudomonas putida</i> ; <i>Pseudomonas aeruginosa</i> ; <i>Klebsiella sp</i> ; <i>Enterobacterasburiae</i>	IAA, siderophores, HCN, ammoniacque, exo-polysaccharides, solubilisation du phosphate
<i>Psychrobacter sp.</i> SRS8, <i>Bradyrhizobium sp.</i> 750, <i>Pseudomonas sp.</i> , <i>Ochrobactrumcytisi</i>	Mobilisation de métaux lourds
<i>Stenotrophomonasmaltophilia</i>	activité du Nitrogénase, solubilisation du phosphate, IAA, ACC désaminase
<i>Pseudomonas sp.</i>	solubilization du Phosphate, IAA, siderophore, HCN, potential de biocontrol
<i>Burkholderia</i> <i>Pseudomonas sp.</i>	ACC désaminase, IAA, siderophore, solubilisation des métaux lourds, solubilisation du phosphate
<i>Pseudomonas</i> , <i>Bacillus</i>	
<i>Bacillus spp.</i> , <i>Pseudomonas spp.</i> , <i>Azotobacter spp.</i> , <i>Rhizobium spp.</i>	solubilisation du Phosphate, IAA et siderophores
	IAA, production de l'ammoniacque
<i>Pseudomonas chlororaphis</i> , <i>Bacillus subtilis</i>	Activité antifongique

III.3. Effet direct des PGPR sur la plante

Les bactéries PGPR facilitent la croissance des plantes directement en aidant à l'acquisition des ressources (azote, phosphore et minéraux essentiels) ou par modulation des niveaux d'hormone végétales (Munees et Mulugeta, 2014)

III.3.1. Acquisition des ressources

III.3.1.1. Fixation d'azote

L'azote (N) est le nutriment le plus vital pour la croissance et la productivité des plantes. Bien qu'il y ait environ 78% de N₂ dans l'atmosphère. La plupart des végétaux ne peuvent l'utiliser sous cette forme inerte. Les plantes absorbent seulement les formes ioniques solubles

dans l'eau qui se trouvent sous les formes nitriques ou nitrates (NO_3^-) et ammoniacales ou ammonium (NH_4^+), au niveau des racines (**bio en ligne.com**). Il existe plusieurs types de bactéries fixatrices de l'azote (les bactéries associatives, symbiotes et libres, vivant dans la rhizosphère) ; mais toutes les bactéries fixatrices d'azote comme *Azospirillum*, *Burkholderia* et *Gluconacetobacter* forme un complexe enzymatique appelé la nitrogénase. Et donc la fixation associative de l'azote et la promotion de la croissance végétale par les rhizobactéries se fait sur des organes végétaux spéciaux appelés nodules de racine ou de tige (**Fig. 2**). Les rhizobactéries fixatrices de l'azote sont importantes pour une bonne fertilisation du sol et un système agricole durable (**Pereg et McMillan, 2015; Wdowiak-Wróbel et al. 2017**).

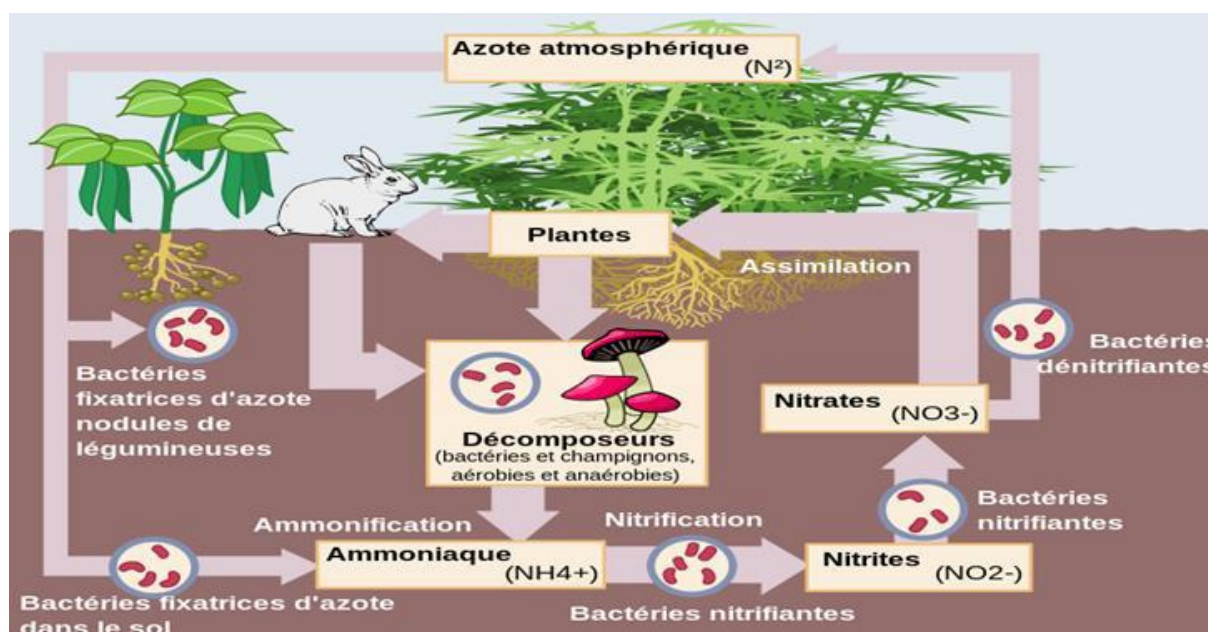


Figure 2. Représentation du cycle d'azote selon (**Johann Dréo, 2006**).

III.3.1.2. Solubilisation du phosphate

Le phosphore et le deuxième nutriment important limitant la croissance des plantes après l'azote, il est largement disponible dans le sol sous deux formes organiques et inorganiques (**khan et al. 2009**). Il joue un rôle pratiquement important dans tous les processus métaboliques majeurs dans les plantes, y compris la photosynthèse, le transfert d'énergie, la transduction du signal, la biosynthèse macromoléculaire et la respiration (**Khan et al. 2010**).

Les plantes sont incapables d'utiliser le phosphate car 95 à 99% de phosphate présents sous la forme insoluble, immobilisée et précipitée. Les plantes absorbent le phosphate uniquement sous deux formes solubles: les ions monobasique (H_2PO_4) et basique (HPO_4^{2-}) (**Govind et al. 2015**). En effet, il a été démontré que certains microorganismes du sol sont impliqués dans la solubilisation des phosphates insolubles comme *Rhizobium*, *Enterbacter*,

Serratia, *Citrobacter*, *Proteus*, *Klebsiella*, *Pseudomonas*, ou encore *Bacillus* (**Gupta et al. 2012; Panhwar et al. 2013**). Notons que ces microorganismes produisent des acides organiques et relâchent des protons, qui à travers leurs groupements carboxyliques, chélatent les cations fixés aux phosphates insolubles ce qui permet de les convertir en formes solubles (**Salma, 2015**) ce qui augmente la fertilité du sol (**Gupta et al. 2012; Panhwar et al. 2013**).

III.3.1.3. Solubilisation du potassium

C'est le troisième nutriment majeur important pour les plantes. 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 Sindhu, 2013**). Certains microorganismes du sol (bactéries, champignons), comme les *Enterobacter* sont capables de dissoudre le potassium insoluble (KSB) car elles produisent de l'acide oxalique et des acides citriques et des enzymes ; parce que la plus grande partie du potassium n'est pas disponible pour l'absorption par les plantes (**Parmar et Sindhu, 2013 ; Setiawati et Mutamainnah, 2016**).

En outre, 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**).

III.3.1.4. La solubilisation du Zinc

Le zinc est un élément métallique ou métalloïdes dits « traces » car il est présent en faible concentration dans la croûte terrestre ou les organismes vivants. Il désigne un oligo-élément indispensable aux processus biologiques, mais toxiques à des teneurs élevées même dans des concentrations relativement faibles. Le zinc est tout jour associé au phosphate pour être utile par la plante, et les PGPR ont la capacité de le solubiliser (**Kumar et al. 2012**).

III.3.2. Production des phytohormones

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

III.3.2.1. Acide Indole Acétique (IAA)

Les plantes ont développé des systèmes élaborés pour réguler les niveaux cellulaires de l'IAA (Normanly et Bartel, 1999). L'IAA représente l'une des hormones végétales les plus importantes, ce qui renforce de nombreux aspects de la croissance et du développement des plantes tout au long du cycle cellulaire de la plante, de la division cellulaire, de l'allongement cellulaire et de la différenciation (Guilfoyle *et al.* 1998).

Généralement, IAA affecte la division, l'extension et la différenciation des cellules végétales; Stimule la germination des semences et des tubercules; Augmente le taux de développement du xylème et des racines; Contrôle les processus de croissance végétative; Initie la formation de racines latérales et accidentelles; Médiatise les réponses à la lumière, à la gravité et à la fluorescence; Affecte la photosynthèse, la formation de pigments, la biosynthèse de divers métabolites et la résistance à des conditions stressantes. En outre, l'IAA bactériennes augmentant la surface et la longueur de la racine et fournit ainsi à la plante un meilleur accès aux nutriments du sol. En outre, l'IAA rhizobactéri le dégage les parois cellulaires de la plante et, en conséquence, facilite une augmentation de l'exsudation des racines qui fournit des nutriments supplémentaires pour soutenir la croissance des bactéries rhizosphériques (Glick, 2012). Il fonctionne comme une molécule signal importante dans la régulation du développement des plantes, agissant sur l'organogenèse, les réponses trophiques, les réponses cellulaires telles que l'expansion des cellules, la division, la différenciation et la régulation des gènes. Le rôle de l'AIA dans la stimulation de la croissance est obtenu en imitant l'effet de la bactérie par l'application directe de l'AIA sur les racines. Il favorise la survie des bactéries dans la rhizosphère. Les poids des tiges et des racines des plantes de blé sont influencés positivement par l'ajout de l'AIA (Cherif, 2014).

III.3.2.2. 1-Aminocyclopropane-1-carboxylate (ACC) désaminase

L'ACC est le précurseur direct de l'éthylène. La bactérie *Pseudomonas sp*, et la levure *Cyberlindnerasaturnus* étaient les deux premiers microorganismes signalés pour synthétiser l'ACC désaminase (Gamalero et Glick, 2015).

Donc la biosynthèse de l'éthylène se fait par les plantes à partir de la méthionine. La première étape est la synthèse de la S-adénosyl-méthionine, suivie de sa conversion en 1 acide aminocyclopropane-1-carboxylique (ACC). L'ACC oxydase, anciennement connue sous le nom d'enzyme formant l'éthylène (EFE), a d'abord été caractérisé par une pomme (Adams et Yang, 1979). L'éthylène est une phytohormone clé qui a une large gamme d'activités biologiques il est impliqué dans beaucoup de processus physiologiques, comme la

germination de la graine, la différenciation de tissus, la formation et l'élongation de la racine, le développement latéral des bourgeons, le fleurissement, l'ouverture de la fleur, la sénescence d'organe, la maturation de fruit et l'abscission de la feuille et du fruit, Activation de la synthèse d'autres hormones végétales (**Glick et al. 2007**). L'éthylène gazeux produit de manière endogène par les plantes a plusieurs effets sur leur développement et agit comme molécule secondaire de signal dans l'induction des défenses de la plante. A des concentrations élevées, l'éthylène affecte négativement de nombreuses étapes physiologiques des plantes. Une augmentation de la production d'éthylène agissant comme hormone sensitive stimule la maturation des fruits et le vieillissement des fleurs (**Cherif, 2014**).

III.3.2.3. Production des cytokines

Les cytokinines ce sont des hormones végétales dérivées de molécule d'adénine qu'ont la capacité d'améliorer la division cellulaire des plantes et la résistance des plantes aux facteurs nuisibles. Ils peuvent également affecter l'activité des cellules des méristèmes dans les racines, ainsi que la sénescence des feuilles (**Chanclud, 2015**). De plus, ils sont efficaces dans la formation de nodule au cours de la mise en place de la symbiose N₂-fixing et d'autres interactions entre la plante et les microbes. Parmi les souches bactériennes productrices de cytokinines associées aux racines *Arthrobacter*, *Bacillus*, *Azospirillum* et *Pseudomonas*, qui peut augmenter la biomasse des racines, ainsi que la teneur en proline dans les tissus végétaux (**Miransari et Smith, 2014 ; Egamberdieva et al. 2017**). Les cytokinines sont également largement utilisées dans la bio-ingénierie et la production agricole pour des cultures cellulaires dans des bioréacteurs, pour la micropropagation de plantes cultivées, l'obtention des plantes transgéniques, et pour contrôler le sexe des plantes (**Andrabi et al. 2018**).

III.3.2.4. Production des sidérophores

Le fer est un nutriment vital pour presque toutes les formes de vie (**Neilands, 1995**). Ces oligoéléments qui a suomi a une forte compétition certain bactéries sont capable de séquestrer le fer du milieu environ de X molécule appelle sidérophores. Ces siderophores se lient avec l'ion ferrique et forment un complexe siderophore-ferrique qui se lie ensuite avec des récepteurs dépendants de la suspension de fer à la surface de la cellule bactérienne. L'ion Ferrique est ensuite relâché et actif dans le cytoplasme comme ion ferreux. Beaucoup de plantes peuvent utiliser divers siderophores bactériens comme sources de fer, beaucoup de bactéries productrices de sidérophores appartiennent aux genres *Bradyrhizobium*, *Pseudomonas*, *Rhizobium*, *Serratia* et *Streptomyces* de la rhizosphère (**Kuffner et al. 2008**).

Le siderophore le plus connu est l'aérobactine (**Fig.3**), isolée pour la première fois d'*Aerobacteraerogenes* (**Gibson et Magrath, 1969**).

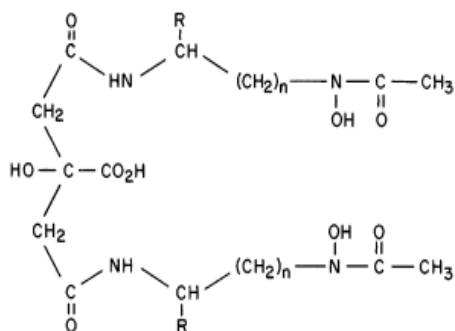


Figure 3. Structure générale des siderophores citrate-hydroxamate (**Gibson et Magrath, 1969**).

III.4. Effet indirect des PGPR sur les plantes

III.4.1. Production d'enzymes lytique par PGPR : chitinase et de glucanase

L'un des principaux mécanismes utilisés par les agents de lutte biologique contre les pathogènes du sol consiste la production d'enzymes dégradant les parois cellulaires, telles que la β -1,3-glucanase, la chitinase, la cellulase et la protéase sécrétées par les souches de biocontrôle de PGPR, exerçant un effet inhibiteur direct sur la croissance des hyphes des pathogènes fongiques en dégradant leur paroi cellulaire. Les agents de lutte biologique ayant les potentiels des activités chitinolytiques, la chitine est convertie principalement en chitosan, (**Raafat et Sahl, 2009**), cette activité comprennent *B. licheniformis*, *B. cereus*, *B. circulans*, *B. subtilis* et *B. thuringiensis*. Parmi les bactéries à Gram négatif possèdent des activités chitinolytiques en distingue, *Serratia marcescens*, *Enterobacter agglomerans*, *Pseudomonas aeruginosa* et *P. fluorescens* (**Goswami et al. 2016**).

III.4.2. Productions des antibiotiques

Les microorganismes telluriques produisent les antibiotiques qui sont des facteurs déterminants pour la vie dans l'environnement aussi compétitif que la rhizosphère (**Mazzola et al. 1992**) la production des antibiotiques est un critère très important de compétitivités des microorganismes ou autres populations microbiennes (**Compant et al. 2005**). C'est un critère de performance pour la promotion indirecte de la croissance végétale. Il consiste les agents phytopatogènes d'origine telluriques (**Maurhofer et al. 1992**). Une gamme très large

d'antibiotiques produit par les PGPR a été découverte, entre autres celles produites par le genre *pseudomonas* telles que l'amphisine, le 2,4-diacetylphloroglucinol (DAPG), le cyanure d'hydrogène, l'oomycine A, le phénazine, le pyoluteorine, le pyrrolnitrine, les lipopeptide cyclique (**Duffy et Defago, 1999 ; chin-A-woeng et al. 2003 ; De Souza et al. 2003 ; Nielsen et Sorensen, 2003**).

- l'acide phénazine-1-carboxyclique a été secrété par *Pseudomonas fluorescens*, est un antibiotique pigmenté qui inhibe les la croissance des microorganismes : les bactéries, virus, les champignons et les protozoaires (**linda et al. 1990**).
- L'oomycineA : ce dernier et responsable de l'aptitude de *pseudomonasa* réduire 70% l'infection de la racine par *pythium cotton* et de sa capacité à augmenter de 50% l'émergence des graines de coton (**Shilev, 2013**)
- Les rhamnolipides : *Pseudomonas aeruginosa* produit et sécrète des bio-tensioactifs glycolipides contenant du Rhamnose appelés Rhamnolipides. Ces derniers ont plusieurs applications industrielles et environnementales potentielles, y compris la production de produits chimiques fins et comme agent de contrôle biologique (**Maier et Soberón-Chávez, 2000**).

Ces antibiotiques sont connus pour posséder des activités antivirales, antimicrobiennes, anti-inflammatoires, anti-oxydantes, cytotoxiques, antitumorales et agissantes également sur la croissance de plantes (**Fernando et al. 2005 ; Kim, 2012**).

III.4.3. Induction d'un système de résistance

PGPR peut déclencher chez la plante un phénomène connue sous le nom d'induction de la résistance systémique qui est phénotypiquement similaire à la résistance systémique acquise qui se produit lorsque la plante active ses mécanismes de défense en réponse à une infection par un agent pathogène (**corné et al. 2009**). Les plantes inoculées avec des PGPR peuvent également fournir une résistance systémique contre un large éventail de pathogènes végétaux. Les maladies d'origine fongique, bactérienne et virale et, dans certains cas, même les dommages causés par les insectes et les nématodes peuvent être réduits après l'application de PGPR (**Naznin et al. 2012**). Il conférer à la plante un certain degré de protection à des attaques ultérieures par un phytopathogène via la stimulation de mécanismes de défense systémique.

III.4.4. La compétition

En plus du fait que les PGPR soient compétitives aux autres populations microbiennes rhizosphériques, elles sont capables de coloniser le maximum d'espace dans la rhizosphère et d'exploiter ces ressources nutritionnelles et ainsi, participer à la réduction des phytopathogènes telluriques par compétition (**Lemanceau, 1992 ; Lucy et al. 2004**). La compétitivité des PGPR est largement plus supérieure quand elles ont des capacités spécifiques d'assimiler certains nutriments ou bloquer leur assimilation par les autres microorganismes (**Kempf et Wolf, 1989**). A titre d'exemple, certaines souches de Streptomycètes et Actinomycétales arrivent à coloniser la rhizosphère par la séquestration du fer (**Tokala et al. 2002**), d'autres souches peuvent synthétiser des enzymes extracellulaires permettant d'utiliser des composés organiques comme source d'énergie ou à dégrader les phytotoxines (**McCarthy et Williams, 1992**). En effet, des tests de compétitivité doivent être pris en considération lors de la sélection des souches de PGPR, afin de sélectionner celles ayant un pouvoir important de colonisation de la rhizosphère et /ou le rhizoplan des plantes inoculées (**Whipps, 2001**).

III.5. Formation des biofilm par les PGPR

Les cellules bactériennes peuvent présenter deux modes de croissance générale: soit en tant que cellules planctoniques, soit comme une communauté en surface appelées biofilms. Les biofilms sont des communautés microbiennes uni ou multi adhérentes aux surfaces biotiques ou abiotiques et / ou en contact intime l'une avec l'autre, enfermées dans une matrice auto-produite de substances polymères extracellulaires (EPS). Des biofilms moins complexes avec un nombre inférieur de cellules sont décrits de manière variable comme des microcolonies, des agrégats ou des grappes de cellules (**Ramey et al. 2004**).

La production de biofilm par PGPR reflète leur pouvoir de colonisation du système racinaire et est considéré comme une activité PGPR importante (**Prescott, 2003**). Plusieurs étapes sont impliquées dans la formation du biofilm, par réponse à des indices environnementaux la présence des nutriments permet les cellules planctoniques se déplacent vers une surface appropriée et se fixe premièrement à une surface selon leur fimbria et/ou pili par liaison hydrogène pour rendre la fixation réversible par le temps l'attachement devient essentiellement irréversible, c'est-à-dire que lorsque les cellules bactériennes commencent à sécréter EPS, d'autres microbes se joignant à ce pré-biofilm, développent des micro colonnes qui conduisent finalement à la formation de macro colonies (biofilms matures). Enfin, lorsque le biofilm est assez grand, les cellules bactériennes commencent à se détacher du biofilm, ces

cellules bactériennes reprenant leur mode de croissance planctonique ou créant leur propre biofilms (Emily, 2015).

III.6. utilisation des PGPR en agri-culture

Les PGPR offrent des applications intéressantes en agriculture comme la biofertilisation et la lutte biologique par les biopesticides ainsi que des applications en phytoremédiation (Tableau 3) et d'autres applications environnementales telles que l'amélioration des reboisements des sols stériles ou chimiquement pollués (Bashan et Holguin, 2002 ; Lugtenburg et Kamilova, 2009 ; Weyens *et al.* 2009). Leurs effets positifs sur la plante se réalisent par des mécanismes d'actions directs ou indirects (Beauchamp, 1993 ; Glick, 1995 ; Somers *et al.* 2004), classent les PGPR selon leurs activités en biofertilisants (améliorent la disponibilité des nutriments aux plantes), phytostimulateurs (promotion de la croissance par la production des phytohormones), rhizoremédiateurs (dégradent les polluants organiques) et en biopesticides (biocontrôle des agents phytopatogènes).

Actuellement, diverses formulations commerciales de RFCP sont en vente. Des formulations bactériologiques de *Rhizobium spp.* sont disponibles dans plusieurs pays afin de favoriser la nodulation des légumineuses et de diminuer la fertilisation azotée des cultures. La formulation Zea-nit Plus est en vente en Italie. Il s'agit d'un inoculum à base d'*Azospirillum sp.*

Développé pour inoculer le maïs (*Zea mays L.*) (J. W. Kloepper, communication personnelle). De même, la formulation Quantum 4000, à base de *Bacillus subtilis* (Ehremberf) Cohn, souche A13 (Broadbent *et al.* 1977), est commercialisée aux États-Unis pour lutter contre le *Rhizoctonia solani* Kühn chez l'arachide (*Arachis hypogaea L.*), le haricot (*Phaseolus vulgaris L.*) et le coton (*Gossypium hirsutum L.*). En Chine, des RFCP qui accroissent les rendements sont utilisées dans plusieurs cultures, et ce, depuis 1985 (J. W. Kloepper, communication personnelle). En 1987, 3,35 millions ha et plus de 48 cultures avaient été traités avec ces bactéries bénéfiques. La valeur des accroissements en rendement obtenus équivaut à plus de 60 millions de dollars canadiens.

Tableau 3. Termes adoptés pour classer les mécanismes par lesquelles les PGPR stimulent la croissance des plantes.

Termes	Définition	Mécanisme	Référence
Biofertilisant	Une substance contenant des microorganismes, quand elle est appliquée à la semence, la surfaces de la plantes ou au sol, elle colonise la rhizosphère, l'endosphère, et stimule la croissance végétale par l'amélioration ou la disponibilité des nutrimant essentiel à la plante	- Fixation biologique de l'azote -solubilisation du phosphore insoluble	Vissey (2003) ; Somers <i>et al.</i> (2004) ; Fuentes-Ramirez et Caballero-Mellado (2006)
Phytostimulateur	Microorganisme ayant la faculté de produire ou changer la concentration des régulateurs de croissance tel que l'acide indol acétique gibérellique, les cytokinines et l'éthylène	-Production des phytohormones (auxines, cytokinines, gibéllérines) -Réduction de la concentration d'éthylène (à l'intérieur de la plante)	Lugtenberg <i>et al.</i> (2002) ; Somers <i>et al.</i> (2004)
Biopesticide	Microorganisme améliorant la croissance des plantes par le control des agents phytopathogène, par la production des antibiotiques et des métabolites antifongiques.	-Production des antibiotiques (sidérophore, HCN, métabolites antifongiques) -Production des enzymes qui dégradent les parois cellulaires des champignons -Compétitivité à l'encontre des agents phytopathogène, principalement par la production des antibiotiques, et de métabolites antifongiques -Résistance systémique acquise et induite.	Vissey (2003) ; Somers <i>et al.</i> (2004) ; Chandler <i>et al.</i> (2008).

Conclusion

Les interactions entre les plantes et leur environnement direct (rhizosphère et phyllosphère) font l'objet de plusieurs travaux de recherche pour mieux comprendre le mode d'action des microorganismes bénéfiques pour les cultures. De nombreux microorganismes, bactéries ou champignons, naturellement présents dans le sol ou bien appliqués au niveau du système racinaire vont contribuer à la croissance des plantes environnantes. On parle de **PGPR** ou **Plant Growth-Promoting Rhizobacteria** pour les bactéries et de **PGPF** ou **Plant Growth-Promoting Fungi** pour les champignons.

Le *Rhizobium* est le PGPR le plus important, qui est capable de développer une association symbiotique avec sa plante hôte spécifique et d'augmenter sa croissance et son rendement en fixant biologiquement le N. atmosphérique. Cependant, les autres PGPR, tels que *Pseudomonas* et *Bacillus*, sont capables d'augmenter la croissance des plantes et la production de rendement en colonisant les racines des plantes hôtes de manière non symbiotique. La sélection d'une souche PGPR efficace est liée à la caractérisation de ses propriétés favorisant la croissance végétale comme : la solubilisation du phosphate, la production de sidérophores et de phytohormones, la capacité à fixer l'azote, production des enzymes, et la lutte biologique contre les maladies des plantes.

L'adaptation au stress chez les plantes, induite par les rhizobactéries, est une action combinée des communautés microbiennes dans la rhizosphère, donc l'analyse du microbiome et les études de co-inoculation peuvent aider au développement de formulations pour une application commerciale pour faire face au stress de la sécheresse en agriculture. Néanmoins, pour une utilisation plus efficace du PGPR, certains détails importants liés à cette utilisation doivent être abordés, y compris leur production, leur formulation, leur expédition, leur stockage et leur utilisation dans des conditions de terrain.

Les microorganismes utilisés comme biostimulants isolés de la rhizosphère et particulièrement du Figuier **pourraient être un levier pour limiter l'utilisation d'engrais minéraux et limiter l'impact des stress biotiques et abiotiques** notamment la carence en nutriments, la salinité, la sécheresse, l'acidité, les métaux lourds. Ils pourraient ainsi participer à la réduction d'utilisation d'intrants de synthèse. **Cependant, afin d'assurer les résultats attendus, il faut les utiliser dans une réflexion globale de l'itinéraire technique.**

De nombreux travaux de recherche ont visé à la mise au point de nouvelles technologies, mais malheureusement très peu de ces technologies sont adoptées par les producteurs du fait du changement de comportement qu'impose leur utilisation. Il convient donc de chercher des technologies performantes nécessitant peu de changement de comportement des producteurs

lors de leurs application, et favorable à l'équilibre nature- agriculture. Les PGPR sont considérées l'outil clé pour la résolution des contraintes à l'agriculture moderne la rendant écologiquement saine. Il est temps d'utiliser largement le PGPR dans les domaines en ce qui concerne leur importance économique et environnementale, bien qu'il ne soit utilisé que par un certain nombre de pays en développement.

Références bibliographiques

A

- **Abidi S. 2010.** Potentiel nutritionnel de quelques génotypes de cactus et voies d'amélioration et d'utilisation en alimentation animale, Institut National Agronomique de Tunisie, université du 7 Novembre de Carthage, 12-16.
- **Adams D.O, Yang F. 1979.** Ethylene biosynthesis: identification of 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid as an intermediate in the conversion of methionine to ethylene. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A, 76, 170-174.
- **Alabouvette C, Cordier C. 2018.** Fertilité biologique des sols : des microorganismes utiles à la croissance des plantes. Hal. archives-ouvertes. Fr.
- **Andrabi S.B.A, Tahara M, Matsubara R, Toyama T, Aonuma H, Sakakibara H, Suematsu M, Tanabe K, Nozaki T, Nagamune K. 2018.** Plant hormone cytokinins control cell cycle progression and plastid replication in apicomplexan parasites. Parasitol. Int. 67, 47–58.
- **Anton H, Michael R, Michael S. 2008.** Lorenz Hiltner, a pioneer in rhizosphere microbial ecology and soil bacteriology research, Plant and Soil, vol. 312, no 1-2, novembre, 7 p.
- **Araba A, Elaich A, Sarti B, Belbahri L, Boubkraoui A, Ait Hammou A, Zemmouri A, et Sbaa H. 2000.** Valorisation de figuier de Barbarie en élevage. Transfert de Technologie en Agriculture, 68, 1-4.
- **Arba M, 2009.** Le cactus opuntia, une espèce fruitière et fourragère pour une agriculture durable au Maroc. Culture, Itinéraire Technique et Productivité, 4, 215223.
- **Arba M, 2009.** Le cactus, Opuntia, une espèce fruitière et fourragère pour une agriculture durable au Maroc. « Symposium International « Agriculture durable en région Méditerranéenne (AGDUMED) ». Rabat, Maroc, 14-16 mai 2009.
- **Arora NK, Tewari S, Singh R. 2013.** Multifaceted Plant-Associated Microbes and Their Mechanisms Diminish the Concept of Direct and Indirect PGPRs. In: Arora NK (ed). Plant Microbe Symbiosis: Fundamentals and Advances. Springer, 411-449.

B

- **Bakker, Schippers. 1987.** Microbial cyanide production in the rhizosphere in relation to potato yield reduction and *Pseudomonas* SPP-mediated plant growth-stimulation. Soil BiolBiochem, 19(4): 451-457.
- **Barbera et al. 1992. In: Mulas M. & Mulas G. 2004.** Potentialités d'utilisation stratégique des plantes des genres *Atriplex* et *Opuntia* dans la lutte contre la désertification. Université des études de Sassari. Groupe de recherche sur la désertification. Short and Medium -Term Priority Environmental Action Program (SMAP), 112 p.
- **Bashan Y, Holguin G. 2002.** Plant growth-promoting bacteria: a potential tool for arid mangrove reforestation. Trees, 16, 159-166.
- **Beauchamp C.J. 1993.** Mode d'action des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes et potentiel de leur utilisation comme agent de lutte biologique. Phytoprotection, 1 (74), 19-27p.
- **Beauchamp C.J. 1993.** Mode of action of plant growth-promoting rhizobacteria and their potential use as biological control agents. Phytoprotection, 71, 19-27.
- **Benattia F., 2017.** Analyse et application des extraits de pépins de figues de barbarie. Thèse de doctorat : chimie. Tlemcen : Université AboubekrBelkaid, 152 p.
- **Benkaddouri A., 2011.** Etude des huiles essentielles de l'*Opuntia ficus-indica* Région de Mascara. Mémoire de magister : chimie. Oran : Université d'Oran, 111 p.

- **Bensalem H, Nefzaoui A, & Bensalem L. 2002.** Supplementation of *Acacia cyanophylla* Lindl foliage-based diets with barley or shrubs from arid areas (*Opuntia ficus-indica* f. *inermis*) and *Atriplex nummularia* L.) on growth and digestibility in lambs. *Animal Feed Sciences and Technology*, 96: 1530.
- **Bio en ligne.com**
- **Boddey, De Oliveira, Urquiaga, Reis, De Olivares, et al. 1995.** Biological nitrogen fixation associated with sugar cane and rice: contributions and prospects for improvement. *Plant Soil*, 174(1-2): 195-209.
- **Bric, Bostock, Silverstone. 1991.** Rapid in situ assay for indoleacetic acid production by bacteria immobilized on a nitrocellulose membrane. *Appl Environ Microbiol*, 57(2): 535-538.
- **Briha O., 2012.** Potentialité thérapeutiques d'Opuntia ficus-indica au Maroc et Tunisie. Thèse de doctorat : pharmacie. Maroc : Université Mohamed V Rabat, 171 p.
- **Broadbent P, K.F, Bakker F, Franks, J. Holland. 1977.** Effect of *Bacillus* spp. On increased growth of seedlings in steamed and nontreated soil. *Phytopathology*, 67: 1027-1034.
- **Brown, Burlingham. 1968.** Production of plant growth substances by *Azotobacter chroococcum*. *J Gen Microbiol*, 53 (1): 135- 144.

C

- **Cappucino, Sherman. 1992.** Nitrogen Cycle. In: *Microbiology: A Laboratory Manual*. (4th edn), Benjamin/Cumming Pub Co, New York, USA, pp. 311-312.
- **Cern P. 2003. clinical studies, in vivo.**
- **Chanclud E. 2015.** Etude du rôle des cytokinines végétales et fongiques dans l'interaction riz-Magnaporthe oryzae. *BGPI - Biol. Génétique Interact. Plantes-Parasites Pour Prot. Intégrée* 1.
- **Chaouche F.Z, et Abdul Hussain M.S. 2008.** Contribution à l'étude de l'Opuntia et perspectives d'amélioration, dans le milieu steppique. *Agricultura-StiinŃăsiipractică*, 1-2, 65-66.
- **Cherif Hafsa., 2014.** Amélioration de la croissance du blé dur en milieu salin par inoculation avec *Bacillus* sp. Et *Pantoea agglomerans* isolées de sols arides. Thèse de doctorat. Laboratoire de Microbiologie Appliquée. Université Ferhat Abbas Sétif 1.
- **Chin-A-Wong T. F, Bloemberg G. V, Lugtenberg B. j. 2003.** Phenazines and their role in biocontrol by pseudomonas bacteria. *New Phytologist*, 157 ,503-523
- **Costa R, Filho E, de Medeiros A, Givisiez P, Queiroga R, & Melo A. 2009.** Effects of increasing levels of cactus pear (*Opuntia ficus-indica* L. Miller) in the diet of dairy goats and its contribution as a source of water. *Small Ruminant Research*, 82:62-65.

D

- **De Souza J.T, Mazzola M, Raaijmakers j. M. 2003.** Conservation of the response regulator gene *gacA* in pseudomonas species. *Environmental microbiology*, 5, 1328-1340.
- **Dean W.R.J, & Milton S.J. 2000.** Directed dispersal of *Opuntia* species in the Karoo, South Africa: are crows the responsible agents? *Journal of Arid Environments*, 45: 305-314.
- **Dubeux J.R, Ferreira dos Santos M.V, de Andrade Lira M, Cordeiro dos Santos D, Farias I, Lima L.E, & Ferreira R.L.C. 2006.** Productivity of *Opuntia ficus-indica* under different N and P fertilization and plant population in north-east Brazil. *Journal of Arid Environment*, 67: 357-372.

- **Duffy B. K, Defago G. 1996.** Environmental factors modulating antibiotic and siderophore biosynthesis by *Pseudomonas fluorescens* biocontrol strains. *Applied and Environmental Microbiology*, 65, 2429-2438.

E

- **Emily claudiaricci. 2015.** Investigating the role of *Pseudomonas* sp. and *Bacillus* sp. biofilms as plant growth promoting inoculants McGill University, Montreal, Quebec, Canada.
- **Erre P, Chessa I, Nieddu G, & Jones P.G. 2009.** Diversity and spatial distribution of *Opuntia* spp. in the Mediterranean Basin. *Journal of Arid Environments*, 73: 1058-1066.
- **Espirad E. 2002.** Introduction à la transformation industrielle des fruits, 160-161.

F

- **Fasim, Ahmed, Parsons, Gadd G. 2002.** Solubilization of zinc salts by a bacterium isolated from the air environment of a tannery. *FEMS Microbiol Lett*, 213 (1): 1-6.
- **Felice M.S. 2004.** Prickly pear cactus, *Opuntia* spp. A spine-tingling tale. *Weed Tech.* 18: 869-877.
- **Felker P, Rodriguez S, Casoliba R.M, Filippini R, Medina D, & Zapata R. 2005.** Comparison of *Opuntia ficus-indica* varieties of Mexican and Argentine origin for fruit yield and quality in Argentina. *Journal of Arid Environments*, 60:405-422.
- **Freitas R. P. 2012.** Effet du ver de terre *Aporrectodea caliginosa* sur la croissance des plantes, leur développement et leur résistance aux pathogènes. Université Paris Est-Créteil Val De Marne, 19-22 p.
- **Fuchs J. G, Biopht S. A. 1999.** Les produits biologiques: bien les connaître pour mieux les utiliser, 6-7p.

G

- **Gamalero E, Glick B.R. 2015.** Bacterial Modulation of Plant Ethylene Levels. *Plant Physiol*, 169, 13–22.
- **Gibson F, Magrath D. J. 1969.** *Biochim. Biophys. Acta*, 192, 175–187.
- **Girard M. C, C Water. 2005.** Sol et environnements. Dunod, Paris, 306-317 p.
- **Girard M.C. 2011.** Etude des sols description, cartographie, utilisation (Dunod).
- **Glick B.R. 1995.** The enhancement of plant growth by free-living bacteria. *Canadian Journal of Microbiology*, 41, 109-117.
- **Glick B.R. 2012.** *Plant Growth-Promoting Bacteria: Mechanisms and applications* Hindawi Publishing Corporation, Scientifica.
- **Goldstein G, Andrade L, Nobel P. 1991.** Differences in Water Relations Parameters from the Chlorenchyma and the Parenchyma of the *Opuntia ficus-indica* under Wet versus Dry Conditions. *Aust. J. Plant. Physiol*, 18 (2), 95-107.
- **Goswami D, Thakker J.N, Dhandhukia P.C. 2016.** Portraying mechanics of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): A review. *Cogent Food Agric.* 2.
- **Gouda S, Kerry R.G, Das G, Paramithiotis S, Shin H.-S, Patra J.K. 2018.** Revitalization of plant growth promoting rhizobacteria for sustainable development in agriculture. *Microbiol. Res.* 206, 131–140.
- **Govind G, Shailendra Singh Parihar, Narendra Kumar Ahirwar, Sunil Kumar Snehi, Vinod S. 2015.** Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR): Current and Future Prospects for Development of Sustainable Agriculture. *MicrobBiochemTechnol*, 7:2.

- **Gupta M, Kiran S, Gulati A, Singh, B, Tewari R. 2012.** Isolation and identification of phosphate solubilizing bacteria able to enhance the growth and aloin-A biosynthesis of *Aloe barbadensis* Miller. *Microbiol. Res.* 167, 358–363.

H

- **Habibi Y., 2004.** Contribution à l'étude morphologique, ultra structurale et chimique de la figue de barbarie, les polysaccharides pariétaux : caractérisation et modification chimique. Thèse doctorat, université Joseph Fourier.Grenoble I, et Université Cadi Ayyad. Marrakech, 2004, 264 pp.
- **Hernandez A, Orona-Castillo I, Murillo- Amador B, Garcia- Hernandez J.L, & TroyoDieguez E. 2004.** Yield and physiological traits of prickly pear cactus 'nopal' (*Opuntiaspp*) cultivar under drip irrigation. *Agricultural Water Management*, 70: 97-107.
- **Hernández-Urbiola M.I, Pérez-Torrero E, Rodríguez-García M.E. 2011.** Chemical Analysis of Nutritional Content of Prickly Pads (*Opuntia ficus indica*) at Varied Ages in an Organic Harvest. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 8, 1287-1295.
- **Hu, Chen, Guo. 2006.** Two Phosphate- and Potassium-solubilizing Bacteria Isolated from Tianmu Mountain, Zhejiang, China. *World J Microbiol Biotechnol*, 22(9): 983-990.

J

- **Jacobson, Pasternak, Glick. 1994.** Partial purification and characterization of 1-aminocyclopropane-1-carboxylate deaminase from the plant growth promoting rhizobacterium *Pseudomonas putida* GR12-2. *Can J Microbiol*, 40(12): 1019-1025.
- **Johann Dréo. 2006.** Réponse de la flore, de la faune, du sol et de leur substrat à l'introduction d'espèces exotique envahissantes végétale. Sous licence CC BY-SA 2.5.

K

- **Kabas O, Ormerzi A, & Akinci I. 2006.** Physical properties of cactus pear (*Opuntia ficus indica* L.) grown wild in Turkey. *Journal of Food Engineering*, 73: 198-202.
- **Kebabi R, F. Merouane. 2010.** Identification d'isolats cliniques d'actinomycètes et mise en évidence de leur activité antimicrobienne. Université Mentouri – Constantine, 3-19p.
- **Kempf H. J, Wolf G. 1989.** *Erwinia horvicol* as a biocontrol agent of *Fusarium culmorum* and *Puccinia recondita* f. Sp. *Tritici* on wheat. *Phytopathology*, 79, 990-994.
- **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.
- **Khan MS, Zaidi A, Ahemad M, Oves M, Wani PA. 2010.** Plant growth promotion by phosphate solubilizing fungi - current perspective. *ArchAgronSoilSci*, 56:73-98.
- **Kuffner M, Puschenreiter M, Wieshammer G, Gorfer M, Sessitsch A. 2008.** Rhizosphere bacteria affect growth and metal uptake of heavy metal accumulating willows. *Plant Soil*, 304: 35- 44.
- **Kumar P, Dubey R.C, Maheshwari D.K. 2012.** *Bacillus* strains isolated from rhizosphere showed plant growth promoting and antagonistic activity against phytopathogens. *Microbiol. Res.* 167, 493–499.
- **Kumar P, Dubey RC, 2012.** Plant Growth Promoting Rhizobacteria for Biocontrol of Phytopathogens and Yield Enhancement of *Phaseolus vulgaris*. *J CurrPersApplMicrobiol*, 1: 6-38.

L

- **Le Houerou H. N. 1996.** The role of cacti (*Opuntia* spp.) in erosion control, land reclamation, rehabilitation and agricultural development in the Mediterranean Basin. *Journal of Arid Environments*, 33: 135-159.
- **Lemanceau.1992.** Effets bénéfique de rhizobactéries sur les plantes. Exemple des *Pseudomonas fluorescens* *Agronomie*, 12 ,413-437.
- **Linda S. Thomashow, David M. Weller, Robert F. Bonsall, Leland S. Pierson. 1990.** Production of the Antibiotic Phenazine-1-Carboxylic Acid by Fluorescent *Pseudomonas* Species in the Rhizosphere of Wheat. U.S. Department of Agriculture, Washington State University. 56(4)pp 908–912.
- **Lombi E. 2001.** Trace Elements in the Rhizosphere. CRC Press. Citédans *Microbial Health of the Rhizosphere*.
- **Lucy M, Peed E, Glick B. R. 2004.** Applications of free living plant Growth –promoting rhizobacteria. *Antonie van Leeuwenhoek*86, 1---25.
- **Lugtenberg B, Kamilova F. 2009.** Plant-growth-promoting rhizobacteria. *AnnuRevMicrobiol*, 63:541–556.
- **Lugtenberg B, Kamilova F. 2009.** Plant-growth-promoting rhizobacteria. *Annual Review of Microbiology*, 63, 541-556.

M

- **Maurhof M, Keel C, Schnider U, Vousard C , Hass , Defago G. 1992.** Influence of enhanced antibiotic production in *Pseudomonas fluorescens* strain CHAO on its disease suppressive capacity. *Phytopathology*, 82, 190-195.
- **MazzolaM , Cook R . J, Thomashow L. S, Weller D. M, Pierson L. S . 1992.** Contibution of phenazine antibiotic biosynthesis to the ecological competence of fluorescent *pseudomonas* in siolhabitas. *Applied and Environmental microbiology*, 58, 2616-2624.
- **Mccarthy A.J, Williams S.T. 1992.** Actinomycetes as agents of biodegration in the environment. *Gene*, 115, 189-192.
- **Miransari M, Smith D.L. 2014.** Plant hormones and seed germination. *Environ. Exp. Bot.* 99, 110–121.
- **Mulas M, &Mulas G, 2004.** Potentialités d'utilisation stratégique des plantes des genres *Atriplex* et *Opuntia* dans la lutte contre la désertification. Short and Medium-TermPriority Environnemental Action Programme (SMAP). Université des études de SASSAR, 112 p.
- **Munees A, Mulugeta K. 2013.** Mechanisms and applications of plant growth promoting rhizobacteria: Current perspective, *Journal of King Saud University – Science*, January Volume 26, Issue 1, Page 1–20.

N

- **Naznin HA, Kimura M, Miyazawa M, Hyakumachi M. 2012.** Analysis of volatileorganic compounds emitted by plant growth promoting fungus *phoma* sp. GS8- 3 for growth promotion effects on tobacco. *Microbe Environ*, 28: 42-49.
- **Neffar S., 2012.** Etude de l'effet de l'âge des plantations de figuier de Barbarie (*Opuntia ficus indica* L. Miller) sur la variation des ressources naturelles (sol et végétation) des steppes algériennes de l'Est. Cas de Souk- ahras et Tébessa. Thèse de doctorat : biologie végétale. Annaba: Université Badji Mokhtar, 199 p.
- **Nefzaoui A, & Bensalem H, 1998. In: Mulas M, &Mulas G. 2004.**Potentialités d'utilisation stratégique des plantes des genres *Atriplex* et *Opuntia* dans la lutte contre la

désertification. Short and Medium-Term Priority Environmental Action Programme (SMAP). Université des études de SASSAR, 112 p.

- **Neilands J.B. 1995.** Siderophores structure and function of microbial iron transport compounds. *J. Biol. Chem.*, 270, 26723–26726.
- **Neilson T.H, Sorensen J. 2003.** Production of cyclic lipopeptides by *Pseudomonas fluorescens* strains in bulk soil and in the sugar beet rhizosphere. *Applied and Environmental microbiology*, 69, 861-868.
- **Nerd A, & Mizrahi Y. 1994.** Effect of nitrogen fertilization and organ removal on rebudding in *Opuntia ficus indica* (L.). *Scientia Horticulturae*, 59: 115-122.
- **Nerd A, Karadi A, Mizhari Y. 1991.** *Plant soil*, 137 (2): 201-207.
- **Norini M. 2007.** Ecodynamique des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et des communautés microbiennes dans des sols à pollution mixte (HAP- métaux) avant et après traitement par biopile et par désorption thermique : influence de la rhizosphère et de la mycorhization. Université Henri Poincaré, 32p.
- **Normanly J, Bartel B. 1999.** Redundancy as a way of life-IAA metabolism. *Curr. Opin. Plant Biol.*, 2, 207-213.

O

- **Orwa C, Mutua A, Kindt R, Jamnadass R, & Simons A. 2009.** Agroforestry Database: a tree reference and selection guide version 4.0 <http://www.worldagroforestry.org/af/treedb/>
- **Oued Z, Dr.Kaddem S. 1990.** Les plantes médicinales en Algérie, 3ème édition page : 73.

P

- **Palevitch D. 1994.** *Int. J. Att. Comp. Med.*
- **Panhwar Q.A, Jusop S, Naher U.A, Othman R, Razi M.I. 2013.** Application of Potential Phosphate-Solubilizing Bacteria and Organic Acids on Phosphate Solubilization from Phosphate Rock in Aerobic Rice. *Sci. World J.* 2013, 1–10.
- **Park E.H, Kahng J.H, Sang, H.L.K.H, Shin and K.H. 2001.** *Fitoterapia*, 72 (3), 288-290.
- **Parmar P, and Sindhu S.S. 2013.** Potassium Solubilization by Rhizosphere Bacteria: Influence of Nutritional and Environmental Conditions. *J. Microbiol. Res.* 25–31.
- **Pereg L, McMillan M. 2015.** Scoping the potential uses of beneficial microorganisms for increasing productivity in cotton cropping systems. *Soil Biol. Biochem.*, 80, 349–358.
- **Piga A. 2004.** Cactus pear: A fruit of Nutraceutical and Functional Importance, *J.PACD*, 9-22. (www.jpacd.org).
- **Pikovskaya. 1948.** Mobilization of phosphorus in soil in connection with vital activity of some microbial species. *Mikrobiologiya*, 17: 362- 370.
- **Prescott, Willey, Sherwood, Woolverton. 2013.** *Microbiologie*. Page: 693-697.
- **Raafat D, Sahl H.-G. 2009.** Chitosan and its antimicrobial potential - a critical literature survey. *Microb. Biotechnol.*, 2, 186–201.

R

- **Ramey BE, Matthyse AG, Fuqua C. 2004.** The FNR-type transcriptional regulator SinR controls maturation of *Agrobacterium tumefaciens* biofilms. *Mol Microbiol*, 52:1495–1511.
- **Reynolds S.G, Arias-Jimenez E, Mondrago N-Jacobo C, Perezgonzalez S. 2003.** El nopal (*Opuntia* spp.) como forraje, *Estudio FAO Produccion y Proteccion Vegetal*, 169, 344–345.

S

- **Saenz C. 2000.** Processing technologies: An alternative for cactus pear (*Opuntia* spp.) fruits and cladodes, *Journal of Arid Environments*, 46: 209-225.
- **Saleem M, Ja Kim H, Kyun Han C, Jin C, & Sup Lee Y. 2006.** Secondary metabolites from *Opuntia ficus-indica* var. *saboten*. *Phytochemistry*, 67: 1390-1394.
- **Salma Taktek, 2015.** Dissolution biologique des phosphates : Interaction bactéries – mycorhizes. Thèse de doctorat. Université LAVAL québec canada.
- **Schweizer M, 1997.** Docteur Nopal, le médecin du Bon Dieu. Clamecy ; PARIS (France). Imprimerie Laballery, 81 p.
- **Schwyn, Neilands. 1987.** Universal chemical assay for the detection and determination of siderophores. *Anal Biochem*, 160(1): 47-56.
- **Setiawati T.C, and Mutmainnah L. 2016.** Solubilization of Potassium Containing Mineral by Microorganisms From Sugarcane Rhizosphere. *Agric. Agric. Sci. Procedia*, 9, 108–117.
- **Shilev S. 2013.** Soil Rhizobacteria Regulating the Uptake of Nutrients and Undesirable Elements by Plants. *Chapitre 5 plant microbe symbiosis fundamentals and advance* naveenkumararora editor.
- **Snyman H.A. 2006.** A greenhouse study of root dynamics of cactus pears, *Opuntia ficus-indica* and *O. robusta*. *Journal of Arid Environments*, 65:529-542.
- **Somers E, Vanderleyden J, Srinivasan M. 2004.** Rhizosphere bacterial signalling: a love parade beneath our feet. *Critical Reviews in Microbiology*, 30, 205-240.
- **Soufiane B. 1998.** isolement à partir de la rhizosphère des conifères de bactéries et d'actinomycètes antagonistes aux champignons phytopathogènes. Université Laval, 1p.
- **Su Y, Zhao H, 2003.** Soil properties and plant species in an age sequence of *Caragana microphylla* plantations in the Horqin Sandy land, North China. *Ecological Engineering*, 20, 223-235.

T

- **Tegege F, Kijora C, & Peters K. J. 2007.** Study of the optimal level of cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) supplementation to sheep and its contribution as source as water. *Small Ruminant Research*, 72: 157-164.
- **Temagoult A., 2017.** Caractérisation et Transformation de la Figue de Barbarie (*Opuntia Ficus Indica* L.), Elaboration d'une Confiture et d'une Gelée Extra. Mémoire de magister : Génie des Procédés Alimentaires. Batna : Université Hadj Lakhdar, 71 p.
- **Tokala R.K, Strap J.L, Jung C.M, Crawford D.L., Hamby, Salove M, Deobald LA, Bailey J.F, Morra M.J. 2002.** Novel plant-microbe rhizosphere interaction involving *Streptomyces lydicus* WYEC-108 and the pea plant (*Pisum sativum*). *Applied and Environmental Microbiology*, 68, 2161-2171.

V

- **Vacheron J, Desbrosses G, Bouffaud M, Touraine B, Moëgne-Loccoz Y, Muller D, Legendre L, Wisniewski-Dyé F, Prigent-Combaret C. 2013.** Plant growth-promoting rhizobacteria and root system functioning. *Front. Plant Sci.* 4.
- **Verma, Yadav, Kazy, Saxena, Suman. 2013.** Elucidating the diversity and plant growth promoting attributes of wheat (*Triticum aestivum*) associated acidotolerant bacteria from southern hills zone of India. *Natl J Life Sci*, 10 (2): 219-227 (Tableau 1).

- **Verma, Yadav, Khannam, Panjiar, Kumar et al. 2015.** Assessment of genetic diversity and plant growth promoting attributes of psychrotolerant bacteria allied with wheat (*Triticumaestivum*) from the northern hills zone of India. *Ann Microbiol*, 65: 1885-189.

W

- **Wallace RS, Gileson AC.1997.**Evolution and systematic. *Biology and Uses*, P.S.Nobel Ed, 1-21 pp.
- **Wdowiak-Wróbel S, Marek-Kozaczuk M, Kalita M, Karaś M, Wójcik, M, Małek W. 2017.** Diversity and plant growth promoting properties of rhizobia isolated from root nodules of *Ononisarvensis*. *Antonie Van Leeuwenhoek*, 110, 1087–1103.
- **Weyens N, Van der Lelie D, Taghavi S, Vangronsveld J. 2009.** Phytoremediation: planteendophyte partnerships take the challenge. *Current Opinion in Biotechnology*, 20, 248-254.
- **Whipps J.M. 2001.**Microbial interactions and biocontrol in the rhizosphere. *Journal of Experimental Botany*, 52, 487-511.

Y

- **Yadav, Sachan, Verma, Kaushik, Saxena. 2016.** Cold active hydrolytic enzymes production by psychrotrophic Bacilli isolated from three sub-glacial lakes of NW Indian Himalayas. *J Basic Microbiol*, 56(3): 294-307.
- **Yadav, Sachan, Verma, Saxena. 2016.** Bioprospecting of plant growth promoting psychrotrophic Bacilli from cold desert of north western Indian Himalayas. *Indian J ExpBiol*, 54(2): 142-150.
- **Yadav, Verma, Kumar M, Pal KK, Dey et al.2015.** Diversity and phylogenetic profiling of niche-specific *Bacilli* from extreme environments of India. *Ann Microbiol*, 65(2): 611-629.
- **Yadav, Verma, Sachan, Kaushik, Saxena. 2016.** Microbiome of Indian Himalayan regions: Molecular diversity, phylogenetic profiling and biotechnological applications.In: *Proceeding of 86th Annual Session of NASI & Symposium on “Science, Technology and Entrepreneurship for Human Welfare in The Himalayan Region”*, 58 p.