



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur  
et de la Recherche Scientifique  
Université de Tissemsilt



Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département des Sciences de la Nature et de la Vie

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme  
de Master académique en

Filière : Sciences Biologiques

Spécialité : Microbiologie Appliquée

Présentée par : MOHAMED AZIZI Bassair Asmaa  
LAKHDAR Fatima Zohra

*Thème*

---

**PGPR: outils microbiologiques potentiellement  
promotrices de la croissance des plantes aux vertus  
médicinales, cas de Cresson (*Lepidium sativum*)**

---

Soutenu le, 22 juin 2022

**Devant le Jury :**

BOUNACEUR F	Président	Prof.	Univ-Tissemsilt
LAABAS S	Encadrant	M.C.B.	Univ-Tissemsilt
BOUKIRATE D	Co-encadrant	M.C.B.	Univ-Tissemsilt
CHOUHIM K	Examineur	M.A.A.	Univ-Tissemsilt

**Année universitaire : 2021-2022**

## **Remerciements**

*Au terme de ce travail, nous tenons tout d'abord à remercier ALLAH le tout puissant et miséricordieux de nous avoir donné le courage et la volonté durant toutes ces années d'étude, afin que nous puissions achever ce travail.*

*En second lieu, nous avons l'honneur et le plaisir de présenter nos sincères remerciements à Notre encadrant Dr. LAABAS Saadia pour ces orientations, sa disponibilité, et ces conseils précieux qu'il nous a prodigués tout au long de la réalisation de ce travail.*

*Nous exprimons nos sincères remerciements à notre co-encadrant Dr. BOUKIRAT Hydya pour ses encouragements et sa gentillesse.*

*Nous adressons nos réels remerciements aux membres du jury de nous avoir fait l'honneur de juger notre travail.*

*Nos remerciements les plus chaleureux à toute l'équipe du laboratoire de l'université pour la confiance et l'aide qu'ils nous ont accordé.*

*Nos plus vifs remerciements vont à l'établissement public de la santé de proximité Mahdia.*

*Nous adressons nos remerciements à toutes les personnes ayant participé de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire.*

## **DEDICACE**

*Je dédie ce mémoire à ceux qui me sont les plus chers :*

*Mes très chers parents.*

*Mon Frère et ma sœur.*

*Ma famille et surtout ma grand-mère que dieu la reçoit dans son vaste paradis.*

*Mes amis sans exception et tous qui m'ont apporté du soutien toute ma vie.*

*Bassair*

## DEDICACE

*Je dédie ce mémoire :*

*A mes chers parents pour leur amour, leur soutien, et leurs encouragements durant toutes mes études, en leur souhaitant une longue vie.*

*A mes chers frères, que je les aime énormément.*

*A ma grand-mère, qui je souhaite la bonne santé et la longue vie*

*A tous les membres de ma grande famille sans exception et à tous ceux qui m'aiment.*

*A tous mes enseignants et mes amis de la promotion Master 2 microbiologie appliquée 2021-2022, je leur souhaite la réussite.*

*Fatima Zohra.*

## Liste des Abréviations

**PGPR:** Plant Growth Promoting Rhizobacteria

**NPR:** Nodule Promoting Rhizobacteria

**PHPR:** Plant Health Promoting Rhizobacteria

**PGPRE:** les bactéries extracellulaires

**PGPRI:** les bactéries intracellulaires

**N<sub>2</sub>:** l'azote atmosphérique

**NH<sub>3</sub>:** Ammoniac

**P :** phosphore

**K :** Potassium

**N :** Azote

**AIA :** Acide Indole Acétique

**ACC :** Acide 1-aminocyclopropane-1-carboxylique

**PH :** Potentiel Hydrogène

**Fe :** Le fer

**Le zinc :** Zn

**HCN :** Le cyanure d'hydrogène

**CO<sub>2</sub>:** Le dioxyde de carbone

**RSI :** La Résistance Systémique Induite

**RSA :** La Résistance Systémique Acquise

**NO<sub>3</sub> :** Nitrate

**O<sub>2</sub>:** L'oxygène

**Ca:** Calcium

**AAL :** Acide Alpha-Linolénique

**AL :** Acide Linoléique

## TABLE DES MATIÈRES

Introduction.....	1
<b>CHAPITRE I : Etude bibliographique</b>	
1. Les rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR).....	2
1. 1. La rhizosphère .....	2
1. 2. Les PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria) .....	3
1. 2.1. Mode d'action des PGPR .....	3
1.2.1.1. Effet direct .....	4
a. La fixation biologique de l'azote atmosphérique.....	4
b. Solubilisation des phosphates .....	5
c. La solubilisation de potassium .....	5
d. La production des phytohormones .....	6
e. Production des sidérophores .....	7
1.2.1.2. Effet indirect .....	8
a. Production des antibiotiques .....	8
b. La production du cyanure d'hydrogène .....	9
c. Résistance systémique induite .....	9
1. 2. 2. Les PGPR les plus étudiées .....	10
a. <i>Pseudomona sp</i> .....	10
b. <i>Bacillus Spp</i> .....	11
c. <i>Azotobacter sp</i> .....	11
d. <i>Azospirillum</i> .....	12
2. Les plantes médicinales .....	12
2 .1. <i>Lepidium sativum</i> (cresson) .....	13
2 .1. 1. Origine et répartition géographique du <i>Lepidium sativum</i> .....	13
2 .1. 2. Description botanique .....	13
2.1. 3. Systématique de l'espèce <i>Lepidium sativum</i> .....	14
2 .1. 4. Les Propriétés nutritionnelles de <i>Lepidium Sativum</i> .....	15
2 .1. 5. Effet Thérapeutique de <i>Lepidium Sativum</i> .....	16
2 .1. 6. La culture de <i>Lepidium Sativum</i> .....	17
3 Implication des PGPR dans les plantes médicinales .....	17

3.1. Effets de l'inoculation des PGPR sur quelques plantes médicinales .....	18
--	----

## **CHAPITRE II : Matériel et méthodes**

1. Echantillonnage du sol rhizosphérique .....	19
2. Isolement des bactéries à effet PGPR .....	20
2.1. Vérification de la pureté des souches .....	20
2.1.1. Examen macroscopique .....	20
2.1.2. Examen microscopique .....	20
2.2. Etude des enzymes respiratoires .....	21
2.2.1. Recherche de la catalase .....	21
2.2.2. Recherche de l'oxydase .....	21
2.3. Galerie API 20 NE .....	21
2.4. Conservation des souches .....	22
3. Effet de l'inoculation des souches à effet PGPR sur le Cresson ( <i>Lepidium sativum</i> ) .....	23
3.1. Germination des graines.....	24
3.2. Inoculation des souches à effet PGPR .....	24
3.3. Etude statistique.....	25

## **CHAPITRE III : Résultats et discussion**

1. Isolement des bactéries à effet PGPR.....	26
1.1. Vérification de la pureté des souches .....	26
1.1.1. Etude macroscopique .....	26
1.1.2. Etude microscopique .....	27
1.2. Etude des enzymes respiratoires.....	28
1.2.1. Test catalase .....	28
1.2.2. Test d'oxydase .....	28
2. Identification des isolats par galeries API 20NE.....	29
3. Effet de l'inoculation des souches à effet PGPR sur le Cresson ( <i>Lepidium sativum</i> ).....	29
3.1. Effet sur la longueur de la partie aérienne et racinaire .....	30
3.2. Effet sur le poids frais et sec des plantes .....	31
Conclusion.....	33
Références bibliographique .....	34
Annexes	

## Liste des figures

<b>Figure 01 :</b> Effet direct et indirect des PGPR sur la croissance des plantes .....	04
<b>Figure 02:</b> La Morphologie de <i>Lepidium sativum</i> (a) la plante, (b) les fleurs, (c) les graines .....	14
<b>Figure 03:</b> Le sol adhérant aux racines de la fève ( <i>Vicia faba</i> L) .....	19
<b>Figure 04:</b> Image satellite de site d'échantillonnage du sol rhizosphérique .....	19
<b>Figure 05:</b> Isolement des souches à effet PGPR .....	20
<b>Figure 06:</b> Procédure d'inoculation de la galerie API 20 NE .....	22
<b>Figure 07:</b> La conservation des souches. ....	23
<b>Figure 08:</b> Les graines de cresson ( <i>Lepidium sativum</i> ) utilisées dans l'essai .....	23
<b>Figure 09:</b> Les graines de cresson avant et après la germination dans l'eau gélosée.....	24
<b>Figure 10:</b> Dispositif expérimental.....	25
<b>Figure 11:</b> Isolement des bactéries rhizosphériques.....	26
<b>Figure 12:</b> Aspect macroscopique des isolats purifiés sur Gélose Nutritive après 24h d'incubation à 30°C.....	27
<b>Figure 13:</b> Aspect microscopique de la souche B5 après coloration de Gram .....	27
<b>Figure 14:</b> Mise en évidence de l'activité de la catalase positive (souche B2).....	22
<b>Figure 15:</b> Mise en évidence de l'activité d'oxydase positive (souche B3) .....	28
<b>Figure 16:</b> Test d'inoculation des plantes de cresson ( <i>Lepidium sativum</i> ) par les souches isolées .....	30
<b>Figure 17:</b> Effet de souches a effet PGPR sur la longueur de la partie aérienne et racinaire de plantes de cresson ( <i>Lepidium sativum</i> ). .....	31
<b>Figure 18:</b> Effet de souches a effet PGPR sur le poids frais et sec de plantes de cresson ( <i>Lepidium sativum</i> ).....	32

## Liste des tableaux

<b>Tableau 01 :</b> Teneur en minéraux des graines de cresson .....	15
<b>Tableau 02 :</b> Composition en pourcentage des acides aminés dans les graines de <i>Lepidium Sativum</i> .....	16
<b>Tableau 03 :</b> Les caractéristiques des souches identifiées.....	29

# **Introduction**

## Introduction

---

Durant des siècles, l'homme est habitué à utiliser les plantes médicinales pour leurs propriétés thérapeutiques (Benderradji *et al.*, 2021). Ces plantes contiennent des substances pouvant être utilisées pour développer la synthèse de médicaments (Sofowora et Onayade, 2013). En médecine traditionnelle, le cresson (*Lepidium sativum*) a une activité thérapeutique reconnue; cette plante a un potentiel important dans le traitement de plusieurs maladies telles que l'arthrite, le diabète sucré et l'hépatite (Bigoniya et Shukla, 2014).

Il est bien connu qu'un produit à base de plantes médicinales devrait être entièrement exempt de matières étrangères toxiques et nocives et de résidus chimiques. Malheureusement les pratiques culturales sont basées essentiellement sur l'utilisation des engrais chimiques qui sont préjudiciable à la santé (Oldroyd et Dixon, 2014).

L'utilisation des bactéries rhizosphériques promotrices de la croissance des plantes (PGPR) est considérée parmi les outils microbiologiques alternatifs les plus efficaces pour améliorer le rendement des plantes médicinales, et pour maintenir la qualité de leurs métabolites secondaires (Bafana et Lohiya, 2013). Donc, cette stratégie durable respectueuses de l'environnement (Rizvi *et al.*, 2022) pourrait remplacer et diminuer efficacement les intrants chimiques (Ali *et al.*, 2010).

Généralement l'action de PGPR se manifeste par la promotion de la productivité et le renforcement de la tolérance des végétaux aux facteurs biotiques et abiotiques, via la production des phytohormones (Spaepen *et al.*, 2007), et l'élimination des agents pathogènes (Sindhu *et al.*, 1999).

Les objectifs tracés pour la réalisation de ce présent travail sont :

- Isolement des bactéries à effet PGPR stimulatrices de la croissance de plante à partir du sol rhizosphérique.
- La caractérisation morphologiques des isolats et biochimiques en utilisant les galeries API (API 20NE, BioMérieux).
- La sélection des souches de PGPR indigènes à haut potentiel promoteur de la croissance de plante de Cresson (*Lepidium sativum*).

# **Chapitre I**

## **Etude bibliographique**

## 1. Les rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR)

### 1. 1. La rhizosphère

Le terme rhizosphère a été introduit pour la première fois en 1904 par l'allemand Lorenz Hiltner, agronome et spécialiste de microbiologie du sol (*Prescott et al.*, 2007). Il est composé de deux mots « Rhizo » du grec rhiza signifiant racine et « Sphère » du latin sphaera signifiant balle (Lynch, 1990). La rhizosphère est la zone entourant la racine, cette zone est sous l'influence de nombreux composés d'exsudats racinaires (Lugtenberg et Kamilova, 2009), y compris les acides aminés, les polysaccharides et des protéines, permettent aux bactéries de coloniser les racines des plantes (Somers *et al.*, 2004 ; Rodriguez-Navarro, 2007) ; grâce à l'accumulation de ces exsudats, le sol rhizosphérique devient riche en nutriments par rapport au sol en vrac (Gray et Smith, 2005).

La rhizodéposition d'exsudats racinaires, composés de métabolites de faible poids moléculaire, d'acides aminés, de mucilages, d'enzymes sécrétées et de lysats cellulaires, peut représenter moins de 10 % de l'assimilation nette de carbone par une plante et jusqu'à 44 % du carbone total d'une plante soumise à un stress nutritionnel (Patterson et Sims, 2000). Les microorganismes du sol utilisent cette source abondante de carbone, ce qui implique que la sécrétion sélective de composés spécifiques peut encourager les relations symbiotiques et protectrices bénéfiques, tandis que la sécrétion d'autres composés inhibe les associations pathogènes (Bais *et al.*, 2005).

La région de la rhizosphère peut être classée en trois parties : Le rhizoplan, c'est la surface des racines des plantes, constitue un milieu exceptionnel riche en nutriments pour les microorganismes (Gray et Smith, 2005) ; L'endorhizosphère, c'est une zone intraracinaire colonisée aussi par les bactéries (Gobat *et al.*, 2010) ; et l'ectorhizosphère qui est la zone extérieure trouvée après le Rhizoplan (David *et al.*, 2013).

## 1. 2. Les PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria)

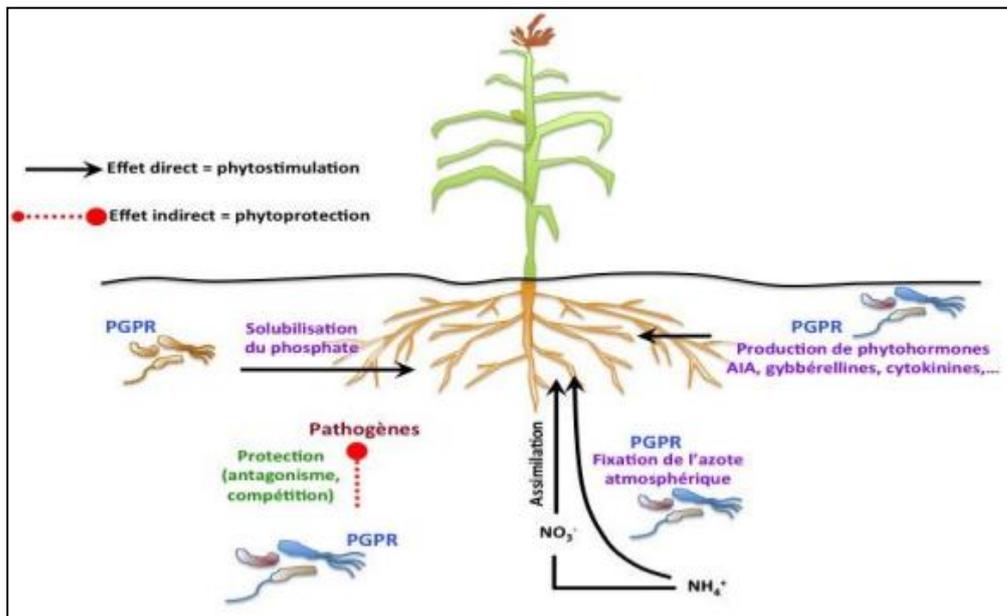
Les PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria) ou les rhizobactéries favorisant la croissance des plantes sont une communauté spécifique de bactéries qui ont la capacité de coloniser le sol rhizosphérique, avec le potentiel de résider en contact avec les racines des plantes à différents stades de développement et de croissance (Kloepper *et al.*, 1993), et représentent environ 2 à 5% du total des bactéries qui se trouve dans le rhizosphère (Antoun et Kloepper, 2001). Les bactéries répondant à cette définition appartiennent à différents genres et espèces, parmi lesquels les plus étudiées sont : *Pseudomonas*, *Azospirillum*, *Agrobacterium* et *Bacillus* (Leong, 1986).

En 1978 le terme PGPR a été utilisé pour la première fois par Kloepper et Schroth uniquement pour le groupe microbien impliqué dans la lutte biologique (Kloepper *et al.*, 1980) sous les noms de Nodule Promoting Rhizobacteria (NPR) les rhizobactéries favorisant les nodules (Bazot, 2005) et Plant Health Promoting Rhizobacteria (PHPR) rhizobactéries favorisant la santé des plantes (Singh *et al.*, 2018). Aujourd'hui, toutes les rhizobactéries améliorant la croissance des plantes sont nommées PGPR (Haghighi *et al.*, 2011).

Les PGPR sont divisées en deux groupes ; les bactéries extracellulaires (PGPR<sub>e</sub>) présentent dans la rhizosphère ou dans les espaces entre les cellules du cortex racinaire, sur le rhizoplane, et les bactéries intracellulaires (PGPR<sub>i</sub>) qui se trouvent à l'intérieur des cellules racinaires et dans les structures nodulaires (Gray et Smith, 2005).

### 1. 2.1. Mode d'action des PGPR

Les PGPR peuvent améliorer la croissance des plantes soit directement en facilitant l'absorption des nutriments de l'environnement et via la synthèse de substances (Glick *et al.*, 1999), soit indirectement par la production de substances inhibitrices ou par l'augmentation de la résistance naturelle de l'hôte pour diminuer ou prévenir les effets délétères des phytopathogènes sur les plantes (Handelsman et Stabb, 1996 ; Nehl *et al.*, 1997 ; Cartieaux *et al.*, 2003) (Figure 01).



**Figure 01 :** Effet direct et indirect des PGPR sur la croissance des plantes

(Khan *et al.*, 2009)

### 1.2.1.1. Effet direct

#### a/ La fixation biologique de l'azote atmosphérique

La fixation d'azote par les micro-organismes représente la source la plus importante d'azote dans un écosystème tellurique (Burgmann *et al.*, 2004). Ces micro-organismes peuvent transformer l'azote atmosphérique ( $\text{N}_2$ ) en ammoniac ( $\text{NH}_3$ ), une forme utilisables par les plantes en utilisant un système enzymatique complexe appelé nitrogénase (Kim et Rees, 1994). Les Bactéries fixatrices d'azote sont groupées en deux catégories : les bactéries symbiotiques y compris les membres de la famille des *Rhizobiaceae*, qui forment une symbiose avec les légumineuses et les non-légumineuses ; et des bactéries non symbiotiques telles que les cyanobactéries (Bhattacharyya et Jha, 2012). 80% de l'azote est formé par des microorganismes à associations symbiotiques et le reste provient des systèmes libres ou associés (Graham, 1988). La fixation de l'azote non symbiotique a une grande importance agronomique (Saxena et Tilak, 1998). Les PGPR les plus connus pour la fixation d'azote atmosphérique sont : *Azoarcus sp.*, *Burkholderia sp.*, *Gluconacetobacter diazotrophicus*, *Herbaspirillum*, *Azotobacter*, *Paenibacillus* et *Azospirillum brasilense* (Weyens *et al.*, 2010 ; Arora *et al.*, 2012).

## b. Solubilisation des phosphates

Le phosphore (P) est parmi les éléments les plus nécessaires pour le développement des plantes après l'azote, car il est impliqué dans les processus métaboliques clés tels que le stockage de l'énergie cellulaire, la photosynthèse et la respiration (Awasthi *et al.*, 2011). Bien que la quantité de phosphore dans le sol soit généralement assez élevée (souvent entre 400 et 1200 mg kg<sup>-1</sup> de sol), la majeure partie de phosphore est insoluble (Miller *et al.*, 2010), alors que les plantes ne l'absorbent que sous formes solubles (Bhattacharyya et Jha, 2012).

Les composés insolubles du P peuvent être solubilisés par les acides organiques, les enzymes phosphatases et les agents complexants produits par les micro-organismes du sol (Illmer et Schinner, 1995) cette capacité est un trait important dans les PGPR ainsi que dans les champignons promoteurs de la croissance des plantes tels que les mycorhizes (Rodríguez et Fraga, 1999; Richardson 2001). La solubilisation se traduit par la conversion de phosphate insoluble en ions orthophosphate solubles assimilables par les plantes (Pal 1998 ; Rodriguez et Fraga, 1999 ; Chen *et al.*, 2006 ; Vyas et Gulati, 2009). Selon Baya *et al.*, (1981), *Pseudomonas* et *Bacillus* spp sont signalés comme les plus importants solubilisateurs de phosphate.

## c. La solubilisation de potassium

Après l'azote (N) et le phosphore (P), le potassium (K) est le nutriment végétal le plus important qui joue un rôle clé dans la croissance, le métabolisme et le développement des plantes. En plus d'augmenter la résistance des plantes aux maladies, aux ravageurs et aux stress abiotiques, le K est nécessaire pour activer plus de 80 enzymes différentes responsables de processus végétaux, la synthèse de l'amidon, la réduction des nitrates, la photosynthèse et la dégradation des sucres (White et Karley, 2010 ; Almeida *et al.*, 2015 ; Cecílio Filho *et al.*, 2015 ; Yang *et al.*, 2015 ; Gallegos-Cedillo *et al.*, 2016 ; Hussain *et al.*, 2016). Le potassium soluble est présent avec des concentrations très faibles dans le sol, 90 % existe sous forme de roches et de silicates minéraux insolubles (Parmar et Sindhu, 2013) alors que les plantes ne l'absorbent que sous formes solubles. Les bactéries du sol sont capables de transformer efficacement le K du sol en formes disponibles pour les plantes ; parmi ces bactéries, *B. mucilaginosus*, *B. edaphicus* et *B. circulanscan* ont été décrites comme des solubilisateurs de K efficaces (Meena *et al.*, 2014; Meena *et al.*, 2014 ; Meena *et al.*, 2016).

#### d. La production des phytohormones

Les hormones végétales ont un rôle essentiel dans le développement des plantes, et même dans la réponse à leur environnement (Davies, 2004). Lorsque les plantes rencontrent des situations environnementales limitant leur croissance, elles tentent souvent d'ajuster les niveaux de leurs phytohormones en diminuant les effets négatifs qui affectent leur croissance (Garcia Salamone *et al.*, 2005). Si cette stratégie est parfois inefficace, les PGPR peuvent modifier les niveaux de phytohormones et affecter l'équilibre hormonal de la plante et sa réponse au stress (Glick *et al.*, 2007).

Différentes phytohormones peuvent être produites par les PGPR en tant que métabolites secondaires (Neubauer *et al.*, 2000), telles que les auxines dont l'Acide Indole Acétique (AIA), les cytokinines, les gibbérellines, (ACC) acide 1-aminocyclopropane-1-carboxylique (Arshad et Frankenberger, 1993 ; Spaepen *et al.*, 2007). D'après Khalid *et al.*, (2004), la capacité à biosynthétiser l'auxine peut être utilisée pour cribler des souches de PGPR efficaces.

##### - Acide Indole Acétique (AIA)

L'Acide Indole Acétique (AIA) est le plus important du groupe des auxines (Ashrafuzzaman *et al.*, 2009) ; il est impliqué dans plusieurs processus du développement chez la plante (Srivastava, 2002) notamment dans l'initiation de la croissance, l'élongation des racines et l'élargissement cellulaire (Vessey, 2003). Il est signalé que *Pseudomonas*, *Arthrobacter*, *Acinetobacter*, *Enterobacter* et *Bacillus* sont parmi les espèces bactériennes les plus productrices d'Acide Indole Acétique (Yuan *et al.*, 2011).

La biosynthèse de l'AIA peut être affectée par plusieurs facteurs environnementaux, tels que le pH acide, le stress osmotique (Spaepen *et al.*, 2007), et en présence de plus grandes quantités de tryptophane (Spaepen *et al.*, 2009) dont les exsudats des racines sont la source principale (Spaepen *et al.*, 2007).

### -Les cytokinines

Les cytokinines sont des aminopurines N6-substituées jouant un rôle essentiel dans nombreux processus physiologiques comme la germination des graines, la promotion de la ramification, le développement des racines, l'accumulation de la chlorophylle et l'expansion des feuilles (Salisbury et Ross, 1992) ; de nombreuses PGPR tels que *Azotobacter*, *Azospirillum*, *Rhizobium*, *Bacillus* et *Pseudomonas spp.* sont capable de produire les cytokinines (Nieto et Frankenberger, 1989 ; Timmusk *et al.*, 1999).

L'inoculation de graines avec des bactéries productrices de cytokinines conduit généralement à augmenter le contenu en cytokinines chez les plantes influençant ainsi simultanément la croissance et le développement des plantes (Arkhipova *et al.*, 2005).

### -Les gibbérellines

Les gibbérellines sont des phytohormones qui affectent la division et l'allongement cellulaires et elles sont impliquées dans plusieurs processus pour améliorer la croissance tels que la germination des graines, la floraison, la fructification et la sénescence retardée dans de nombreux organes d'un large éventail d'espèces végétales (MacMillan, 2001). En particulier, elles sont impliquées dans la promotion de la croissance de la racine grâce à leur capacité de réguler l'abondance des poils racinaires (Bottini *et al.*, 2004). La production des gibbérelline a été connu pour la première fois chez *A. brasilense* (Tien *et al.*, 1979) et *Rhizobium* (Williams et De Mallorca, 1982 ), puis chez d'autre espèces y compris *Azotobacter*, *Arthrobacter*, *Azospirillum*, *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Acinetobacter*, *Flavobacterium*, *Micrococcus*, *Agrobacterium*, *Clostridium*, *Burkholderia*, et *Xanthomonas* (Mitter *et al.*, 2002 ; Tsakelova *et al.*, 2006 ; Joo *et al.*, 2009)

### e. Production des sidérophores

Le fer (Fe) fait partie des principaux minéraux présents à la surface de la terre, le Fe<sup>+3</sup> est la forme prédominante dans la nature, et qui est hautement insoluble, il ne peut donc pas être absorbé par les plantes. Certains PGPR produisent des sidérophores pour résoudre ce problème (Vejan *et al.*, 2016).

Les sidérophores du grec « sideros » signifiant fer et « phoros » signifiant porteur (Rossum *et al.*, 1994) sont des métabolites secondaires avec un poids moléculaire faible (Neilands, 1995), produits par les microorganismes comme agents piègeurs afin de combattre un stress ferrique faible (Korat *et al.*, 2001). La raison de la synthèse des sidérophores n'est pas seulement de surmonter l'insolubilité du fer disponible mais aussi de réguler et de contrôler son absorption, car à forte concentration il devient toxique (Guerinot, 1994). De nombreuses bactéries productrices de sidérophores appartiennent aux genres *Bradyrhizobium*, *Pseudomonas*, *Rhizobium*, *Serratia* et *Streptomyces* de la rhizosphère (Kuffner *et al.*, 2008). Les sidérophores sont également impliqués dans la chélation d'autres métaux de la rhizosphère ayant une faible disponibilité pour les plantes tels que le zinc et le plomb (Dimkpa *et al.*, 2009).

### 1.2.1.2. Effet indirect

Il existe de nombreux moyens indirects par lesquels les rhizobactéries agissent en tant que les promoteurs de la croissance des plantes, grâce à leurs propriétés de biocontrôle et à l'induction d'une résistance systémique contre les phytopathogènes, et les insectes nuisibles, notamment par la production d'antibiotiques, HCN, d'enzymes hydrolytiques, etc (Gupta *et al.*, 2015).

#### a. Production des antibiotiques

La production d'antibiotiques est l'un des mécanismes de biocontrôle les plus connus chez les PGPR (Shiley, 2013). Ces métabolites ont montré diverses propriétés telles que des composés antimicrobiens, antihelminthiques, phytotoxiques, antiviraux, antioxydants, cytotoxiques, antitumoraux et favorisant la croissance des plantes (Kim *et al.*, 2012). Il est remarqué que les espèces de *Bacillus* et *les pseudomonas fluorescents* jouent un rôle actif dans la suppression des microorganismes pathogènes en produisant des métabolites extracellulaires, qui ont des effets inhibiteurs et antagonistes contre leurs concurrents. Les antibiotiques produits par les PGPR comprennent : le phloroglucinol 2.4 diacétylique, acide phenazine-1-carboxylique, phenazine-1-carboxamide, pyolutéorine, pyrrolnitrine, oomycine A, viscosinamide, butyrolactones, kanosamine, zwittermycine A, aerugine, rhamnolipides, cépaciamide A, écomyciné, acide pseudomonique, azomycine, antibiotiques antitumoraux FR901463, cépafungines et karalicine et antiviraux (Dilantha *et al.*, 2005).

**b. La production du cyanure d'hydrogène**

Le cyanure d'hydrogène (HCN) est un métabolite secondaire synthétisé par de nombreuses rhizobactéries à partir de glycosides cyanogènes ou de la glycine (Bakker *et al.*, 1987) qui est le meilleur précurseur de la production des cyanides chez les microorganismes (Askeland et Morrison, 1983). La HCN synthase est une flavoprotéine membranaire catalysant la formation de cyanure d'hydrogène et de CO<sub>2</sub> à partir de la glycine. Cette enzyme est codée par trois gènes structuraux ( hcnA, hcnB, hcnC ) séquencés chez *P. aeruginosa* PAO1 et chez *P. fluorescens* CHAO (Ramette *et al.*, 2003).

Le HCN agit comme un inhibiteur efficace de nombreuses enzymes métalliques notamment, les cytochromes C oxydase ; il inhibe d'abord le transport des électrons et perturbe l'approvisionnement en énergie de la cellule, ce qui entraîne la mort des organismes vivants. Il peut affecter l'établissement des plantes ou inhiber le développement de leurs maladies, avec un grand potentiel pour contrôler les maladies bactériennes des plantes (Lanteigne *et al.*, 2012). De nombreux genres bactériens ont la capacité de produire du HCN, notamment des espèces d'Alcaligenes, d'*Aeromonas*, de *Bacillus*, de *Pseudomonas* et de *Rhizobium* (Alemu, 2016).

**c. Résistance systémique induite**

les PGPR protègent les plantes contre les pathogènes en déclenchant des réponses de défense biochimiques et moléculaires (Lugtenberg et Kamilova, 2009) par l'activation des gènes liés à la pathogénèse grâce à l'intermédiaire des voies de signalisation des phytohormones et des protéines de régulation de la défense, afin de préparer les plantes à une future attaque de pathogènes (Pieterse *et al.*, 2012).

La Résistance Systémique Induite (RSI) par les rhizobactéries ressemble à La Résistance Systémique Acquisée (RSA) par les agents pathogènes en ce sens que les deux types de résistance rendent les parties non infectées de la plante plus résistantes aux agents pathogènes (Van Wees *et al.*, 1997 ; Van Loon *et al.*, 1998), y compris les agents pathogènes fongiques, bactériens et viraux, ainsi que les nématodes et les insectes (Zehnder *et al.*, 1997 ; Van Loon *et al.*, 1998 ; Bent, 2006 ; Pozo et Azcon-Aguilar, 2007).

## 1. 2. 2. Les PGPR les plus étudiées

### a. *Pseudomonas sp*

Les *Pseudomonas fluorescents* sont parmi les PGPR les plus répandues (Kloepper *et al.*, 1980) elles englobent un groupe de saprophytes communs non pathogènes qui colonisent le sol, l'eau et les environnements de surface des plantes, elle s'agit d'une bactérie Gram négatif mobile, aérobie stricte est un aérobie obligatoire, sauf pour certaines souches qui peuvent utiliser NO<sub>3</sub> comme accepteur d'électrons à la place de O<sub>2</sub> (Palleroni 1984), de 2 à 4 µm de longueur, en forme de bâtonnet renflé, avec un flagelle polaire qui joue un rôle important dans la pathogénicité ( Kayser *et al.*, 2001;Willcox, 2007).

Comme son nom l'indique, elle sécrète un pigment fluorescent verdâtre soluble appelé fluorescéine, en particulier dans des conditions de faible disponibilité en fer, *Pseudomonas fluorescent* a des besoins nutritionnels simples et se développe bien dans des milieux de sels minéraux complétés avec un grand nombre de sources de carbone. Elle évolue à un pH neutre et sa température optimale de croissance est de 25 à 30°C (Palleroni, 1984), mais elle peut aussi se développer à une température aussi basse que 4°C. La bactérie *P.fluorescent* ne forme pas des spores ou d'autres structures de survie et ne peut pas se développer dans des conditions acides (< pH 4,5), Sa demande nutritionnelle est modeste, elle peut survivre et se multiplier pendant plusieurs mois dans des environnements humides. La plupart des souches sont des chimio-organotrophes strictement aérobies nécessitant à la fois de l'oxygène et du carbone organique pour leur croissance (Holt, 1994).

Les *Pseudomonas fluorescents* ont été isolés de façon classique du sol et de la rhizosphère et ont fait l'objet d'une caractérisation approfondie en tant qu'agents de lutte biologique et PGPR (Lucy *et al.*, 2004).

Certains membres de *P. fluorescent* sont des agents potentiels pour le biocontrôle qui suppriment les maladies des plantes en protégeant ces graines et ces racines d'une infection fongique, elles favorisent également la croissance des plantes et réduisent la gravité de nombreuses maladies fongiques (Hoffland *et al.*, 1996 ; Wei *et al.*, 1996) par la production d'un certain nombre de métabolites secondaires, y compris des antibiotiques, des sidérophores et du cyanure d'hydrogène (O'Sullivan et O'Gara, 1992).

**b. *Bacillus Spp***

Les souches du genre *Bacillus* sont parmi les PGPR les plus fréquemment rapportées ( Qiao *et al.*, 2014), elles résistent aux conditions environnementales défavorables et omniprésentes dans un large éventail d'habitats, y compris le sol (Prashar *et al.*, 2013), où elles représentent jusqu'à 95 % des populations de bactéries Gram positives, elles sont capables de produire des endospores dures et résistantes et des antibiotiques qui limitent de larges gammes de phytopathogènes (Cavaglieri *et al.*, 2005) de plus, elles stimulent la croissance des plantes par divers mécanismes directs et indirects ; il s'agit de la fixation de l'azote, la solubilisation et la minéralisation du phosphore et d'autres nutriments, la production de phytohormones, la production de sidérophores, de composés antimicrobiens et d'enzymes hydrolytiques, et la tolérance aux stress abiotiques (Goswami *et al.*, 2016). Plusieurs espèces du genre *Bacillus* comme *B. megaterium*, *B. circulans*, *B. coagulans*, *B. subtilis*, *B. azotofixans*, *B. macerans*, *B. velezensis*, etc. sont signalées comme étant PGPR (Goswami *et al.*, 2016 ; Fan *et al.*, 2018).

**c. *Azotobacter spp***

*Azotobacter* appartient à la famille des Azotobacteriaceae, ce sont des diazotrophes aérobies non symbiotiques, à Gram négatif (Hardisson *et al.*, 1969 ; Balajee et Mahadevan, 1990 ; Gahlot et Narula, 1996 ; Moreno *et al.*, 1999 ; Revilas, 2000), ovales ou sphériques qui forment des kystes à paroi épaisse (moyens de reproduction asexuée dans des conditions favorables) (Salhia, 2013), il est constitué de deux genres, des *Azomonas* (ne formant pas de kystes) à trois espèces et des *Azotobacter* (Formant des kystes) à six espèces (Tchan *et al.*, 1984) certaines sont mobiles au moyen de flagelles péritriches, d'autres non. Les *Azotobacter* sont typiquement polymorphes et leur taille varie de 2 à 10 µm de long et de 1 à 2 µm de large (Salhia, 2013). Ces bactéries utilisent l'azote atmosphérique pour la synthèse de leurs protéines cellulaires ; cette protéine cellulaire est ensuite minéralisée dans le sol après la mort des cellules d'*Azotobacter*, contribuant ainsi à la disponibilité de l'azote pour les plantes cultivées (Tchan, 1989) aussi elles ayant des effets bénéfiques sur la croissance et le rendement des cultures par la biosynthèse de substances biologiquement actives (Chen, 2006 ; Lenart, 2012) comme la vitamine B, l'acide nicotinique, l'acide pantothénique, la biotine, les hétéro-auxines et les gibbérellines, etc, qui améliorent la croissance des racines des plantes. D'autres caractéristiques importantes d'*Azotobacter* sont associées à la présence d'exsudats

racinaires, ce qui aide à modifier l'absorption des nutriments par les plantes (Narula et Guptha, 1986).

La présence d'*Azotobacter spp* dans les sols a des effets bénéfiques sur les plantes, mais l'abondance de ces bactéries est liée à de nombreux facteurs, aux propriétés physico-chimiques du sol (la matière organique, le pH, la température et l'humidité) et microbiologiques ( Kizilkaya, 2009).

#### **d. *Azospirillum***

Le genre *Azospirillum* comprend des bactéries libres fixatrices d'azote connues sous le nom de rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR), qui peuvent coloniser, par adhésions, la surface racinaire ou les espaces intercellulaires des racines des plantes hôte. Ce groupe de rhizobactéries libres comprend dix espèces, chacune classée selon ses caractéristiques biochimiques et moléculaires particulières : *Azospirillum lipoferum* et *Azospirillum brasilense*, *Azospirillum amazonense*, *Azospirillum halopraeferens*, *Azospirillum irakene*, *Azospirillum largimobile*, *Azospirillum doebereineriae*, *Azospirillum oryzae*, *Azospirillum melinis* et plus récemment *Azospirillum canadensis* (Bashan *et al.*, 2004).

## **2. Les plantes médicinales**

Le terme "plante médicinale" fait référence à une variété de plantes qui ont des propriétés thérapeutiques. Ces plantes sont une source riche de composés qui peuvent être utilisés pour développer la synthèse de médicaments (Rasool Hassan, 2012). Les parties des plantes médicinales qui peuvent être utilisées sont différents : graines, racines, feuilles, fruits, peau, fleurs ou même la plante entière. Les composés actifs de la plupart des parties des plantes médicinales ont des effets thérapeutiques directs ou indirects et sont utilisés comme agents médicinaux. Les plantes médicinales produisent et stockent certaines matières, que l'on appelle métabolites secondaires, ces derniers ont des effets physiologiques sur les organismes vivants (Phillipson, 2001). Elles sont considérées comme des sources importantes pour la production de nouveaux médicaments (Chen *et al.*, 2016) et même ont une importance économique (Zewdu *et al.*, 2001). Ces plantes sont couramment commercialisées sous diverses formes dans différents pays (Lange, 1998). Actuellement, un grand nombre de plantes médicinales ont été utilisées comme matières premières dans les industries biopharmaceutiques modernes (Rai *et al.*, 2000).

## 2.1. *Lepidium sativum* (cresson)

*Lepidium sativum* connu localement sous le nom de "cresson de jardin" ou "hab arachad حب الرشاد et horf حرف" (Baba Aissa 2011) appelée aussi passerage cultivée (Belot 1954), Garden cress, peppergrass en Anglais (Eberhard *et al.*, 2005) ; son nom Italien est "Nasturzio ortense" (Fournier 2010), Gartenkresse, Gresich, Tellerkress en Allemand (Eberhard *et al.*, 2005). Elle appartient à la famille des Brassicaceae et au genre *Lepidium* (Aqafarini *et al.*, 2019), c'est une plante médicinale herbacée très répondeu dans les pays du Moyen-Orient, en Europe et aux États-Unis (Gill et MacLeod, 1980 ; Razavi *et al.*, 2011).

### 2.1.1. Origine et répartition géographique du *Lepidium sativum*

L'origine exacte de *Lepidium sativum* est assez floue, Xénophon (400 av. J.-C.) mentionne que les Perses avaient l'habitude de manger cette plante même avant que la race ne soit connue. L'histoire de sa culture remonte à 2000 ans passés, et sa culture était déjà connue dès l'antiquité en Grèce et en Italie, peut-être aussi en Égypte. Actuellement, il est cultivé dans le monde entier, y compris la plupart des pays africains, mais surtout à petite échelle dans les jardins familiaux. On le trouve aussi dans la nature, échappé des cultures (Jansen, 2002). En Inde, il est cultivé presque tout au long couvrant différentes zones agro-climatiques (Kadam *et al.*, 2012).

### 2.1.2. Description botanique

Il s'agit d'une plante médicinale herbacée, annuelle érigée, atteignant 80 cm de haut, d'une tige cylindrique ou finement striée, fortement ramifiée, glabre (Grubben *et al.*, 2004), avec des feuilles de taille et de forme différentes (Maurice, 2014) ; elles sont entières ou pennées, diversement lobées et généralement de segments linéaires environ 5 à 6 cm de long et les lobes ont une taille de 0,7-1,2 à 0,3-0,6 cm, les feuilles supérieures sont le plus souvent entières de 2 à 3 cm de long, lancéolées et sessiles (Raval et Pandya, 2011) (Figure 2a).

Les fleurs sont bisexuées, régulières, tétramères, d'un pédicelle de 1,5 - 4,5 mm de long ; Les sépales ovale mesurent 1 à 2 mm de long, les pétales sont spatulés avec une courte griffe jusqu'à 3 mm de long, d'une couleur blanches ou rose pâle (Falana *et al.*, 2014) et se trouvant en racèmes (Poy *et al.*, 2015) ; les racèmes sont axillaires et terminaux de 7 à 15 cm de long (Raval et Pandya, 2011), et les anthères sont le plus souvent violacées (Falana *et al.*, 2014) (Figure 2b).

Les fruits sont des gousses obovales, d'environ 5 mm de long (Watt et Brandwijk, 1962), ils sont ellipsoïdes, comprimés, dentelés au sommet et légèrement ailés vers l'apex et renferment des graines brunes ou rouges de forme ovale (Maurice, 2014) (Figure 2c), d'une saveur piquant (Kaddem, 1990), elles absorbent rapidement l'eau lorsqu'elles sont trempées dans l'eau et produisent un liquide collant et insipide (Poy *et al.*, 2015).



A

B

C

**Figure 02:** La Morphologie de *Lepidium sativum* (a) la plante, (b) les fleurs, (c) les graines (Prajapati *et al.*, 2014).

### 2.1. 3. Systématique de l'espèce *Lepidium sativum*

Selon la classification APG III (2009) ; la systématique de l'espèce *Lepidium sativum* est la suivante :

<b>Règne</b>	Plantae
<b>Sous-règne</b>	Trachéophytes
<b>Embranchement</b>	Spermaphytes
<b>Sous embranchement</b>	Angiospermes
<b>Classe</b>	Magnoliopsida
<b>Ordre</b>	Brassicales
<b>Famille</b>	<i>Brassicaceae</i>
<b>Genre</b>	<i>Lepidium</i>
<b>Espèce</b>	<i>Lepidium sativum</i> L.

#### 2.1.4. Les Propriétés nutritionnelles de *Lepidium Sativum*

Le cresson est une source importante d'acide folique, des vitamines qui sont : Vitamine A, vitamine B1, vitamine B2, Vitamine B3, Vitamine B5, Vitamine B6, Vitamine C, Vitamine E, et aussi des minéraux suivants : Calcium, Magnésium, Potassium, Zinc, Fer, phosphore, manganèse, sélénium, cuivre et sodium (Shail *et al.*, 2016) (Tableau 01).

**Tableau 01** : Teneur en minéraux des graines de cresson (Gokavi *et al.*, 2004)

Les minéraux	Mg/100 g
Calcium	266.35
Cuivre	5.73
Fer	8.31
Magnésium	339.23
Manganèse	2.00
Phosphore	608.63
Potassium	1236.51
Sodium	19.65
Zinc	6.99

La tige et les feuilles de *Lepidium sativum* contiennent des glucosinolates et la glucotropéoline (benzyl glucosinolate) qui est distillée à la vapeur (Grubben *et al.*, 2004). La feuille contient des protéines, des lipides, des glucides, des minéraux, du phosphore (P), calcium (Ca), oligo-éléments, fer, nickel, cobalt, iode, Vitamine A, thiamine, riboflavine, niacine et acide ascorbique (Hassan *et al.*, 2011)

Les graines sont très énergétiques grâce de leur teneur plus élevées en protéines et en acide aminés (Tableau 02) ; ils contiennent environ 25% des protéines , presque 14 à 24% des lipides, 33 à 54% de glucides, 8 % de fibres brutes (Arkroyd *et al.*, 1960 ; Mathews *et al.*, 1993) et d'une quantité remarquable de calcium, de fer, d'acide folique, de vitamine A et de vitamine C, aussi d'un composant secondaire qui est le glucosinolate (Bhaswati et Rekha , 2020).

**Tableau 02 :** Composition en pourcentage des acides aminés dans les graines de *Lepidium Sativum* (Shail *et al.*, 2016).

Acide aminé	Pourcentage%
Isoleucine	4.19
Leucine	7.03
Lysine	5.98
Méthionine	0.51
Phénylalanine	5.39
Thréonine	3.76
Tryptophane	0.92
Valine	6.21
Arginine	3.44
Histidine	3.87
Alanine	4.59
Acide aspartique	12.07
Cystine	0.21
Acide glutamique	24.29
Glycine	5.08
Proline	4.63
Sérine	4.18
Tyrosine	2.88

Les graines de *L. sativum* contiennent 24% d'huile qui se compose principalement de 32% d'acide alpha-linolénique (AAL) et de 12% d'acide linoléique (AL). Cette huile est stable du point de vue réactif grâce à sa teneur élevée en antioxydants et en phytostérols (Moser *et al.*, 2009 ; Diwakar *et al.*, 2010) ; de plus il comporte des mucilages lorsqu'ils réagissent avec l'eau, ils donnent de l'arabinose, du galactose, glucose, mannose, xylose et plusieurs d'acides uroniques (Divekar *et al.*, 2010).

Concernant les composants phytochimiques, les graines, les feuilles, les racines et l'huile de graines de *L. sativum* sont riches en alcaloïdes, glucosinolates, saponines, terpènes, acides gras saturés et essentiels (Al-Yahya *et al.*, 1994 ; Hussein *et al.*, 2017 ; Singh et Paswan, 2017).

### 2 .1. 5. Effet Thérapeutique de *Lepidium Sativum*

En médecine traditionnelle, *Lepidium Sativum* est considéré comme une thérapie pour de nombreuses maladies, telles que l'arthrite, le diabète sucré et l'hépatite (Bigoniya et Shukla, 2014). En outre, il est connu pour ses propriétés anti hypertenseurs, diurétiques, anti-inflammatoires, analgésiques, anticoagulantes, anti-rhumatismes, hypoglycémiques, laxatifs, procinétiques, anti-diarrhéiques et antispasmodiques (Al-Yahya *et al.*, 1994).

Les racines sont amères, âcres et sont utiles dans le traitement de la syphilis secondaire et le ténésme et sont utilisées comme condiment (Uphof, 1959). Les parties aériennes sont utilisées pour traiter la toux asthmatique et la maladie hémorroïdaire, les feuilles stimulent la sécrétion urinaire et servent à traiter les maladies d'origine scorbutique et hépatique (Grubben *et al.*, 2004).

Les graines contiennent de nombreuses substances phytochimiques responsables de leurs propriétés médicinales, ils contiennent de la lépidine qui agit comme un diurétique ; les composés imidazolés qui sont des antihypertenseurs, des glucosinolates, des composés flavonoïdes et de semilepidinoside (a et b) qui agissent respectivement comme anticarcinogènes, antioxydants et antiasthmatiques (Jain *et al.*, 2016). Le mucilage des graines germées calme l'irritation des intestins pendant les épisodes de dysenterie et de diarrhée. La plante de *lepidium sativum* être utile pour soigner la toux et la constipation, et pour renforcer le système immunitaire (Grubben *et al.*.,2004).

### **2 .1. 6. La culture de *Lepidium Sativum***

*Lepidium sativum* (cresson) est une plante facile à cultiver avec peu d'exigences, elle peut être diffusée après l'hiver ou tout au long de l'année dans les climats tempérés (Wadhwa *et al.*, 2012), mais la meilleure récolte est obtenue pendant la saison hivernale (Falana *et al.*, 2014). Le cresson se développe dans un sol riche en matière organique, léger, à forte rétention d'eau, mais il pousse mieux sur les limons humides (Le page et Meudoc, 2002) aussi, il a la capacité de tolérer une légère acidité dans le sol et peut être cultivée comme la moutarde blanche (Sharma et Agarwal, 2011). Au cours de la préparation du sol, les graines doivent être mélangées avec un engrais bien équilibré, ensuite elles doivent être semées à 5-6 cm de profondeur et à 45- 60 cm de distance pour avoir une culture continue. *Lepidium Sativum* peut pousser dans un sol humide et à mi-ombre ou même sans ombre du tout ; il est préférable de le couvrir d'un peu d'ombre pour éviter que la chaleur ne monte directement à la graine (Pankaj et Amandeep, 2020), et pour obtenir un bon rendement de cresson, l'irrigation est possible une ou deux fois (Wadhwa *et al.*,2012).

### **3. Implication des PGPR dans les plantes médicinales**

Récemment, l'application de PGPR a été signalée comme ressource naturelle peu coûteuse et bénéfique, permettant d'améliorer le rendement des plantes (Raiyani *et al.*, 2018 ;Lobo *et al.*, 2019 ;Nair *et al.*, 2021). Mais, les données sur l'effet bénéfique et la

performance de ces microorganismes sur des plantes médicinales sont relativement rares (Sharma *et al.*, 2015 ; Chakrabarty *et al.*, 2020 ; Wang *et al.*, 2020), et très peu d'expériences sous serre et sur champs ciblant spécifiquement ce type d'interactions ont été menées. Mais les PGPR peuvent également d'interagir avec les plantes médicinales par des moyens similaires à ceux adoptés par d'autres cultures d'après Rizvi *et al.*, (2022).

### 3.1. Effets de l'inoculation des PGPR sur quelques plantes médicinales

#### **Datura (*Datura stramonium*)**

L'application d'un mélange composé de bactéries fixatrices d'azote (*Azotobacter chroococcum* et *Azospirillum brasilense*), bactérie Solubilisatrice du phosphate (*Bacillus megaterium* var. *phosphaticum*), et des engrais minéraux (N et P) sur la plante médicinale *Datura stramonium* a montré une meilleure croissance végétative, ainsi une amélioration du statut minéral, et de rendement (Božić *et al.*, 2014 ; Nassar *et al.*, 2015).

#### **Ashwagandha (*Withania somnifera* )**

Selon Zandi *et al.*, (2017), l'inoculation d'*Azospirillum*, d'*Azotobacter*, *Pseudomonas* et *Bacillus* a augmentée considérablement la hauteur et la longueur des racines de Ashwagandha (*Withania somnifera* ).

#### **Fenugrec (*Trigonella foenum-graecum* L)**

Après une inoculation mixte par (*Rhizobium meliloti* et *pseudomonas fluorescents*) un effet significatif a été observé sur la surface foliaire, de la biomasse fraîche et sèche des racines de Fenugrec (*Trigonella foenum-graecum* L). ainsi sur la concentration en Phosphore (P) et potassium (K), ce qui montre que les PGPR ont impact bénéfique sur les caractéristiques morphologiques, physiologiques et phytochimiques des plantes de fenugrec (Amalraj *et al.*, 2017).

#### **Curcuma (*Curcuma longa* L)**

L'inoculation de curcuma (*Curcuma longa*) par *Pseudomonas* et *Bacillus* spp a augmenté significativement la hauteur des plantes (5%), et le poids des rhizomes (60%) par rapport aux témoins non inoculés (Suryadevara et Ponmurugan, 2012). Kumar *et al.*, (2014) ont également montrés l'effet de l'inoculation des PGPR sur la hauteur et le nombre de feuilles de curcuma , ainsi de la biomasse sèche du rhizome.

# **Chapitre II**

## **Matériel et méthodes**

Le présent travail a été réalisé au sein de laboratoire du département de Sciences de la Nature et de la Vie, Université de Tissemsilt durant la période (février-mai 2022).

### 1. Echantillonnage du sol rhizosphérique

Il a été démontré que les bactéries qui favorisent la croissance des plantes sont localisées au niveau de la rhizosphère, ou adhérentes aux racines des plantes directement. Le sol échantillonné lors de cette étude est un sol attaché aux racines de la fève (*Vicia faba* L) (Figure 03), cultivée dans un terrain agricole dans la wilaya de Tissemsilt, dont les coordonnées GPS ont été prises ( $35^{\circ} 44' 42''\text{N } 1^{\circ} 32' 50''\text{E}$ ) (Figure 4).



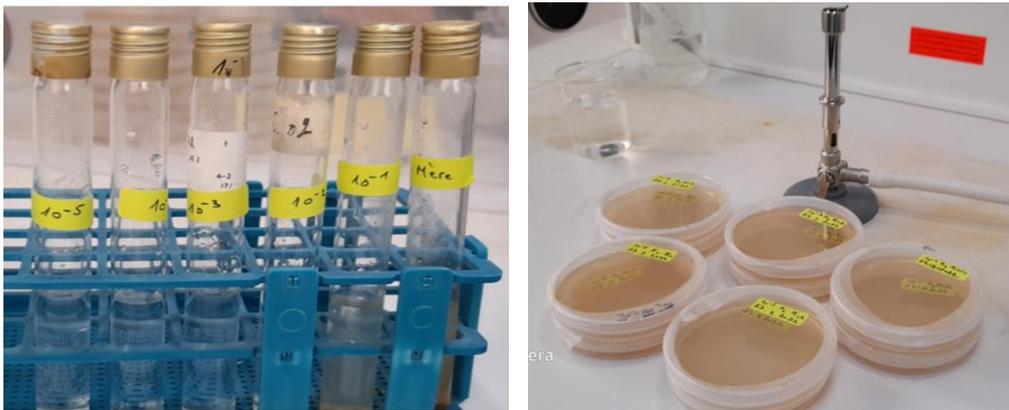
**Figure 03:** Le sol adhérent aux racines de la fève (*Vicia faba* L) (Originale)



**Figure 04:** Image satellite de site d'échantillonnage du sol rhizosphérique (Google Earth, 2022) (Originale)

## 2. Isolement des bactéries à effet PGPR

Les souches faisant l'objet de cette étude ont été isolées à partir du sol rhizosphérique de la fève, le système racinaire de chaque plante a été délicatement secoué afin de prélever le sol adhérent. Un gramme de sol est mis en agitation dans 9 ml d'eau physiologique pendant 30 minutes. A partir de cette suspension mère, des dilutions en cascade de  $10^{-1}$  à  $10^{-5}$  ont été réalisées, 0.1 ml de chaque dilution est étalée sur milieu solide (Gélose Nutritive) (Annexe 01), puis les échantillons sont incubés à  $30^{\circ}\text{C}$  pendant 24h (Figure 5).



**Figure 5:** Isolement des souches à effet PGPR(Originale)

### 2.1. Vérification de la pureté des souches

La purification des souches obtenues après l'isolement a été réalisée par des repiquages successifs sur gélose nutritive (Annexe 01), les boîtes de pétri sont ensuite incubées à  $30^{\circ}\text{C}$  pendant 24-48 heures. L'opération est répétée plusieurs fois afin d'obtenir des souches pures et bien isolées.

#### 2.1.1. Examen macroscopique

L'examen macroscopique consiste à déterminer les caractères morphologiques de colonies, tels que la viscosité, la couleur, la taille, la forme, le contour, et la surface.

#### 2.1.2. Examen microscopique

L'examen microscopique est basé essentiellement sur la coloration de Gram, cette technique a été développée par Hans Christian Gram, (1884), permet de révéler l'affiliation positive ou négative des cellules bactériennes selon la structure de leur paroi, et de déterminer la morphologie des cellules, ainsi que leur mode d'association.

La coloration de gram (Larpent et Larpent, 1990) est réalisée selon la méthode classique en préparant un frottis fixé à la flamme. Les bactéries se colorent en violet de gentiane pendant 1 minute, puis en lugol pendant 1 minute. Une décoloration avec l'alcool est ensuite réalisée pendant 30 secondes jusqu'à la disparition du violet. La lame est recouverte ensuite de fuchsine pendant 1 minute puis rincée à l'eau distillé et séchée. Les lames par la suite, sont observées sous microscope pour déterminer le type de paroi bactérienne ; si les cellules sont colorées en violet (Gram-positives) ou bien en rose (Gram-négative). Pour l'observation microscopique a un grossissement (X 1000), une goutte d'huile d'immersion est ajoutée au-dessus de la lame.

## 2.2. Etude des enzymes respiratoires

### 2.2.1. Recherche de la catalase

La catalase est un test biochimique qui détermine la capacité d'une bactérie à synthétiser l'enzyme bactérienne "la catalase" ; qui décompose le peroxyde d'hydrogène ( $H_2O_2$ ) en eau  $H_2O$  et oxygène  $O_2$



Une goutte de peroxyde d'hydrogène ( $H_2O_2$ ) est mise en contact avec la suspension bactérienne ; le développement des bulles d'oxygène indique que le test catalase est positif, tandis que l'absence de catalase est mise en évidence par un manque ou une faible production de bulles (Lévy et *al.*, 1992).

### 2.2.2. Recherche de l'oxydase

Le test d'oxydase est un test enzymatique, utiliser pour différencier et d'identifier les bactéries Gram négatives, sur la base de la présence de l'enzyme cytochrome oxydase.

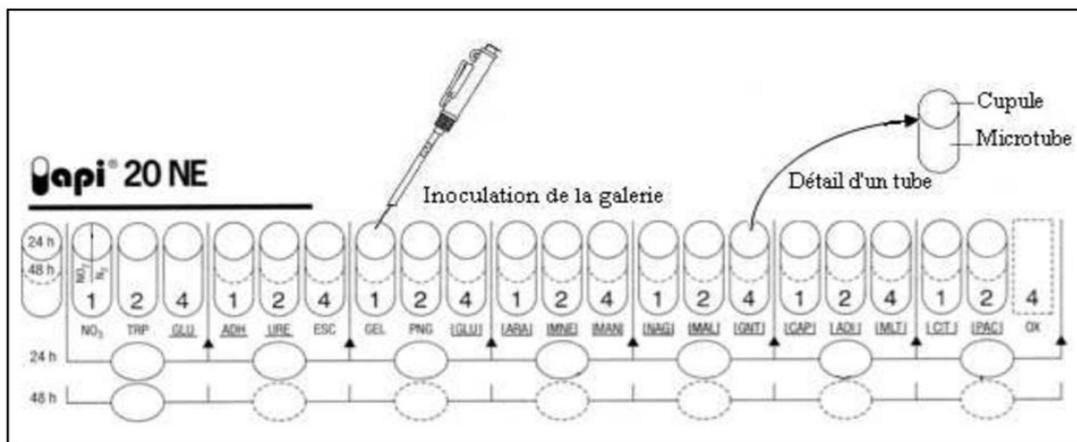
Une colonie bien isolée prélevée est étalée sur le disque imbibé de réactif oxydase ; l'apparition d'une couleur violet indique que le test est positif et que l'isolat possède l'enzyme recherché. Une absence totale de coloration indique que le test est négatif (Kovacs et *al.*, 1995).

## 2.3. Galerie API 20 NE

La galerie API 20 NE est une version miniaturisée et standardisée de tests biochimiques conventionnels pour l'identification des bacilles Gram- non entérobactéries. Selon Sobhani et *al.*,(2000), l'utilisation de ce dispositif permettront de réaliser des tests

spécifiques pour chaque type de bactérie. Ce système combinant 8 tests conventionnels et 12 tests d'assimilation. La galerie est composée de 20 micro-tubes contenant des milieux et substrats sous forme déshydratée (Figure 06).

Les tests conventionnels sont inoculés avec une suspension bactérienne saline (Annexe 02), d'une opacité égale à 0,5 de McFarland (Annexe 03). Les tests d'assimilation sont inoculés avec un milieu minimum (Annexe 04). Les réactions produites durant la période de l'incubation se traduisent par des changements de couleur spontanés ou révélés par l'addition de réactifs. La lecture se fait à l'aide du tableau de lecture (Annexe 05) et l'identification est réalisée à l'aide de catalogue analytique, ou à l'aide du logiciel d'identification (APIWEB™).

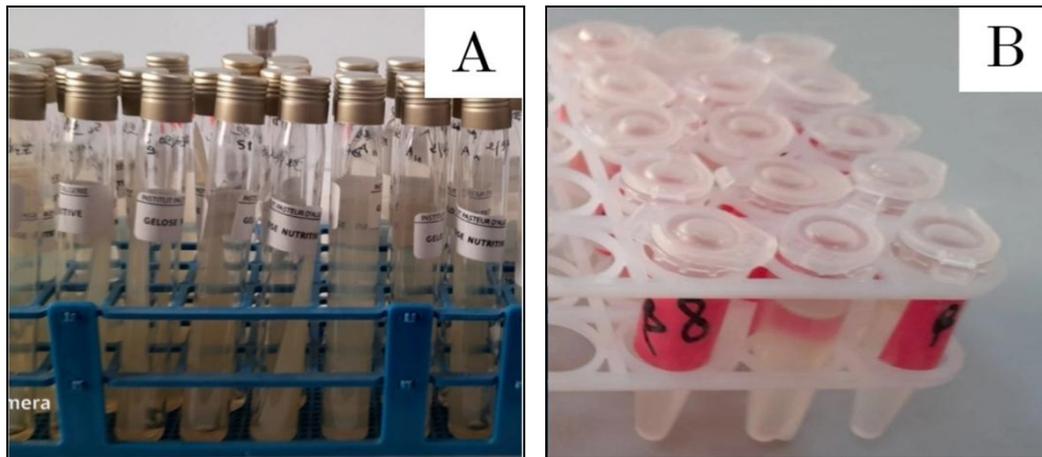


**Figure 06:** Procédure d'inoculation de la galerie API 20 NE (Bourahla, 2013).

#### 2.4. Conservation des souches

Pour une conservation ne dépassant pas une durée de 6 mois, les souches sont repiquées sur gélose inclinée, puis incubées à 30°C pendant 24h. Chaque tube doit être étiqueté, puis conservé au réfrigérateur à 4°C.

Pour une conservation de longue durée (dépassant les 6 mois), les isolats sélectionnés ont été mis en conservation à -20°C dans des éppendorfs contenant 40% de chaque suspension bactérienne cultivée dans un bouillon nutritif (Annexe 06), additionné de 60% de glycérol stérile (Figure 07).



**Figure 07:** La conservation des souches.

A : Courte durée. B : Longue durée. (Originale)

### 3. Effet de l'inoculation des souches à effet PGPR sur le Cresson (*Lepidium sativum*)

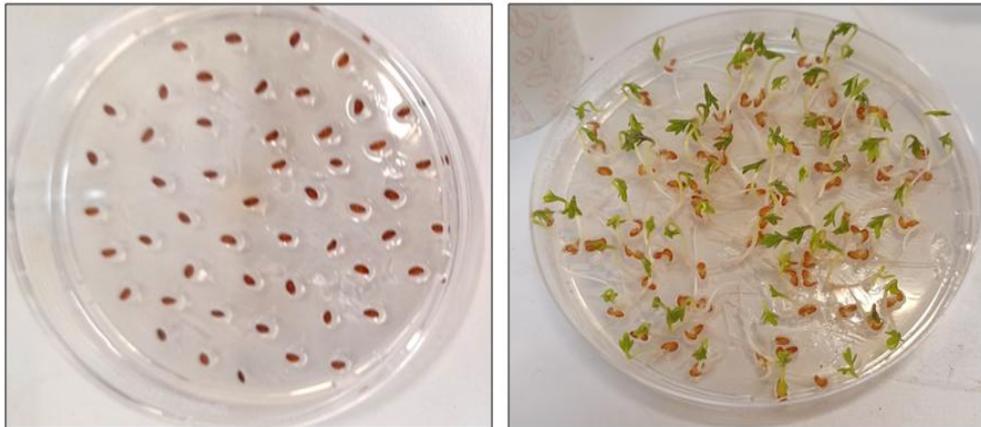
L'expérience a été réalisée dans une chambre de culture (sous des conditions semi contrôlées) au niveau de laboratoire de la faculté de Tissemsilt. Les graines utilisées lors de cette étude sont des graines de cresson (*Lepidium sativum*) commercialisées (Figure 08), leur origine n'a pas pu être établie.



**Figure 08:** Les graines de cresson (*Lepidium sativum*) utilisées dans l'essai (Originale)

### 3.1. Germination des graines

Par définition, la germination comprend les événements qui commencent par l'absorption d'eau par la graine sèche quiescente et se terminent par l'élongation de l'axe embryonnaire (Bewley et Black, 2013). Les graines de cresson (*Lepidium Sativum*) sont premièrement rincées avec l'eau courante, après elles sont immergées dans l'hypochlorite de sodium à 12° pendant 10 minutes, un rinçage successif (6 à 10 fois) a été réalisées avec l'eau distillée stérile afin d'éliminer les traces du désinfectant. Les graines sont transférées aseptiquement et mises à germer dans des boites de pétri contenant de l'eau gélosée (0.8%) (Tillard et Drevon, 1988) (Annexe 07), les boites sont misent à l'obscurité, à une température ambiante (Figure 09).

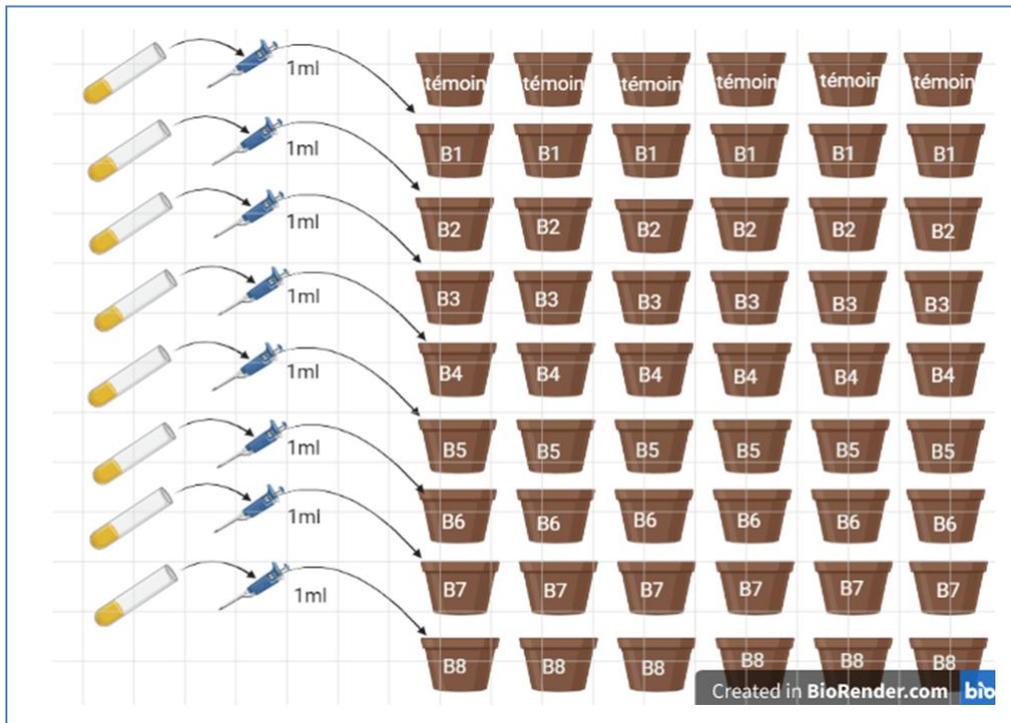


**Figure 09:** Les graines de cresson avant et après la germination dans l'eau gélosée(Originale)

### 3.2. Inoculation des souches à effet PGPR

Les graines germées sont transférées délicatement dans des pots contenant 28g de la tourbe stérilisée (Figure 10). La stérilisation de la tourbe est généralement utilisée pour éliminer ou réduire l'activité des microorganismes dans les études portant sur les inoculations microbiennes (Degrange *et al.*, 1997 ; Luo *et al.*, 2001 ; Liebich *et al.*, 2006). L'inoculation consiste en neuf traitements répétés six fois, y compris : les souches isolées ((B1, B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8), et un témoin sans inoculation. Chaque pot est inoculé par 1ml d'une suspension liquide de chaque souche à une concentration de  $10^8$  (UFC)  $\text{ml}^{-1}$  (Valverde *et al.*, 2006), en comparant la turbidité du milieuensemencé avec celle de MacFarland n°0,5 (Annexe 03). L'arrosage des plantes a été effectué une fois par jours avec l'eau distillée stérile.

Les plantes doivent être déterrées quand des différences très nettes sont visibles entre les plantes, puis l'efficacité des souches est estimée par la comparaison de la longueur racinaire et aérienne, ainsi le poids frais et sec des plantes inoculée avec les témoins non inoculés. Le poids sec est mesuré après séchage des plantes 24 h à 70°C.



**Figure 10:** Dispositif expérimental

### 3.3. Etude statistique

L'analyse statistique a été réalisée en utilisant le logiciel STATISTICA (version 8). Analyse de la variance à un facteur (effet souche sur la croissance – poids frais et sec des plantes, longueur racinaire et aérienne), le seuil de la probabilité utilisé pour déterminer la significativité est  $P \leq 0.05$ .

# **Chapitre III**

## **Résultats et discussion**

## 1. Isolement des bactéries à effet PGPR

Cette étape consiste à isoler des bactéries à effet PGPR et d'évaluer par la suite leur effet sur le développement et la croissance de Cresson (*Lepidium sativum*) *in vitro*. L'isolement des bactéries à partir de sol rhizosphérique de la fève nous a permis d'obtenir une collection de 08 isolats (B1, B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8) (Figure 11).

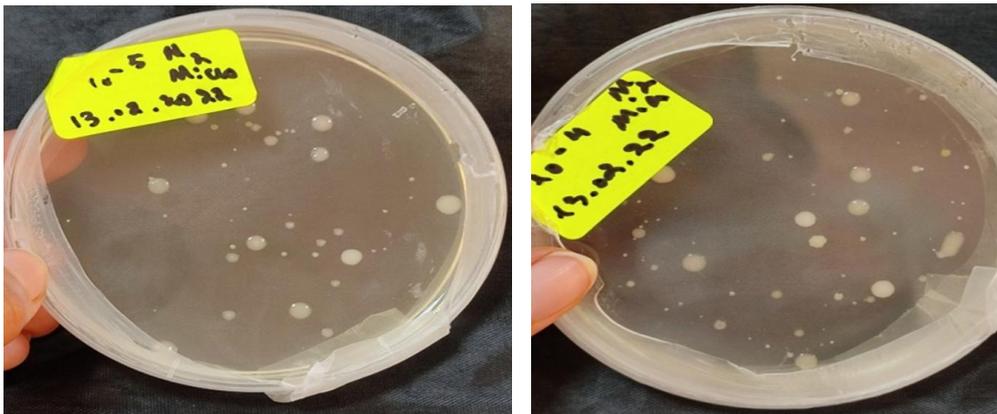


Figure 11 : Isolement des bactéries rhizosphériques(Originale)

### 1.1. Vérification de la pureté des souches

#### 1.1.1. Etude macroscopique

Différents types de colonies sont apparues sur la gélose nutritive, avec des caractéristiques similaires chez quelques-unes et relativement variables chez d'autres, la plupart des colonies étaient rondes de taille, couleur, consistance et relief variés.

Pour la purification, les colonies pigmentées en vert-jaune à été ciblées particulièrement. Après une incubation à 30°C pendant 24 à 48 h, les colonies sont apparues d'une taille petite ou moyenne, de couleur blanche ; crème ; jaune ou vert-jaune, convexe, avec une surface lisse et brillante (Figure 12).

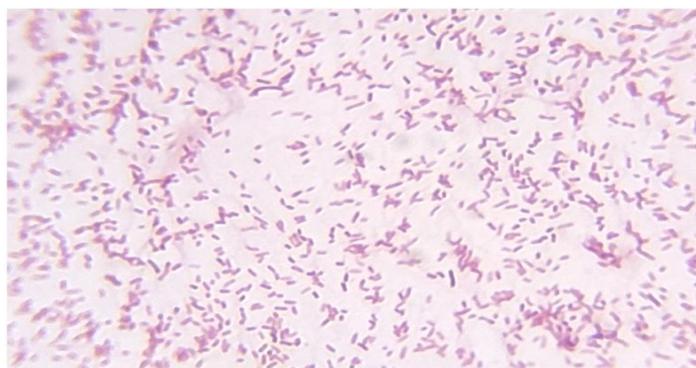


**Figure 12 :** Aspect macroscopique des isolats purifiés sur Gélose Nutritive après 24h d'incubation à 30°C(Originale)

### 1.1.2. Etude microscopique

Après la coloration de Gram, l'observation au microscope photonique a permis d'observer la forme et l'arrangement des isolats et de les classer en deux groupes, des Gram positives et des Gram négatives. Les bactéries Gram+ apparaissent violettes grâce à leur paroi de peptidoglycane épaisse qui forme une barrière imperméable à l'alcool et garde la coloration, alors que les bactéries Gram- apparaissent en rose sous l'action de la fuchsine grâce à la paroi de peptidoglycane fine qui laisse passer l'alcool pour décolorer le cytoplasme en éliminant le violet de gentiane.

Les isolats sélectionnés lors de cette étude sont des bacilles dispersés ou en chaînettes et de couleur rose (Gram-) (Figure 13), ces isolats présentant les caractéristiques macroscopiques et microscopiques des PGPR. Leur caractérisation biochimique est vérifiée par les galeries API 20NE.



**Figure 13 :** Aspect microscopique de la souche B5 après coloration de Gram (Grossissement  $\times 1000$ ) (Originale).

## 1.2. Etude des enzymes respiratoires

### 1.2.1. Test catalase

Les résultats obtenus ont montré que les isolats sélectionnés ayant un catalase positive ; qui se manifeste par le dégagement des bulles d'oxygène immédiatement lorsque la bactérie est exposée au peroxyde d'hydrogène ( $H_2O_2$ ) (Figure 14). Donc les souches sélectionnées possèdent l'enzyme de la catalase qui accélère la décomposition de peroxyde d'hydrogène ( $H_2O_2$ ) en eau ( $H_2O$ ) et en oxygène ( $O_2$ ) (Larpent et Larpent-Gourgaud, 1985).



**Figure 14 :** Mise en évidence de l'activité de la catalase positive (souche B2) (Originale).

### 1.2.2. Test d'oxydase

Les résultats obtenus montrent que les isolats (B1, B2, B3, B5, B6, B7) sont oxydase positif ; une réaction positive est indiquée par un virage de la couleur de disques vers le bleu foncé à violet dans quelques secondes (Figure 15), donc les isolats sélectionnées possèdent l'enzyme respiratoire (cytochrome oxydase) qui oxyde le  $N,N,N',N'$ -Tetramethyl-p-phenylene diamine dihydrochloride (substrat qui prend une coloration violet foncé) (Larpent et Larpent-Gourgaud, 1985). Seules les souches (B4, B8) se sont révélées oxydase négative et ne possèdent pas l'enzyme respiratoire recherchée.



**Figure 15 :** Mise en évidence de l'activité d'oxydase positive (souche B3) (Originale).

## 2. Identification des isolats par galeries API 20NE

La caractérisation biochimique des isolats a été testée en utilisant les galeries API (API 20NE BioMérieux France), et l'identification a été faite grâce à un logiciel d'identification (APIWEB™). Deux souches ont été identifiées comme (*Pseudomonas fluorescens*), deux souches (*Stenotrophomonas maltophilia*), deux souche (*Sphingomonas paucimobilis*), une souche (*Burkholderia cepacia*) et une souche (*Pseudomonas luteola*) (Tableau 03). Ces résultats concordent avec d'autres études dont la majorité des espèces isolées de la rhizosphère sont *P. fluorescens* (Lemanceau *et al.*, 1995), *S. maltophilia* (Dunne *et al.*, 1997) *B. cepacia* (Nacamulli *et al.* , 1997) et *S. luteola* (Laurent *et al.*, 1999) *S. paucimobilis* (Takeuchi *et al.*, 2001).

**Tableau 03** : Les caractéristiques des souches identifiées

	Souches	Couleur	Forme	Aspect	Gram	Test catalase	Test Oxydase
B1	<i>Sphingomonas paucimobilis</i>	Jaune	Circulaire	Lisse	-	-	-
B2	<i>Pseudomonas fluorescens</i>	Beige	Circulaire	Lisse	-	+	+
B3	<i>Burkholderia cepacia</i>	Jaune-verte	Circulaire	Lisse	-	+	+
B4	<i>Pseudomonas luteola</i>	Blanche	Circulaire	Lisse	-	+	-
B5	<i>Pseudomonas fluorescens</i>	Blanche	Circulaire	Lisse	-	+	+
B6	<i>Sphingomonas paucimobilis</i>	Beige	Circulaire	Lisse	-	+	+
B7	<i>Stenotrophomonas maltophilia</i>	Blanche	Circulaire	Lisse	-	+	+
B8	<i>Stenotrophomonas maltophilia</i>	Beige	Circulaire	Lisse	-	+	-

## 3. Effet de l'inoculation des souches à effet PGPR sur le Cresson (*Lepidium sativum*)

Selon Lugtenberg *et al.*, (2001) la colonisation de la rhizosphère d'une plante hôte par les PGPR est un facteur important pour sa croissance ; les PGPR peuvent modifier l'architecture des racines et le développement des plantes par la production de différentes phytohormones comme l'AIA, l'acide gibbérellique et les cytokinines (Kloepper *et al.*, 2007), ainsi ils ont la capacité de solubiliser certains éléments nécessaires aux plantes, tels que le phosphate, le zinc, et le potassium (Borkar, 2015 ; Kumar *et al.*, 2018).

Plusieurs études ont été menées sur l'inoculation des plantes médicinales par les PGPR, et leurs effets positifs sur la physiologie et la nutrition de ce type de plantes (Mamta *et al.*, 2012 ; Ordookhani *et al.*, 2012 ; Zandi *et al.*, 2017).

Une inoculation en pots a été réalisée sous des conditions semi-contrôlées afin d'évaluer l'effet d'un apport d'inoculum de chaque souche testée sur la croissance de cresson (*Lepidium sativum*) (Figure16).



**Figure 16 :** Test d'inoculation des plantes de cresson (*Lepidium sativum*) par les souches isolées(Originale).

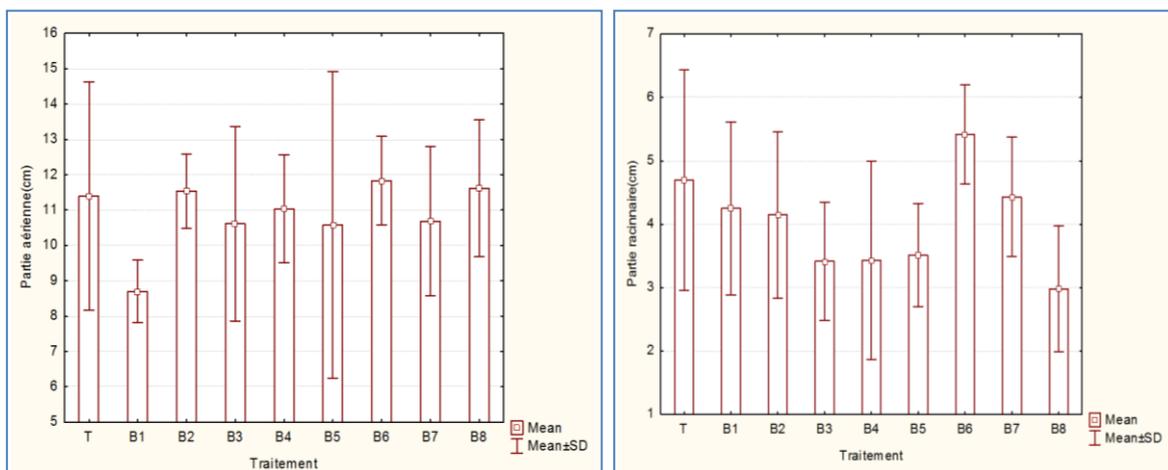
### 3.1. Effet sur la longueur de la partie aérienne et racinaire

Les résultats obtenus après l'inoculation par les PGPR ont révélé que 03/08 souches (*Pseudomonas fluorescens* B2, *Sphingomonas paucimobilis* B6, *Stenotrophomonas maltophilia* B8 ) ont la capacité de stimuler le développement de la partie aérienne de plantes de cresson (*Lepidium sativum*) par rapport aux témoins non inoculés (Figure 17), et l'étude statistique montre que l'effet de souches sur la partie aérienne est significatif ( $P < 0,05$ ) (Annexe 08).

Un effet hautement significatif de l'inoculation par les souches sélectionnées sur la longueur racinaire a été également constaté ( $P < 0,01$ ) (Annexe 08). Ces résultats sont en accord avec Sharghi *et al.*, (2018), qui ont montré que les PGPR (*Pseudomonas fluorescens* et *Rhizobium méniloti*) augmentent d'une façon significative la surface foliaire, et les racines de plantes médicinales.

L'effet le plus remarquable est celui d'une amélioration nette de la croissance de plantes de cresson inoculées par la souche *Sphingomonas paucimobilis* B6 ( $11.83 \pm 1.25$ cm) par rapport aux témoins non inoculés. La performance de cette souche a été également enregistrée lors de mesures de longueur racinaire ( $5.41 \pm 0.78$  cm). D'après Yang *et al.*, (2014)

la souche de *Sphingomonas paucimobilis* favorise de manière significative la croissance de *Dendrobium officinale* (plante médicinale chinoise traditionnelle), avec une augmentation des tiges de 8,6 % après 90 jours d'inoculation ; le mécanisme de promotion de la croissance de la plante par la souche *Sphingomonas paucimobilis* a été déterminé par la fixation d'azote et la sécrétion de phytohormones telles que l'AS (Acide Salicylique), l'AIA (Acide Indole-3-Acétique), la zéatine, et l'AAB (Acide abscissique), ces phytohormones sont responsables à la croissance, la régulation, et la résistance au stress. Takeuchi *et al.*, (1995) ont montré que *Sphingomonas sp.* favorise également l'absorption d'ions minéraux par les plantes, ainsi la production des sidérophores (Sessitsch *et al.*, 2004).



**Figure 17 :** Effet de souches à effet PGPR sur la longueur de la partie aérienne et racinaire de plantes de cresson (*Lepidium sativum*).

### 3.2. Effet sur le poids frais et sec des plantes

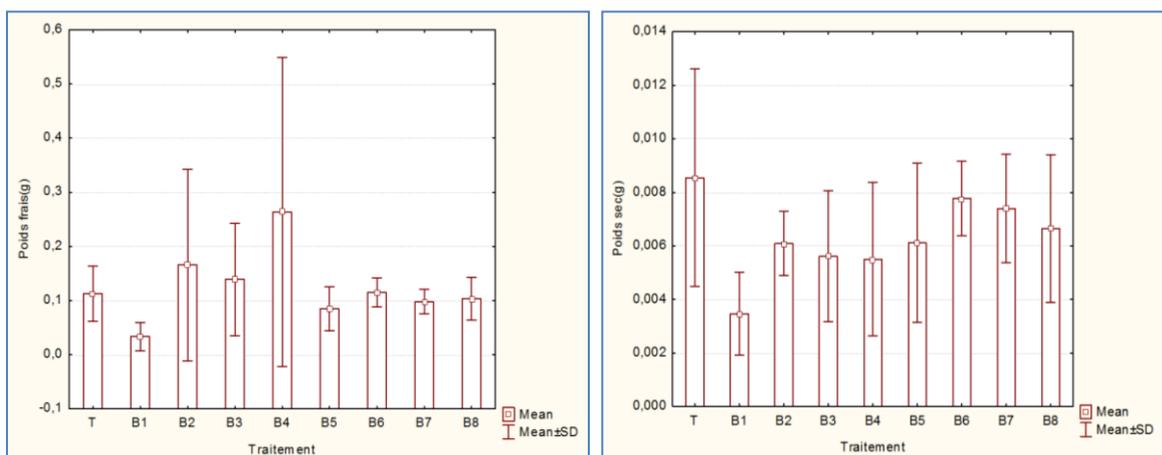
L'inoculation bactérienne a influencé d'une façon hautement significative sur le poids frais de cresson (*Lepidium sativum*) par rapport aux témoins non inoculés ( $P < 0.01$ ) (Annexe 08), et le poids frais le plus élevé est enregistré chez les plantes inoculées par la souche *Pseudomonas luteola* B4 suivi par la souche *Pseudomonas fluorescens* B2 (Figure 18).

Ces résultats sont en accord avec l'étude de Suryadevara et Ponmurugan, (2012) qui ont montré que l'inoculation de la plante médicinale curcuma (*Curcuma longa* L) avec la souche *Pseudomonas* a significativement augmenté le rendement des rhizomes de 21%, la hauteur des plantes de 5% et le poids des rhizomes de 60% par rapport aux témoins non inoculés.

Sharghi *et al.*, (2018) ont montré également que l'inoculation par *P. fluorescens* augmente la biomasse fraîche et sèche de fenugrec cultivée dans des conditions extrêmes. Cette souche a prouvée sa performance également sur la plante médicinale « *Aleo Vera L* » via l'augmentation de nombre, la longueur de feuilles et le poids frais des parties aériennes, ainsi sur l'amélioration de l'absorbance des macronutriments (N, P, K) par la plante inoculée (Khoshbakht *et al.*, 2020).

D'un autre coté, le poids sec des plantes inoculées avec les souches testées est similaire ou inférieur à celle des témoins (Figure 18), néanmoins, l'analyse de variance à un facteur montre que l'effet de souche sur le poids sec est hautement significatif ( $P < 0,01$ ) (Annexe 08). Selon Rizvi *et al.*, (2022), l'application des PGPR montre des effets bénéfiques sur la performance globale des plantes médicinales.

Le poids frais et sec des plantes inoculées par *P. fluorescens* B2, et *Sphingomonas paucimobilis* B6 semble assez faible, ce résultat a été également constaté dans la mesure de la partie aérienne. Ainsi l'inoculation par *Stenotrophomonas maltophilia* (B7 et B8) n'a pas augmentée le poids frais de plantes de cresson lors de cette étude (Figure 18) ; par contre l'étude de Patel et Saraf (2017), montre que *Stenotrophomonas maltophilia* isolée à partir de sol rhizosphérique de la plante médicinale de "*coleus forskohlii*", confirme leur potentiel dans l'amélioration de croissance des plantes en raison de leur aptitude à produire une quantité considérable de sidérophores, d'AIA et de HCN. Elle est également considérée comme une souche solubilisatrice du phosphate (BSP) (deFreitas *et al.*, 1997).



**Figure 18:** Effet de souches a effet PGPR sur le poids frais et sec de plantes de cresson (*Lepidium sativum*).

# **Conclusion**

## Conclusion et perspectives

---

Dans le cadre des études menées sur les PGPR, les biologistes s'intéressent toujours à leur effet sur la nodulation et la croissance des légumineuses. Lors de cette étude l'attention a été portée sur l'application des PGPR et leurs effets bénéfiques sur la performance globale des plantes médicinales en raison de leurs propriétés nutritives et thérapeutiques.

Un essai comparatif a été réalisé sous des conditions semi contrôlées sur le Cresson (*Lepidium sativum*) inoculé par des souches à effet PGPR isolées à partir de la rhizosphère de la fève (*Vicia faba* L). Ce test nous permet de sélectionner l'inoculum le plus performant, et de prouver l'appartenance des isolats obtenus groupe de rhizobactéries stimulatrices de la croissance de plantes.

Huit souches à effet PGPR ont été isolées et soumises à une identification préliminaire par des examens macroscopiques, microscopiques et biochimiques par les galeries API 20NE dont deux souches ont été identifiées comme (*Pseudomonas fluorescens*), deux souches (*Stenotrophonas maltophilia*), deux souches (*Sphingomonas paucimobilis*), une souche (*Bulkholderia cepacia*), et une souche (*Pseudomonas luteola*).

L'effet de l'inoculation sur le développement des plantes de cresson (*Lepidium sativum*) varie en fonction des souches testées. Les résultats obtenus ont révélé que dans la majorité des cas, l'inoculation a amélioré favorablement la longueur de la partie aérienne, racinaire, et le poids frais et sec des plantes par rapport aux témoins non inoculés. Statistiquement cette réponse montre que l'effet des souches est hautement significatif ( $P < 0,01$ ), et l'effet le plus remarquable a été enregistré chez les plantes inoculées par la souche *Sphingomonas paucimobilis* B6 lors de mesure de la longueur aérienne et racinaire ; et les souches *Pseudomonas luteola* B4 et *Pseudomonas fluorescens* B2 lors de la pesée de poids frais.

Au terme de ce travail qui ouvre plusieurs perspectives de recherches, il serait intéressant d'approfondir les investigations en testant les activités PGPR et les dosages des molécules bioactives de cresson avant et après l'inoculation par des bactéries à effet PGPR. En outre, le succès de l'inoculation de ces souches dépend de leur compétitivité par rapport à la population native présente dans le sol indigène, à ce propos, l'efficacité des souches mérite d'être analysée sur champ.

**Références**  
**Bibliographiques**

- Alemu F.** 2016. Isolation of *Pseudomonas fluorescens* from rhizosphere of faba bean and screen their hydrogen cyanide production under in vitro study, Ethiopia. *Am J Life Sci*, 4(2).pp 13-19.
- Ali B., Sabri A N., Hassnain S.** 2010. Rhizobacterial potential to alter auxin content and growth of *Vigna radiata* (L.). *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 26: 1379-1384.
- Almeida H J., Pancelli M A., Prado R M., Cavalcante V S., Cruz F J R.** 2015. Effect of potassium on nutritional status and productivity of peanuts in succession with sugar cane. *Journal of soil science and plant nutrition*, 15(1).pp1-10.
- Al-Yahya M A., Mossa JS., Ageel A M., Rafatullah S.** 1994. Pharmacological and safety evaluation studies on *Lepidium sativum* L., Seeds. *Phytomedicine*, vol 1(2).pp 155–159.
- Amalraj A., Pius A., Gopi S., Gopi S.** 2017. Biological Activities of Curcuminoids, Other Biomolecules from Turmeric and Their Derivatives—A Review. *J. Tradit. Complement. Med*, Vol 7:205–233.
- Antoun H., Kloepper J W.,** 2001. Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR). In: Brenner S., Miller J H., Eds., *Encyclopedia of Genetics*. Academic Press. New York. pp1477-1480.
- APG III.** 2009. An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG III. *Botanical Journal of the Linnean Society* ,Vol 161. pp 105–121
- Aqafarini A., Lotfi M., Norouzi M., Karimzadeh G.** 2019. Induction of tetraploidy in garden cress: morphological and cytological changes. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, vol 137(3).pp 627–635.
- Arkhipova T N., Veselov S U., Melentiev A I., Martynenko E V., Kudoyarova G R.** 2005. Ability of bacterium *Bacillus subtilis* to produce cytokinins and to influence the growth and endogenous hormone content of lettuce plants. *Plant and Soil*, 272(1).pp 201-209.
- Arkroyd WR., Gopalan C., Balasubramanian SC.** 1960. Nutritive Value of Indian Foods and the Planning of Satisfactory Diets. New Delhi: Indian Council of Medical Research. p. 64.
- Arora N K., Tewari S., Singh S., Lal N., Maheshwari D K.** 2012. PGPR for protection of plant health under saline conditions. *Bacteria in agrobiolgy: stress management*.pp 239-258.
- Arshad M ., Frankenberger W T.** 1993. Microbial production of plant growth regulators. *Marcel Dekker*. pp307–347.

## Références bibliographiques

---

- Ashrafuzzaman M., Hossen F A., Ismail, M R., Hoque A., Islam M Z., Shahidullah S M., Meon S.** 2009. Efficiency of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) for the enhancement of rice growth. *African Journal of Biotechnology*, 8(7).
- Askeland R A., Morrison S M.** 1983. Cyanide production by *Pseudomonas fluorescens* and *Pseudomonas aeruginosa*. *Applied and Environmental Microbiology*, 45(6).pp1802-1807.
- Awasthi R., Tewari R., Nayyar H.** 2011. Synergy between plants and P-solubilizing microbes in soils: effects on growth and physiology of crops. *International Research Journal of Microbiology*, 2(12).pp 484-503.
- Baba Aissa F.** 2011. Encyclopédie des plantes utiles, flore méditerranéenne ‘Maghreb, Europe méridionale’ substances végétales d’Afrique, d’Orient et d’Occident. Ed- Elmaarifa, Algérie,pp :124, 125.
- Bafana A., Lohiya R.** 2013. Diversity and metabolic potential of culturable root-associated bacteria from *Origanum vulgare* in sub-Himalayan region. *World J Microbiol Biotechnol* ,Vol 29.pp 63–74.
- Bais H P., Prithviraj B., Jha A K., Ausubel F M., Vivanco, J M.** 2005. Mediation of pathogen resistance by exudation of antimicrobials from roots. *Nature*, 434(7030).pp217-221.
- Bakker A W., Schippers B O B.** 1987. Microbial cyanide production in the rhizosphere in relation to potato yield reduction and *Pseudomonas* spp-mediated plant growth-stimulation. *Soil Biology and Biochemistry*, 19(4).pp 451-457.
- Balajee S., Mahadevan A.** 1990. Utilization of chloroaromatic substances by *Azotobacter chroococcum*. *Journal of Systematic and Applied Microbiology*, Vol 13.pp 194-198.
- Bashan Y., Holguin G., de-Bashan L E.** 2004. *Azospirillum*-plant relationships: physiological, molecular, agricultural, and environmental advances (1997–2003). *Canadian Journal of Microbiology*, vol. 50(8). pp 521–577.
- Baya A M., Boethling R S., Ramos-Cormenzana A.** 1981. Vitamin production in relation to phosphate solubilization by soil bacteria. *Soil Biology and Biochemistry*, 13(6).pp527-531.
- Bazot S.,** 2005, *Contribution à l'étude de l'allocation des photoassimilats récents dans la plante et la rhizosphère chez une graminée pérenne (Lolium perenne L.)*. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Lorraine.176p.
- Belot A.** 1954. Culture Potagère Moderne. Libraire J.B Baillié et fils. 214 p.
- Benderradji L., Bounar R., Ghadbane M., Rebbas Kh.** 2021. Etude ethnobotanique comparative et utilisation thérapeutique de plantes médicinales de djebel djedoug (Hammam

## Références bibliographiques

---

Dhalaa) et du milieu oasien (oasis de Boussaâda). *Journal of oasis agriculture and sustainable development*, 3(1): 1-12.

**Bent E.** 2006. Induced systemic resistance mediated by plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) and fungi (PGPF). *Multigenic and induced systemic resistance in plants* .pp225-258.

**Bewley, J D., Black M.** 2013. Seeds: physiology of development and germination. Springer Science & Business Media.445 p.

**Bhaswati L., Rekha R.** 2020. Garden Cress Seeds: chemistry, medicinal properties, application in dairy and food industry. *Emergent Life Sciences Research*,Vol 6(2).pp 1-4.

**Bhattacharyya P N., Jha D K.** 2012. Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): emergence in agriculture. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 28(4). pp 1327-1350.

**Bigoniya P., Shukla A.** 2014. Phytopharmacological screening of *Lepidium sativum* seeds total alkaloid: Hepatoprotective, antidiabetic and in vitro antioxidant activity along with identification by LC/MS/MS. *PharmaNutrition* 2(3):90.

**Bøckman O C.** 1997. Fertilizers and biological nitrogen fixation as sources of plant nutrients: perspectives for future agriculture. *Plant and Soil*, 194(1).pp11-14.

**Borkar S G.,** *Microbes as Bio-Fertilizers and Their Production Technology*, 1st ed.; WPI Publishing: New York, NY, USA, 2015.

**Bottini R., Cassán F., Piccoli P.** 2004. Gibberellin production by bacteria and its involvement in plant growth promotion and yield increase. *Applied microbiology and biotechnology*, 65(5).pp 497-503.

**Bouurahla M.** 2013. Etude de l'influence d'une bactérie PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria) sur l'action d'un herbicide « le norflurazon » appliqué à des plantules de blé . Mémoire, Université des Sciences et de Technologie Houari Boumediene, Alger.133p.

**Božić D., Jovanović L., Raičević V., Pavlović D., Sarić-Krsmanović M., Vrbničanin S.** 2014. The Effect of Plant Growth Promoting Rhizobacteria on *Datura Stramonium* L., *Abutilon Theophrasti* Med., *Onopordon Acanthium* L. and *Verbascum Thapsus* L. Seed Germination. *Pestic. I Fitomed*,Vol 29:205–212.

**Bürgmann H., Widmer F., Von Sigler W., Zeyer J.**2004. New molecular screening tools for analysis of free-living diazotrophs in soil. *Applied and environmental microbiology*, 70(1).pp 240-247.

## Références bibliographiques

---

**Cartieaux F., Thibaud M C., Zimmerli L ., Lessard P., Sarrobert C., David P., Nussaume L.** 2003. Transcriptome analysis of Arabidopsis colonized by a plant-growth promoting *rhizobacterium* reveals a general effect on disease resistance. *The Plant Journal*, 36(2).pp177-188.

**Cavaglieri L., Orlando J., Etcheverry M.** 2005. In vitro influence of bacterial mixtures on *Fusarium verticillioides* growth and fumonisin B1 production: Effect of seeds treatment on maize root colonization. *Lett Appl Microbiol*, 41(5). pp 390–6.

**Cecílio Filho A B., Feltrim A L., Mendoza Cortez J W., Gonsalves M V., Pavani L C., Barbosa, J C.** 2015. Nitrogen and potassium application by fertigation at different watermelon planting densities. *Journal of soil science and plant nutrition*, 15(4).pp928-937.

**Chakrabartty I., Kalita N K., Boruah P., Katiyar V., Hakeem K R., Rangan L.** 2020. Physico-Rheological Characterization of Organically Derived Seed Samples from *Alpinia Nigra* (Gaertn.) BL Burt, an Ethnic Medicinal Plant of Northeast India. *Ind. Crops Prod*, Vol 152:112560.

**Chen J.** 2006. The combined use of chemical and organic fertilizers and/or biofertilizer for crop growth and soil fertility. *International workshop on Sustained Management of the Soil–Rhizosphere System for Efficient Crop Production and Fertilizer Use*, Thailand.p 1–10.

**Chen S L., Yu H., Luo H. M., Wu Q., Li C F., Steinmetz A.** 2016. Conservation and sustainable use of medicinal plants: problems, progress, and prospects. *Chinese medicine*, 11(1).pp1-10.

**Chen Y P., Rekha P D., Arun A B., Shen F T., Lai W A., Young C C.** 2006. Phosphate solubilizing bacteria from subtropical soil and their tricalcium phosphate solubilizing abilities. *Applied soil ecology*, 34(1).pp 33-41.

**David H., McNear J R.** 2013. The rhizosphere - roots. Soil and everything in between. *Nature education knowledge*, 4 (3).pp 1.

**Davies P J.** 2004. Plant hormones: biosynthesis, signal transduction, action. *Springer Science & Business Media*.

## Références bibliographiques

---

- deFreitas J R., Banerjee M R., Germida J J.** 1997. "Phosphate solubilizing rhizobacteria enhance the growth and yield but not phosphorus uptake of Canola (*Brassica napus* L.)", *Biol. Fert. Soils* .24,pp358–364.
- Degrange V., Lensi R., Bardin R.** 1997. Activity, size and structure of a *Nitrobacter* community as affected by organic carbon and nitrite in sterile soil. *FEMS Microbiol. Ecol*, Vol 24, pp 173–180.
- Dilantha Fernando W G., Nakkeeran S., Zhang Y.** 2005. Biosynthesis of antibiotics by PGPR and its relation in plant control of diseases. *Biocontrol and Biofertilization*, *springer*. pp 67–109.
- Dimkpa C O., Merten D., Svatoš A., Büchel G., Kothe E.** 2009. Siderophores mediate reduced and increased uptake of cadmium by *Streptomyces tendae* F4 and sunflower (*Helianthus annuus*), respectively. *Journal of Applied Microbiology*, 107(5), pp1687-1696.
- Divekar VB., Kalaskar MG., Chougule PD., Redasani VK., Baheti DG.** 2010. Isolation and characterization of mucilage from *Lepidium sativum* Linn. Seeds. *Int J Pharm Res Dev*, Vol 2, pp1-5.
- Diwakar B T., Dutta P k., Lokash B R., Naidu K A.** 2010. Physicochemical properties of garden cress (*Lepidium Sativum*) seed oil. *J. Am. Oil Chem. Soc.*, Vol 87, pp 539-548.
- Dunne C, Crowley J J, Moënne-Loccoz Y, Dowling D N, de Bruijn F J, O’Gara F.** 1997. Biological control of *Pythium ultimum* by *Stenotrophomonas maltophilia* W81 mediated by an extracellular proteolytic activity. *Microbiology*. 143, pp 3921–3931.
- Eberhard T., Robert A., Annelise L.** 2005. Plantes aromatiques (épices, aromates, condiments et huiles essentielles. Edition Lavoisier, Paris, pp : 204, 205, 206.
- Falana H., Nofal W., Nakhleh H.** 2014. *Lepidium Sativum* (Garden cress). *Journal of Ethnopharmacology*. pp 1-8.
- Fan B., Wang C., Song X., Ding X., Wu L., Wu H., Gao X., Borriss R.** 2018. *Bacillus velezensis* FZB42 in 2018: The Gram-positive model strain for plant growth promotion and biocontrol. *Frontiers in Microbiology*, Vol 9(2491), pp1-14.
- Fournier P V.** 2010. Dictionnaire des plantes médicinales et vénéneuses de France. Edition Omnibus, France, pp : 731 – 732.
- Gahlot R., Naurla N.** 1996. Degradation of 2,4-dichlorophenoxy acetic acid by resistant strains of *Azotobacter chroococcum*. *Indian Journal of Microbiology*, Vol 36. pp 141-143.

## Références bibliographiques

---

- Gallegos-Cedillo V M., Urrestarazu M., Álvaro J E.** 2016. Influence of salinity on transport of Nitrates and Potassium by means of the xylem sap content between roots and shoots in young tomato plants. *Journal of soil science and plant nutrition*, 16(4) .pp 991-998.
- Garcia Salamone I E D., Hynes R K., Nelson L M.** 2005. Role of cytokinins in plant growth promotion by rhizosphere bacteria. *PGPR: biocontrol and biofertilization*.pp173-195.
- Garcia Salamone I E D.,Hynes R K., Nelson L M.** 2005. Role of cytokinins in plant growth promotion by rhizosphere bacteria. *PGPR: biocontrol and biofertilization*, 173-195.
- Gill V., Macleod J.** 1980. Studies on Glucosinolate degradation in *Lepidium Sativum* seed extracts. *phytochemistry*, Vol 19(7).pp 1369-1374.
- Glick B R., Cheng Z., Czarny J., Duan J.** 2007. Promotion of plant growth by ACC deaminase-producing soil bacteria. *New perspectives and approaches in plant growth-promoting Rhizobacteria research*.pp329-339.
- Glick B R., Holguin G., Patten C L., Penrose, D M.** 1999. Biochemical and genetic mechanisms used by plant growth promoting bacteria. Imperial College Press. London.
- Gobat J M., Aragno M., Matthey W.** 2010. *Le sol vivant: bases de pédologie, biologie des sols* (Vol. 14). *PPUR Presses polytechniques*.
- Gokavi SS.,Malleshi N G.,Guo M.** 2004. Chemical composition of garden cress (*Lepidium sativum*) seeds and its fractions and use of bran as a functional ingredient. *Plant Foods Hum. Nutr*,Vol 59.pp 105-111.
- Goswami D., Thakker J N., Dhandhukia P C.** 2016. Portraying mechanics of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): a review. *Cogent Food et Agric* 2:1127500.
- Graham P H .** 1988. Principles and Application of Soil Microbiology.pp 322–345.
- Gray E J., Smith D L.** 2005. Intracellular and extracellular PGPR: commonalities and distinctions in the plant–bacterium signaling processes. *Soil biology and biochemistry*, 37(3). pp395-412.
- Grubben G J H., Denton O A., Messiaen C-M., Schippers R R., Lemmens R H M J., Oyen L PA., Chauvet M., Siemonsma J S.** 2004. Ressources végétales de l'Afrique tropicale 2 Légumes. Fondation PROTA. Wageningen,Pays-Bas.736p.
- Guerinot M L.** 1994. Microbial iron transport. *Annual review of microbiology*, 48.pp 743-773.
- Gupta G., Parihar S S., Ahirwar N K., Snehi S K., Singh V.** 2015. Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): current and future prospects for development of sustainable agriculture. *J Microb Biochem Technol*, 7(2).pp 096-102.

## Références bibliographiques

---

**Haghighi B J., Alizadeh O., Firoozabadi A H.** 2011. The role of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) in sustainable agriculture. *Advances in Environmental Biology*, 5(10).pp 3079-3083.

**Handelsman J., Stabb E V.** 1996. Biocontrol of soil borne plant pathogens. *The plant cell*, 8(10).pp 1855.

**Hardisson C., Sala-Trepas J M., Stainer RY .** 1969. Pathways for the oxidation of aromatic compounds by *Azotobacter* . *Journal of General Microbiology*, Vol 59.ppp 1-11.

**Hassan LG., Hassan SW., Hasim T., Umar KJ., Sani NA.** 2011. Determination of nutritive values of Garden cress leaves. *Bayero J Pure Appl Sci*, Vol 4.ppp 18-23.

**Hoffland E., Halilinen J., Van Pelt JA.** 1996. Comparison of systemic resistance induced by avirulent and non pathogenic *Pseudomonas* species, *Phytopathology*, 86.ppp 757-762.

**Holt J G.** 1994. *Bergey's Manual of Determinate Bacteriology*. 9th Edition, Lippincott Williams and Wilkins, Baltimore.

**Hussain Z., Khattak R A., Irshad M., Mahmood Q., An P.** 2016. Effect of saline irrigation water on the leachability of salts, growth and chemical composition of wheat (*Triticum aestivum* L.) in saline-sodic soil supplemented with phosphorus and potassium. *Journal of soil science and plant nutrition*, 16(3).pp 604-620.

**Hussein H J., Hameed H I., Hadi M Y.,** 2017. Using gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) technique for analysis of bioactive compounds of methanolic leaves extract of *Lepidium sativum*. *Research Journal of Pharmacy and Technology*, vol 10(11).pp 3981–3989.

**Illmer P., Schinner F.** 1995. Solubilization of inorganic calcium phosphates-solubilization mechanisms. *Soil Biology and Biochemistry*, 27(3) .pp 257-263.

**Jain T., Grover K., Grewal I.** 2016. Development and Sensory Evaluation of Ready To Eat Supplementary Food Using Garden Cress (*Lepidium sativum*) Seeds. *Journal of Applied and Natural Science* , Vol 8(3).pp 1501 – 1506.

**Jansen P C M.** 2002. The Prosea Programme (Plant Resources of South-East Asia). *Flora Malesiana Bulletin*, V 13(2).pp 137-142.

**Joo G J., Kang S M., Hamayun M., Kim S K., Na C I., Shin D H., Lee I J.** 2009. Burkholderia sp. KCTC 11096BP as a newly isolated gibberellin producing bacterium. *The Journal of Microbiology*, 47(2).pp 167-171.

**Kadam P V., Yadav K Y., Shivatar R S., Narappanawar N S., Pande A S ., Pati M J.** 2012. *Lepidium sativum*: an ethnobotany and phytopharmacological. *International Journal of Drug Formulation and Research*, Vol 3(2).pp 27-38.

**Kaddem S E.** 1990. Les plantes médicinales en Algérie. Oued Zenati. 181p.

## Références bibliographiques

---

- Kayser F H., Bienz K A., Eckert J., Zingernagel RM.** 2001. Medical Microbiology (10th ed.). Stuttgart, Germany : Georg Thieme Verlag.
- Khalid A., Arshad M., Zahir Z A.** 2004. Screening plant growth-promoting rhizobacteria for improving growth and yield of wheat. *Journal of Applied Microbiology*, 96(3).pp 473-480.
- Khan M S., Zaidi A., Wani P A., Oves M.** 2009. Role of plant growth promoting rhizobacteria in the remediation of metal contaminated soils. *Environmental chemistry letters*, 7(1).pp 1-19
- Khoshbakht T., Bahadori F., M.K. Kianian.** 2020. Bio-fertilizers Efficiency on Physiological Growth and Yield of Aloe vera L. in arid lands of Iran. *East African Scholars Journal of Agriculture and Life Sciences*. Vol 3(7),pp 223-238.
- Kim J., Rees D C.** 1994. Nitrogenase and biological nitrogen fixation. *Biochemistry*, 33(2) .pp389-397.
- Kim S D., Fuente L D L., Weller D M., Thomashow L S.** 2012. Colonizing ability of *Pseudomonas fluorescens* 2112, among collections of 2, 4-diacetylphloroglucinol-producing *Pseudomonas fluorescens* spp. in pea rhizosphere. *Journal of microbiology and biotechnology*, 22(6).pp 763-770.
- Kizilkaya R.** 2009. Nitrogen fixation capacity of *Azotobacter* spp. Strains isolated from soils in different ecosystems and relationship between them and the microbiological properties of soils. *J Environ Biol*, Vol 30(1).pp 73–82.
- Kloepper J W., Leong J., Teinze M., Schroth M N.** 1980. Enhanced plant growth by siderophores produced by plant growth-promoting rhizobacteria. *Nature*, Vol 286.ppp 885-886.
- Kloepper J W., Tuzun S., Liu L., Wei G.** 1993. Plant growth-promoting rhizobacteria as inducers of systemic disease resistance. *Pest management: biologically based technologies*. American Chemical Society Books, Washington, DC. pp156-165.
- Kloepper JW., Gutierrez-Estrada A., McInroy JA.** 2007. Photoperiod regulates elicitation of growth promotion but not induced resistance by plant growth-promoting rhizobacteria. *Can J Microbiol* .53,pp159–167.
- Korat K., Dave B P., Dube H C.** 2001. Detection and chemical characterization of siderophores produced by certain fungi. *Indian Journal of Microbiology*, 41(2).pp 87-92.
- Kovacs L G., Ballati P A., Kroshman H B., Pueppke S G.** 1995. Transcriptional organisation and expression of nol XWBTUV.A Locus that regulate cultivar-specific nodulation soybean by *Rhizobium fredii* USDA 257. *Molecular Microbiology*, Vol 17.ppp 923-933.

## Références bibliographiques

---

- Kuffner M., Puschenreiter M., Wieshammer G., Gorfer M., Sessitsch A.** 2008. Rhizosphere bacteria affect growth and metal uptake of heavy metal accumulating willows. *Plant and Soil*, 304(1).pp 35-44.
- Kumar A., Singh R., Giri D.D., Singh P.K., Pandey K.D.** 2014. Effect of Azotobacter Chroococcum CL13 Inoculation on Growth and Curcumin Content of Turmeric (*Curcuma Longa* L.) .*Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci*,Vol 3.pp 275–283.
- Kumar S M.,Reddy C G.,Phogat M.,Korav S.**2018. Role of bio-fertilizers towards sustainable agricultural development: A review. *J. Pharm. Phytochem.*7,pp1915–1921.
- Lange D.** 1998. Europe's medicinal and aromatic plants: their use, trade and conservation.
- Lanteigne C., Gadkar V J., Wallon T., Novinscak A., Filion M.** 2012. Production of DAPG and HCN by Pseudomonas sp. LBUM300 contributes to the biological control of bacterial canker of tomato. *Phytopathology*, 102(10) .pp 967-973.
- Larpent J P., Larpent-Gourgaud M.** 1985. Manuel pratique de microbiologie. Ed Hatmann, France, 230p .
- Larpent J P., Larpent M G.** 1990. Mémento technique de Microbiologie. Technique et documentation-Lavoisier. 417p.
- Laurent P., Buchon L., Guespin-Michel L.,Orange N.**1999. Production of pectate lyases and cellulases by Chryseomonas luteola strain MFCL0 depends on the growth temperature and the nature of the culture media.*Appl. Environ. Microbiol.*66,pp 1538–1543.
- le page.R.,Meudoc.G.,**2002.L'abc du Potager.Rustica,Paris.239p
- Lemanceau P., Corberand T., Gardan L., Latour X., Laguerre G., Boefugras J M., Alabouvette C.**1995.Effect of two plant species, flax (*Linum usitatissimum* L.) and tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.), on the diversity of soilborne populations of fluorescent pseudomonads. *Appl. Environ. Microbiol.* 61,pp1004–1012.
- Lenart A.** 2012. Occurance Characteristics and Genetic Diversity of *Azotobacter chroococcum* in Various Soils of Southern Poland. *Pol J Environ Stud*,Vol 21(2).pp 415–424.
- Leong J.** 1986. Siderophores: their biochemistry and possible role in the biocontrol of plant pathogens. *Annual review of Phytopathology*, 24(1).pp187-209.
- Lévy E., Eyal Z., Chet I., Hochman A.** 1992. Resistance mechanisms of *Septoria tritici* to antifungal products of *Pseudomonas*. *Physiological and molecular plant pathology*,Vol 40(3).pp163-71.
- Liebich J., Vereecken H., Burauel P.** 2006. Microbial community changes during humification of 14 C-labelled maize straw in heat-treated and native Orthic Luvisol. *European journal of soil science*,Vol 57.pp 446–455

- Lobo C B., Tomás M S J., Viruel E., Ferrero M A., Lucca M E.** 2019. Development of Low-Cost Formulations of Plant Growth-Promoting Bacteria to Be Used as Inoculants in Beneficial Agricultural Technologies. *Microbiol. Res*, Vol 219, pp 12–25.
- Lucy M., Reed E., Glick B R.** 2004. Applications of free living plant growth-promoting rhizobacteria. *Antonie van Leeuwenhoek*, Vol 86. pp1–25.
- Lugtenberg B., Kamilova F.** 2009. Plant-growth-promoting rhizobacteria. *Annual review of microbiology*, 63(1), pp541-556.
- Lugtenberg B.J., Dekkers L., Bloemberg G.V.** 2001. Molecular determinants of rhizosphere colonization by *Pseudomonas*. *Annu Rev Phytopathol* .39, pp 461–490.
- Luo Y M., Yan W D., Christie P.** 2001. Soil solution dynamics of Cu and Zn in a Cu- and Zn-polluted soil as influenced by  $\gamma$ -irradiation and Cu-Zn interaction. *Chemosphere* ,Vol 42, pp 179–184.
- Lynch J M.** 1990. éditeur. The Rhizosphere. Chichester. Royaume-Uni: Wiley - Interscience
- MacMillan J.** 2001. Occurrence of gibberellins in vascular plants, fungi, and bacteria. *Journal of plant growth regulation*, 20(4), pp 387-442.
- Mamta G., Rahi P., Pathania V., Gulati A., Singh B., Bhanwra R.K., Tewari R.** 2012. Comparative Efficiency of Phosphate-Solubilizing Bacteria under Greenhouse Conditions for Promoting Growth and Aloin-A Content of *Aloe Barbadensis*. *Arch. Agron. Soil Sci.* 58, pp 437–449.
- Mathews S., Singhal R.S., Kulkarni P.R.** 1993. Some physicochemical characteristics of *Lepidium sativum* (haliv) seeds. *Food/Nahrung* ,Vol 37(1), pp 69-71.
- Maurice M. Iwu.** 2014. Handbook of African medicinal plant. 2<sup>nd</sup> edition. Abuja, Nigeria. 414p.
- Meena V S., Maurya B R., Bahadur I.** 2014. Potassium solubilization by bacterial strain in waste mica. *Bangladesh Journal of Botany*, 43(2), pp235-237.
- Meena V S., Maurya B R., Verma J P., Meena R S.** 2016. *Potassium solubilizing microorganisms for sustainable agriculture* (Vol. 331). New Delhi: Springer.
- Meena V S., Maurya B R., Verma J P.** 2014. Does a rhizospheric microorganism enhance K<sup>+</sup> availability in agricultural soils?. *Microbiological research*, 169(5-6), pp337-347.
- Miller S H., Browne P., Prigent-Combaret C., Combes-Meynet E., Morrissey J P., O'Gara F.** 2010. Biochemical and genomic comparison of inorganic phosphate solubilization in *Pseudomonas* species. *Environmental microbiology reports*, 2(3), pp 403-411.
- Mitter N., Srivastava A C., Ahamad S., Sarbhoy A K., Agarwal D K.** 2002. Characterization of gibberellin producing strains of *Fusarium moniliforme* based on DNA polymorphism. *Mycopathologia*, 153(4), pp187-193.

## Références bibliographiques

---

- Moreno J., Vargas-García C., López MJ., Sánchez-Serrano E.** 1999. Growth and exopolysaccharide production by *Azotobacter vinelandii* in soil phenolic compounds. *Journal of Applied Microbiology*, Vol 86. pp 439-445.
- Moser B R., Shah S N., Winkler-Moser J K., Vaughn S F., Evangelista R.** 2009. Composition and physical properties of cress (*Lipidium Sativum* L.) and field penny cress (*Thlaspi arvense* L.) oils. *Ind. Crop Prod*, Vol 30. pp 199-205.
- Nacamulli C., Bevivino A., Dalmastri C., Tabacchioni S., Chiarini L.** 1997. Perturbation of maize rhizosphere microflora following seed bacterization with *Burkholderia cepacia* MCI 7. *FEMS Microbiol. Ecol.* 23, pp 183–193.
- Nair R., Pandey S K., Jyothsna J.** 2021. Growth and Yield of Fenugreek (*Trigonella Foenum Graecum* L.) in Response to Different Levels of Phosphorus and Biofertilizer (*Rhizobium* and PSB) under Kymore Plateau and Satpura Hill Agro-Climatic Zone of Madhya Pradesh. *Pharma Innov. J*, Vol 10. pp 419–422.
- Narula N., Gupta KG.** 1986. Ammonia excretion by *Azotobacter* in liquid culture and soil in the presence of manganese and clay minerals. *Plant and Soil*, Vol 93. pp 205 – 209.
- Nassar R M A., Boghdady M S., Selim D A.** 2015. Effect of Mineral and Bio-Fertilizers on Vegetative Growth, Mineral Status, Seed Yield, Tropane Alkaloids and Leaf Anatomy of Thorn Apple Plant (*Datura Stramonium* L.). *Middle East J. Agric. Res*, Vol 4. pp 754–768.
- Nehl D B., Allen S J., Brown J F.** 1997. Deleterious rhizosphere bacteria: an integrating perspective. *Applied Soil Ecology*, 5(1). pp 1-20.
- Neilands J B.** 1995. Siderophores: structure and function of microbial iron transport compounds. *Journal of Biological Chemistry*, 270(45). pp 26723-26726.
- Neubauer U., Nowack B., Furrer G., Schulin, R.** 2000. Heavy metal sorption on clay minerals affected by the siderophore desferrioxamine B. *Environmental science & technology*, 34(13). pp 2749-2755.
- Nieto K F., Frankenberger Jr W T.** 1989. Biosynthesis of cytokinins in soil. *Soil Science Society of America Journal*, 53(3). pp 735-740.
- O'Sullivan DB., O'Gara F.** 1992. Traits of fluorescent *Pseudomonas* spp. involved in suppression of plant root pathogens. *Microbiol Rev*, 56. pp 662 -676.
- Oldroyd G E., Dixon R.** 2014. Biotechnological solutions to the nitrogen problem. *Current Opinion in Biotechnology*, Vol 26. pp 19-24.
- Ordookhani K., Sharafzadeh S., Zare M.** 2011. Influence of PGPR on Growth, Essential Oil and Nutrients Uptake of Sweet Basil. *Adv. Environ. Biol.* 5, pp 672–677
- Pal S S.** 1998. Interactions of an acid tolerant strain of phosphate solubilizing bacteria with a few acid tolerant crops. *Plant and soil*, 198(2). pp 169-177.

## Références bibliographiques

---

- Palleroni N J.** 1984. Pseudomonadaceae. In: Kreig NR., Holt JG.,(editors). Bergey's manual of systematic biology. Baltimore:Williams and Wilkins Co. pp 141-199.
- Pankaj K S., Amandeep k.** 2020. *Lepidium Sativum*: An Endangered Species. *International Journal of Creative Research Thoughts (IJCRT)*, Vol 8.pp 1097-1104.
- Parmar P., Sindhu S S.** 2013. Potassium solubilization by rhizosphere bacteria: influence of nutritional and environmental conditions. *J Microbiol Res*, 3(1).pp 25-31.
- Patel T.,Saraf M.**2017. Exploration of Novel Plant Growth Promoting Bacteria *Stenotrophomonas maltophilia* MTP42 isolated from the Rhizospheric Soil of *Coleus forskohlii*. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*.6(11),pp1-12.
- Paterson E., Sim A.** 2000. Effect of nitrogen supply and defoliation on loss of organic compounds from roots of *Festuca rubra*. *Journal of Experimental Botany*, 51(349).pp1449-1457.
- Phillipson J D.** 2001. Phytochemistry and medicinal plants. *Phytochemistry*, 56(3).pp 237-243.
- Pieterse C M., van der Does A., Zamioudis C., Leon Reyes H A., Van Wees S C.** 2012. Hormonal modulation of plant immunity. *Annual review of cell and developmental biology*, 28.pp 489-521.
- Poy D., Akbarzadeh A., Ghanei M.** 2015. Garden Cress: Morphology, Genetically and Therapeutic properties.*The Journal for Horticulture. Photon*, Vol 103.pp 130-136.
- Pozo M J., Azcón-Aguilar C.** 2007. Unraveling mycorrhiza-induced resistance. *Current opinion in plant biology*, 10(4).pp 393-398.
- Prashar P., Kapoor N., Sachdeva S.** 2013. Rhizosphere: Its structure, bacterial diversity and significance. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol*, 13. pp 63–77.
- Prescott L M., Harley J P., Klein D A., Claire M., Bacq C., Dusart J.** 2007. Microbiologie . Boeck université. 492p.
- Qiao JQ., Wu HJ., Rong Huo R., Gao XW., Borriss R.** 2014. Stimulation of plant growth and biocontrol by *Bacillus amylolique faciens* subsp.plantarum FZB42 engineered for improved action. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*. pp 1-14.
- Rai L K., Prasad P., Sharma E.** 2000. Conservation threats to some important medicinal plants of the Sikkim Himalaya. *Biological conservation*, 93(1).pp 27-33.
- Raiyani V N., Kathiriya R K., Thummer V M., Rupareliya V V.** 2018.Effect of FYM and Biofertilizers on Growth, Yield Attributes and Yield of Fenugreek (*Trigonella Foenum-Graecum* L.). *IJCS*, Vol 6(4).pp 746–748.
- Ramette A., Frapolli M., Défago G., Moënne-Loccoz Y.** 2003. Phylogeny of HCN synthase-encoding hcnBC genes in biocontrol fluorescent pseudomonads and its relationship

## Références bibliographiques

---

with host plant species and HCN synthesis ability. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 16(6).pp525-535.

**Rasool Hassan B A.** 2012. Medicinal plants (importance and uses). *Pharmaceut Anal Acta*, 3(10).pp 2153-2435.

**Raval Nita D., Pandya T N.** 2011. Pharmacognostic study of *Lepidium sativum* Linn (*Chandrashura*). *An International Quarterly Journal of Research in Ayurveda*, Vol 32(1).pp 116–119.

**Razavi S M A., Karazhiyan H., Phillips G O.** 2011. Extraction optimization of a hydrocolloid extract fromress seed (*Lepidium sativum*) using response surface methodology. *Food Hydrocolloids*,vol 25(5) .pp 915-920.

**Revilas B., Pozo C., Martinez-Toledo M V., Gonzalez L J.** 2000.Production of B group by two *Azotobacter* strains with phenolic compound as sole carbonsource under diazotrophic and adiazotrophic conditions.*Journal of Applied Microbiology*,Vol 89.ppp 486-493.

**Richardson A E.,** 2001. Prospects for using soil microorganisms to improve the acquisition of phosphorus by plants. *Functional Plant Biology*, 28(9).pp 897-906.

**Rizvi A., Ahmed B., Khan M.S., El-Beltagi H.S., Umar S., Lee J.** 2022. Bioprospecting Plant Growth Promoting Rhizobacteria for Enhancing the Biological Properties and Phytochemical Composition of Medicinally Important Crops. *Molecules*, 27(4):1407.

**Rodríguez H., Fraga R.** 1999. Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion. *Biotechnology advances*, 17(4-5) .pp 319-339.

**Rodríguez-Navarro D N., Dardanelli M S., Ruíz-Saínz J E.** 2007. Attachment of bacteria to the roots of higher plants. *FEMS microbiology letters*,272(2).pp127-136.

**Rossum D V., Muyotcha A., Verseveld V W., Stouthamer, A. H., Boogerd F C.** 1994.Siderophore production byBradyrhizobium spp. strains nodulating groundnut. *Plant and soil*, 163(2).pp177-187.

**Salhia B.** 2013. The Effect of *Azotobacter chroococcumas* Nitrogen biofertilizer on the growth and yield of Cucumis sativus. Master of Biological Sciences Botany. The Islamic University Gaza, Deanery of Higher Education Faculty of Science.p.94

**Salisbury F B., Ross C W.** 1992.Plant physiology. Wadsworth Publ., Belmont, *Plant physiology*. Wadsworth Publ., Belmont, CA.

## Références bibliographiques

---

- Saxena A K., Tilak K V B R.** 1998. Free-living nitrogen fixers: Its role in crop production. *Microbes for Health, Wealth and Sustainable Environment, Malhotra Publ Co, New Delhi. Edited by Verma AK.*pp 25-64.
- Sessitsch A., Reiter B.,Berg G.**2004.Endophyticbacterial communities of field-grown potato plants and their plant-growth-promoting and antagonistic abilities. *Can JMicrobiol .4*,pp 239–249.
- Shail., Manjari D., Neeraj k.,Gupta LN.** 2016. Nutritional importance of *Lepidium sativum* L. (Garden cress/Chandrashoor).*International Journal of Pharmacy and Analytical Research* ,Vol 5(1).pp 152-160.
- Sharghi A., Badi H N., Bolandnazar S., Mehrafarin A., Sarikhani MR.** 2018. Morphophysiological and Phytochemical Responses of Fenugreek to Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) under Different Soil Water Levels. *Folia Horti*,Vol 30.pp 215-228.
- Sharma S., Agarwal N.** 2011. Nourishing and healing process of garden cress (*Lepidium sativum* Linn). *Indian Journal of Natural Products and resources*,Vol 2(3).pp 292-297.
- Sharma S., Singh V., Kumar V., Devi S., Shukla K.P., Tiwari A., Singh J., Bisht S.** 2015. Plant-Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) and Medicinal Plants. *Springer*; Berlin/Heidelberg, Germany.Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR): Emergence and Future Facets in Medicinal Plants; pp. 109–131.
- Shilev S.** 2013. Soil rhizobacteria regulating the uptake of nutrients and undesirable elements by plants. In *Plant microbe symbiosis: fundamentals and advances* .pp147-167
- Sindhu S S., Gupta S K., Dadarwal K R.** 1999. Antagonistic effect of *Pseudomonas* spp. on pathogenic fungi and enhancement of growth of green gram (*Vigna radiata*). *Biology and Fertility of Soils*,Vol 29.pp 62-68.
- Singh C S., PaswanV K.** 2017.The potential of garden cress (*Lepidium sativum* L.) seeds for development of functional foods,*Advances in Seed Biology*.
- Singh M., Govindarajan R., Rawat A K S., Khare P B.** 2008. Antimicrobial flavonoid rutin from *Pteris vittata* L. against pathogenic gastrointestinal microflora. *American Fern Journal*, 98(2). pp 98-103.
- Sobhani I., WYaH J I.** 2000.Histopathology of gastroduodenal inflammation : the impact of *helicobacter pylori*.*Histopathology*,Vol 26.pp1-15.
- Sofowora A E., Onayade A.** 2013. The Role and Place of Medicinal Plants in the Strategies for Disease Prevention. *African Journal of Traditional, Complementary, and Alternative Medicines*,10(5): 210–229.

## Références bibliographiques

---

- Somers E., Vanderleyden J., Srinivasan M.** 2004. Rhizosphere bacterial signalling: a love parade beneath our feet. *Critical reviews in microbiology*, 30(4).pp205-240.
- Spaepen S., Vanderleyden J., Remans R.** 2007. Indole-3-acetic in microbial and microorganism-plant signaling. *FEMS Microbiology Reviews*, vol 31.pp 425-448.
- Spaepen S., Vanderleyden J., Okon Y.** 2009. Plant growth-promoting actions of rhizobacteria. *Advances in botanical research*, 51.pp283-320.
- Srivastava L M.** 2002. Plant growth and development: hormones and environment. *Elsevier*.
- Suryadevara N.,Ponmurugan P.**2012.Response of Turmeric to Plant Growth Promoting Rhizobacteria (Pgpr) Inoculation under Different Levels of Nitrogen. *Int. J. Biol. Technol.*3,pp 39–44.
- Takeuchi M., Hamana K.,Hiraishi A.** 2001. Proposal of the genus *Sphingomonas* sensu stricto and three new genera, *Sphigobium*, *Novosphingobium* and *Sphingopyxis*, on the basis of phylogenetic and chemotaxonomic analyses. *Int. J. Syst. Bacteriol.*51,pp 1405–1417.
- Takeuchi M.,Sakane T., Yanagi M., Yamasato K., Hamana K.,Yokota A.** 1995 . Taxonomic study of bacteria isolated from plants, proposal of *Sphingomonas rosasp.* nov. *Sphingomonas asaccharolytica.* nov. and *Sphingomonas mali* sp. nov. *Int J Syst Bacteriol* .45,pp 334–341.
- Tchan YT.,** 1984. Azotobacteriaceae. In: Bergey's manual of systemic bacteriology. Williams and Wilkins, Baltimore, London. (ed. Krieg J and Holt G).1:219-225.
- Tchan YT.,** 1989. New PB.Azotobacteraceae. In: Holt JG, Williams et al (eds).Bergey's manual of systematic bacteriology volume 1. Baltimore, USA.pp 220–229.
- Tien T M., Gaskins M H., Hubbell D.,** 1979. Plant growth substances produced by *Azospirillum brasilense* and their effect on the growth of pearl millet (*Pennisetum americanum* L.). *Applied and environmental microbiology*, 37(5). pp1016-1024.
- Tillard P., Drevon J J.** 1988. Nodulation and nitrogenase activity of chickpea cultivar INRA 199 inoculated with different strains of *Rhizobium ciceri*. *Agronomie*,Vol 8.pp387-392.
- Timmusk S., Nicander B., Granhall U., Tillberg E.** 1999. Cytokinin production by *Paenibacillus polymyxa*. *Soil Biology and Biochemistry*, 31(13) .pp1847-1852.
- Tsavkelova E A., Klimova S Y., Cherdyntseva T A., Netrusov A I.** 2006. Microbial producers of plant growth stimulators and their practical use: a review. *Applied biochemistry and microbiology*, 42(2).pp 117-126.

## Références bibliographiques

---

**Uphof J C T.** 1959. Dictionary of Economic Plants, 1st edition, , Publisher:Verlag Von J Cramer, pp. 308.

**Valverde A., Burgos A., Fiscelle T., Rivas R., Velazquez E., Rodriguez-Barrueco C., Cervantes E., Chamber M., Igual J M.** 2006. Differential effects of coinoculations with *Pseudomonas jessenii* PS06 (a phosphate-solubilizing bacterium) and *Mesorhizobium ciceri* C- 2/2 strains on the growth and seed yield of chickpea under greenhouse and field conditions. *Plant and Soil*, Vol 287.pp 43-50.

**Van Loon L C., Bakker P A H M., Pieterse C M J.** 1998. Systemic resistance induced by rhizosphere bacteria. *Annual review of phytopathology*, 36.pp 453-483.

**Van Wees S C., Pieterse C M., Trijssenaar A., Van't Westende Y A., Hartog F., Van Loon L C.** 1997. Differential induction of systemic resistance in Arabidopsis by biocontrol bacteria. *Molecular plant-microbe interactions*, 10(6). pp 716-724.

**Vejan P., Abdullah R., Khadiran T., Ismail S., Nasrulhaq Boyce A.** 2016. Role of plant growth promoting rhizobacteria in agricultural sustainability-a review. *Molecules*, 21(5).pp 573.

**Vessey J K.,** 2003.Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant and soil*, 255(2).pp571-586.

**Vyas P., Gulati A.** 2009. Organic acid production in vitro and plant growth promotion in maize under controlled environment by phosphate-solubilizing fluorescent *Pseudomonas*. *BMC microbiology*, 9(1).pp 1-15.

**Wadhwa S., Panwar M S., Agrawal A., Saini N.,Patidar L N.** 2012. Pharmacognostical Study of *Lipidium Sativum*. *International Journal for Pharmaceutical and Allied Research* ,Vol 2 (4).pp 316-323.

**Wang M., Bian Z., Shi J., Wu Y., Yu X., Yang Y., Ni H., Chen H., Bian X., Li T.** 2020. Effect of the Nitrogen-Fixing Bacterium *Pseudomonas Protegens* CHA0-ΔretS-Nif on Garlic Growth under Different Field Conditions. *Crops and Products*, Vol 145:111982.

**Watt J M., Brandwijk M G.** 1962. Medicinal and Poisonous Plants of Southern and Eastern Africa. 2nd Edn., Livingstone Ltd., Edinburgh.

**Wei G., Kloepper JW., Tuzun S.** 1996. Induced systemic resistance to cucumber diseases and increased plant growth by plant growth promoting rhizobacteria under field condition, *Phyto-pathology*. 86.pp 221-224.

**Weyens N., Monchy S., Vangronsveld J., Taghavi S., van der Lelie D.** 2010. Plant-microbe partnerships. *Handbook of hydrocarbon and lipid microbiology*. pp 547-257.

## Références bibliographiques

---

**White P J., Karley A J.** 2010., Potassium, Plant Cell Monographs. *Cell biology of metals and nutrients*. pp 199-224.

**Willcox M D.** 2007. Pseudomonas aeruginosa infection and inflammation during contact lens wear .*Optometry and Vision Science: Official Publication of the American Academy of Optometry*, 84(4).pp 273-278.

**Williams P M., De Mallorca M S.** 1982. Abscisic acid and gibberellin-like substances in roots and root nodules of Glycine max. *Plant and Soil*, 65(1).pp19-26.

**Yang B M., Yao L X., Li G L., He Z H., Zhou C M.** 2015. Dynamic changes of nutrition in litchi foliar and effects of potassium-nitrogen fertilization ratio. *Journal of soil science and plant nutrition*, 15(1).pp 98-110.

**Yuan C L., Mou C X., Wu W L., Guo Y B.** 2011. Effect of different fertilization treatments on indole-3-acetic acid producing bacteria in soil. *Journal of Soils and Sediments*, 11(2).pp 322-329.

**Zandi P., Basu S K., Cetzal-Ix W., Kordrostami M., Chalaras S K., Khatibai L B.** 2017 . Fenugreek (Trigonella Foenum-graecum L.): An Important Medicinal and Aromatic Crop. In *Active Ingredients from Aromatic and Medicinal Plants*; IntechOpen: Rijeka, Croatia; pp. 207–224.

**Zehnder G., Kloepper J., Yao C., Wei G.** 1997. Induction of systemic resistance in cucumber against cucumber beetles (Coleoptera: Chrysomelidae) by plant growth-promoting rhizobacteria. *Journal of Economic Entomology*, 90(2) .pp 391-396.

**Zewdu M., Gebremariam T., Asres K.** 2001. Global perspectives of medicinal plants.

# **Annexes**

**Annexe 01**

• **Gélose Nutritive**

- Peptone.....6g/l
- Extrait de viande .....1g/l
- Extrait de levure.....2g/l
- Chlorure de sodium.....5g/l
- Agar .....14g/l
- PH .....7.3-<sup>+</sup> 0.2

Les composants sont suspendus dans 1L d'eau distillée, chauffés jusqu'à la dissolution totale. Après, la solution obtenue est autoclavée à 121°C pendant 15 minutes.

**Annexe 02**

• **La solution saline à 0.85%**

- Chlorure de sodium(NaCl)..... 8.5g
- Eau distillée .....1000mL

La solution est autoclavée à 121°C pendant 15 minutes.

**Annexe 03**

• **Composition des standards de turbidité de Mc Farland**

• **Solution ajoutée :**

- Dihydrate de chlorure de baryum (BaCL<sub>2</sub>) (1.175%).....0.5ml
- Acide sulfurique (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).....99.5ml

<b>McFarland Standard</b>	<b>(1.175%) BaCL<sub>2</sub> en ml</b>	<b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (1%) en ml</b>	<b>Densité approximative correspondante de bactéries/ml(10<sup>8</sup>)</b>
0.5	0.5	99.5	1
1	0.1	9.9	3
2	0.2	9.8	6
3	0.3	9.7	9
4	0.4	9.6	12
5	0.5	9.5	15
6	0.6	9.4	18
7	0.7	9.3	21

## Annexes

### Annexe04

- **Milieu API AUX Medium 7 ml**

- Sulfate d'ammonium ..... 2 g
- Agar ..... 1,5 g
- Solution de vitamines..... 10,5 ml
- Solution d'oligo-éléments ..... 10ml
- Phosphate monosodique..... 6,24 g
- Chlorure de potassium ..... 1,5 g
- Eau déminéralisée..... qsp 1000 ml
- pH final ..... 7,0-7,2

### Annexe 05

- **Tableau de lecture de la galerie API 20NE**

TESTS	COMPOSANTS ACTIFS	QTE (mg/cup.)	REACTIONS/ENZYMES	RESULTATS	
				NEGATIF	POSITIF
NO <sub>3</sub>	potassium nitrate	0,136	réduction des Nitrates en nitrites	NIT 1 + NIT 2 / 5 min	
			réduction des Nitrates en azote	incolore	rose-rouge
				Zn / 5 min	
				rose	incolore
TRP	L-tryptophane	0,2	formation d'indole (TRyptophane)	JAMES / immédiat	
				incolore vert pâle / jaune	rose
<u>GLU</u>	D-glucose	1,92	fermentation (GLUcose)	bleu à vert	jaune
<u>ADH</u>	L-arginine	1,92	Arginine DiHydrolase	jaune	orange / rose / rouge
<u>URE</u>	urée	0,76	UREase	jaune	orange / rose / rouge
ESC	esculine citrate de fer	0,56 0,072	hydrolyse (β-glucosidase) (ESCuline)	jaune	gris / marron / noir
GEL	gélatine (origine bovine)	0,6	hydrolyse (protéase) (GELatine)	pas de diffusion du pigment	diffusion du pigment noir
PNPG	4-nitrophényl-βD- galactopyranoside	0,22	β-galactosidase (Para-NitroPhényl-βD- Galactopyranosidase)	incolore	jaune
<u>GLU</u>	D-glucose	1,56	assimilation (GLUcose)	transparence	trouble
<u>ARA</u>	L-arabinose	1,4	assimilation (ARAbinose)	transparence	trouble
<u>MNE</u>	D-mannose	1,4	assimilation (ManNosE)	transparence	trouble
<u>MAN</u>	D-mannitol	1,36	assimilation (MANnitol)	transparence	trouble
<u>NAG</u>	N-acétyl-glucosamine	1,28	assimilation (N-Acétyl-Glucosamine)	transparence	trouble
<u>MAL</u>	D-maltose	1,4	assimilation (MALtose)	transparence	trouble
<u>GNT</u>	potassium gluconate	1,84	assimilation (potassium GlucoNaTe)	transparence	trouble
<u>CAP</u>	acide caprique	0,78	assimilation (acide CAPrique)	transparence	trouble
<u>ADI</u>	acide adipique	1,12	assimilation (acide ADIrique)	transparence	trouble
<u>MLT</u>	acide malique	1,56	assimilation (MaLaTe)	transparence	trouble
<u>CIT</u>	trisodium citrate	2,28	assimilation (trisodium CITrate)	transparence	trouble
<u>PAC</u>	acide phénylacétique	0,8	assimilation (acide PhénylACétique)	transparence	trouble
OX	(voir notice du test oxydase)	-	cytochrome-oxydase	(voir notice du test oxydase)	

## Annexes

### Annexe 06

- **Bouillon Nutritif**

- Peptone.....10g/l
- Chlorure de sodium.....5g/l
- Extrait de bœuf.....10g/l
- PH.....7.3-<sup>+</sup>0.2

La poudre a dissous dans 1L d'eau distillée, la solution est répartie dans des tubes stérile, après les tubes sont autoclavés à 121c°pendant 15 minutes. Le milieu peut être utilisé immédiatement ou stockés à 2à8c°.

### Annexe 07

- **Eau gélosée (0.8%)**

- Agar-agar.....0.8g
- Eau distillée.....100ml

La solution est autoclavée pendant 20min à 120 °C

### Annexe 08

- **Analyse statistique avec le logiciel STATISTICA**

Effet des PGPR sur la Longueur racinaire de cresson (*Lepidium Sativum*)

Univariate Tests of Significance for Partie racinaire(cm) (cresson.sta) Over-parameterized model Type III decomposition					
	<b>SS</b>	<b>Degr. of - Freedom</b>	<b>MS</b>	<b>F</b>	<b>p</b>
<b>Traitement</b>	906,5900	9	100,7322	69,38543	0,00
<b>Error</b>	65,3300	45	1,4518		

Effet des PGPR sur la Longueur de la partie aérienne de cresson (*Lepidium Sativum*)

Univariate Tests of Significance for Partie aérienne(cm) (cresson.sta) Over-parameterized model Type III decomposition					
	<b>SS</b>	<b>Degr. of - Freedom</b>	<b>MS</b>	<b>F</b>	<b>p</b>
<b>Traitement</b>	6445,387	9	716,1541	126,8610	0,00
<b>Error</b>	254,033	45	5,6452		

## Annexes

---

Effet des PGPR sur poids frais (*Lepidium Sativum*)

Univariate Tests of Significance for Poids frais(g) (cresson.sta) Over-parameterized model Type III decomposition					
	<b>SS</b>	<b>Degr. of - Freedom</b>	<b>MS</b>	<b>F</b>	<b>p</b>
<b>Traitement</b>	1,026003	9	0,114000	7,802106	0,000001
<b>Error</b>	0,657517	45	0,014611		

Effet des PGPR sur poids sec de cresson (*Lepidium Sativum*)

Univariate Tests of Significance for Poids sec(g) (cresson.sta) Over-parameterized model Type III decomposition					
	<b>SS</b>	<b>Degr. of - Freedom</b>	<b>MS</b>	<b>F</b>	<b>p</b>
<b>Traitement</b>	0,002284	9	0,000254	39,98311	0,00
<b>Error</b>	0,000286	45	0,000006		

## Résumé

Le recours à la médecine traditionnelle et à la phytothérapie est une pratique normative pour le maintien d'une bonne santé dans la plupart des pays en développement. Cependant, la culture des plantes médicinales est gravement menacée par l'application des engrais chimiques qui sont onéreux, polluants, et préjudiciable à la santé. L'inoculation par les PGPR est une approche microbiologique efficace pour l'amélioration de développement de plantes médicinales, cette stratégie pourrait remplacer efficacement les intrants chimiques. A cet égard, un essai a été réalisé sous des conditions semi contrôlées sur le Cresson (*Lepidium sativum*) inoculé par des souches à effet PGPR isolées à partir de sol rhizosphérique. L'isolement des bactéries nous a permis d'obtenir une collection de 08 isolats, leur effet sur la croissance des plantes est vérifié ainsi que leur caractérisation phénotypique, et biochimique par les galeries API 20NE. Les résultats obtenus ont révélé que l'inoculation a amélioré favorablement la longueur de la partie aérienne, racinaire, et le poids frais et sec des plantes par rapport aux témoins non inoculés. Statistiquement cette réponse montre que l'effet des souches est hautement significatif. Au cours de la sélection de l'inoculum le plus performant nous avons constaté que *Sphingomonas paucimobilis* B6, *Pseudomonas luteola* B4, *Pseudomonas fluorescens* B2 sont les souches les plus efficaces.

**Mots clés :** PGPR, Cresson (*Lepidium sativum*), Rhizosphère, Inoculation.

## Abstract

The use of traditional medicine and herbal medicine is a normative practice for maintaining good health in most developing countries. However, the cultivation of medicinal plants is seriously threatened by the application of chemical fertilizers that are expensive, polluting, and detrimental to health. PGPR inoculation is an effective microbiological approach for the developmental improvement of medicinal plants; this strategy could effectively replace chemical inputs. In this respect, a trial was carried out under semi-controlled conditions on watercress (*Lepidium sativum*) inoculated with PGPR strains isolated from rhizosphere soil. The isolation of bacteria allowed us to obtain a collection of 08 isolates; their effect on plant growth is verified as well as their phenotypic and biochemical characterization by the API 20NE galleries. The results obtained revealed that inoculation favorably improved the length of the aerial part, root, and fresh and dry weight of the plants compared to the non-inoculated controls. Statistically this response shows that the effect of strains is highly significant. During the selection of the best performing inoculums we found that *Sphingomonas paucimobilis* B6, *Pseudomonas luteola* B4, *Pseudomonas fluorescens* B2 were the most efficient strains.

**Key words:** PGPR, Watercress (*Lepidium sativum*), Rhizosphere, Inoculation.

## ملخص

استخدام الطب التقليدي وطب الأعشاب هو ممارسة معيارية للحفاظ على صحة جيدة في معظم البلدان النامية ومع ذلك ، فإن زراعة النباتات الطبية مهددة بشكل خطير من خلال استخدام الأسمدة الكيماوية باهظة الثمن والملوثة والضارة بالصحة التلقيح بواسطة PGPR هو نهج ميكروبيولوجي فعال لتحسين تطوير النباتات الطبية ، ويمكن لهذه الاستراتيجية أن تحل محل المدخلات الكيميائية بشكل فعال. وفي هذا الصدد أجري اختبار في ظل ظروف شبه خاضعة للرقابة على حب الرشاد (*Lepidium sativum*) الذي تم تطعيمه بواسطة سلالات ذات تأثير PGPR معزولة من التربة الجذرية. سمحت لنا عزلة البكتيريا بالحصول على مجموعة من 08 عزل ، ويتم التحقق من تأثيرها على نمو النبات بالإضافة إلى توصيفها الظاهري والبيوكيميائي من قبل معارض API 20NE. كشفت النتائج التي تم الحصول عليها أن التلقيح حسن بشكل إيجابي طول الوزن الهوائي والجذري والوزن الطازج والجاف للنباتات مقارنة بالشهود غير الملقحة. إحصائياً، تظهر هذه الاستجابة أن تأثير السلالات مهم للغاية. أثناء اختيار اللقاح الأكثر اداء وجدنا أن *Sphingomonas paucimobilis* B6 ، *Pseudomonas luteola* B4 ، *Pseudomonas fluorescens* B2 هي السلالات الأكثر كفاءة.

**الكلمات المفتاحية:** PGPR ، حب الرشاد (*Lepidium sativum*)، غلاف جذوري ، التلقيح.