



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
Université Larbi Tébessi-Tébessa-



Faculté de Sciences Exactes et Sciences de la Nature et de la Vie
Département des Êtres Vivants
Domaine: Sciences de la Nature et de la Vie

MEMOIRE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention Pour Obtenir Le Diplôme De Master
OPTION : ECOPHYSIOLOGIE VÉGÉTALE

Présenté Par

AOULMI amani

HAMDI férial

-THEME-

Effet Des Bactéries Isolées De La Rhizosphère Du Stipa
Tencissima Sur La Croissance D'une légumineuse

Soutenu le : 12 / juin / 2022

Devant le jury composé de :

Promoteur : **Dr.SOUAHI Hana**..... MCA

Président : **Dr.BOUDJABI Sonia** MCA

Examineur : **Dr.HIOUN Soraya** MAA

N° Série :/2022



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
Université Larbi Tebessi-Tébessa-



Faculté de Sciences Exactes et Sciences de la Nature et de la Vie
Département des Êtres Vivants
Domaine: Sciences de la Nature et de la Vie

MEMOIRE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention Pour Obtenir Le Diplôme De Master
OPTION : ECOPHYSIOLOGIE VÉGÉTALE

Présenté Par

AOULMI amani

HAMDI férial

-THEME-

Effet Des Bactéries Isolées De La Rhizosphère Du Stipa
Tencissima Sur La Croissance D'une légumineuse

Soutenu le : 12 / juin / 2022

Devant le jury composé de :

Promoteur : Dr.SOUAHI Hana..... MCA

Président : Dr.BOUDJABI Sonia MCA

Examineur : Dr.HIOUN Soraya MAA

N° Série :/2022



DEDICACES

Nous dédions ce modeste travail à tous les enseignants de l'Institut qui nous ont illuminées avec leurs savoirs et leurs conseils tout au long de ces cinq ans d'étude. Grâce à eux, nous avons compris la mission noble de cette tâche qui, à nos yeux est la plus ardue mais la plus récompensée par Allah si nous l'exécutons bien comme il faut.

Nous dédions aussi ce travail à toute personne qui n'a jamais cru en nous, à toute personne qui avait mis des pierres voire des rochers sur notre chemin, on vous dit merci pour vos pierres car on les a utilisées pour bâtir les escaliers qui nous ont mené là, où nous sommes aujourd'hui.

Nous dédions également ce mémoire aux personnes barrières qui ont fait face à nos rêves, qui ont essayé de nous briser et parfois nous casser, nous tenons à leur dire que nous sommes toujours là où vous n'avez jamais souhaité nous voir. Parce que la réussite, la vraie réussite c'est d'épater ceux qui ont connu le moment où nous n'étions rien.

Amani & Ferial



REMERCIEMENTS

Le grand merci à **ALLAH, le grand seigneur** qui nous a guidés vers ce métier noble. Merci Allah de nous avoir aidés et d'avoir éclairé notre chemin.

Nous voudrions remercier particulièrement

-**madame Souahi Hanna, notre encadreur**, qui nous a accompagnées durant ce travail de fin d'études. Nous lui adressons un grand merci pour sa disponibilité et son écoute face à nos questions.

Nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements au **DR. Boudjabi Sonia** d'avoir accepté de nous faire l'honneur de présider le jury, pour son abnégation, sa disponibilité ainsi que pour ses qualités humaines.

Nous remercions très chaleureusement **DR. Hioun Soraya** pour avoir eu l'amabilité d'examiner ce travail et pour le temps qu'elle va consacrer, d'une part à la lecture de la thèse et d'autre part, à la soutenance.

-**Nos familles et nos amies** qui nous ont toujours encouragées dans nos choix personnels et professionnels. Ils ont toujours été là pour nous afin de nous aider à franchir chaque étape de ces années d'études. Ils nous ont également soutenues dans les moments heureux comme dans les moments pénibles.

- **Enfin à nos collègues de promotion** avec qui nous avons passé des moments qui resteront gravés dans notre mémoire.

À tous et toutes un grand merci.

RESUMÈ

Les micro-organismes possédant une tolérance aux métaux et capables de promouvoir la croissance végétale, peuvent jouer un rôle important dans la remédiation de sols contaminés par les métaux. Ce travail consiste de montrer l'effet des bactéries de la rhizosphère de *stipa tenacissima* sur la croissance de *cicer arietinum* L dans des conditions des stress de métaux lourds.

Pour atteindre cette objectif nous avons inoculé des isolats de la racine, et du sol de *stipa tenacissima* (consortium a), (consortium b), (consortium A*B) dans des sols stressé par (plomb, 800 ppm), (cadmium, 1200ppm) avec les graines de *cicer arietinum*.

Cette culture est effectuée sous une serre semi-contrôlée pendant de 30 jours, arrosée régulièrement par l'eau distillée 3 fois par semaine, après on a réalisé des paramètres morphologiques, biochimiques et physiques.

Les résultats ont montré que l'inoculation avec les bactéries rhizosphérique isolé de *stipa tenacissima* améliore la tolérance de la plante vis-à-vis des métaux testés et réduit significativement la translocation des métaux vers certains organes de la plante.

Mots clés: *cicer arietinum* L, *stipa tenacissima*, PGPR, bioremédiation, plomb, cadmium. Métaux lourd

ABSTRACT

Metal-tolerant micro-organisms that promote plant growth can play an important role in the remediation of metal-contaminated soils. This work consists of showing the effect of bacteria from the rhizosphere of *Stipa tenacissima* on the growth of *cicer arietinum L* under heavy metal stress conditions.

To achieve this objective we inoculated isolates from the root and soil of *stipa tenacissima* (consortium a), (consortium b), (consortium a * b) in soils stressed by (lead, 800 ppm), (cadmium, 1200 ppm) with the seeds of *cicer arietinum*.

This cultivation is carried out in a semi-controlled greenhouse for 30 days, regularly watered by distilled water 3 times a week, after which morphological, biochemical and physical parameters were realized.

The results showed that inoculation with the isolated rhizospheric bacteria of *stipa tenacissima* improves the tolerance of the plant to the tested metals and significantly reduces the translocation of the metals to certain plant organs.

Key words : *cicer arietinum L*, *stipa tenacissima*, PGPR, bioremediation, lead, cadmium, heavy metals

التلخيص

يمكن للكائنات الدقيقة القادرة على تحمل المعادن والتي تعزز نمو النباتات أن تلعب دوراً هاماً في معالجة التربة الملوثة بالمعادن. يتكون هذا العمل من إظهار تأثير البكتيريا من جذور *stipa tenacissima* على نمو *cicer arietinum L* تحت ظروف الإجهاد المعدني الثقيل.

ولتحقيق هذا الهدف قمنا بتلقيح العزلات من جذور وتربة *stipa tenacissima* (الاتحاد أ)، (الاتحاد ب)، (الاتحاد أ * ب) في التربة المعرضة لإجهاد الرصاص (800 جزء في المليون) , و الكادميوم (1200 جزء في المليون) مع بذور *cicer arietinum L*

وتجري هذه الزراعة في دفيئة شبه خاضعة للمراقبة لمدة 30 يوماً، تروى بانتظام بالماء المقطر ثلاث مرات في الأسبوع، وبعد ذلك تتحقق البارامترات المورفولوجية والكيميائية الحيوية والفيزيائية.

وأظهرت النتائج أن التلقيح بالبكتيريا المعزولة من جذور نبتة الحلفة (*stipa tenacissima*) يحسن قدرة النبات على تحمل المعادن المختبرة ويقلل بشكل كبير من نقل المعادن إلى أعضاء نباتية معينة.

الكلمات المفتاحية : *PGPR*, *cicer arietinum L* , *stipa tenacissima* , الرصاص , الكادميوم , المعادن الثقيلة

TABLES DES MATIERES

Dédicaces	
Remerciements	
Résumé	
Abstract	
التلخيص	
Tables des matières	
Listes de tableaux	
Listes des figures	
Liste d'abréviations	
Introduction.....	12

CHAPITRE I

Généralité sur le cicer arietinum L

1. Cicer arietinum.....	14
1.1. Origine.....	14
1.2. Classification	15
1.3. Description botanique	15
1.4. Morphologie de la plante.....	16
1.6. Intérêts économiques et agronomiques.....	17
2. Généralité sur la rhizosphère.....	18
2.1. Étymologie	18
2.2. Définition.....	18
2.3. La microbiologie de la rhizosphère	18
2.4. La structure de la rhizosphère	19
A. Rhizosphère,	19
B. La surface de la racine,.....	19
C. La racine elle-même (la rhizosphère interne).....	19
2.5. Les activités de la rhizosphère	20
3. Les Rhizobactéries promotrices de la Croissance des Plantes.....	20
3.1. Définition de Rhizobacteria (PGPR)	20
3.2. Biodiversité des PGPR dans la rhizosphère.....	21
3.2.1. Les PGPR diazotrophes.....	21
A. Azotobacter	21
B. Azospirillum	21
C. Azoarcus.....	21

3.2.2. Bacillus	22
3.2.3. Pseudomonas.....	22

CHAPITRE II

Interaction Pgpr -Racine

1. Les Rhizobactéries Promotrices	24
2. Les effets directs et indirects des pgpr	24
3. Mécanismes directs	25
3.1 Stimulation et germination des graines.....	26
3.2. Acquisition des ressources.....	26
3.2.1. Fixation de l'azote	26
3.2.2. Solubilisations du phosphate	27
3.2.3. Solubilisations du potassium	28
3.2.4. Productions des sidérophores	29
3.2.5. Productions des phytohormones.....	29
3.2.5.1. Les auxines	29
3.2.5.2. Les gibbérellines.....	30
3.2.5.3. La réduction de la production de l'éthylène	30
3.2.5.4. La production des cytokinines	31
3.2.5.5. L'acide abscissique	31
4. mécanisme indirect d'action des pgpr	32
4.1. productions des antibiotiques	32
4.2. Composè volatiles	33

CHAPITRE III

MATERIELS ET METHODES

Objectif de l'expérimentation.....	35
1. Présentation du site de l'essai	35
2. Matériel.....	35
2.1 Matériel végétal	35
2.1.1 <i>cicer arietinum L</i>	35
2.1.1.1 systématique du <i>cicer arietinum L</i>	35
2.1.1.2 Les caractéristiques du <i>cicer arietinum L</i>	35
2.1.2 Isolement des bactéries	36
3. Méthode.....	36
3.1 Stérilisation des graines	36
3.2 Préparation du sol.....	36
3.4 DISPOSITIF EXPEREMENTALE	36
3.5 L'irrigation	38

3.6 Méthodologie et mesures effectuées.....	38
3.6.1 Paramètres morphologiques	38
3.6.1.1 La longueur de la plante (partie aeriene et partie racinaires)	38
3.6.1.2 Le poid frais et le poid sec	39
3.6.1.2 La biomasse végétale	39
3.6.2 Les paramètres biochimiques	40
3.6.2.1 La teneur en chlorophylle	40
3.6.2.2 Dosage des proteines solubles	40
3.6.2.3 Dosage des sucres solubles totaux	42
3.3. Analyse physique du sol.....	42
3.3.1 Mesure de pH.....	42
3.3.2 Mesure de la conductivité.....	43
4. L'analyse statistique	43

CHAPITRE IV

Résultat Et Discussion

1. Effet de la co-inoculation avec des PGPR sur la Longueur de la partie aérienne de <i>Cicer arietinum</i> L.	46
2. Effet de la co-inoculation avec des PGPR sur Longueur de la partie racinaire de <i>Cicer arietinum</i> L.	47
3. Effet de la co-inoculation avec des PGPR sur la surface foliaire de <i>Cicer arietinum</i> L.	49
4. Effet de la co-inoculation avec des PGPR sur le teneur de chlorophylle de <i>Cicer arietinum</i> L.	50
5. Effet de la co-inoculation avec des PGPR sur le poid frais de <i>Cicer arietinum</i> L.	52
6. Effet de la co-inoculation avec des PGPR sur le poid sec de <i>Cicer arietinum</i> L.	54
7. Effet de la co-inoculation avec des PGPR sur la biomasse végétale de <i>Cicer arietinum</i> L.	55
8. Effet de la co-inoculation avec des PGPR sur la teneur en sucre solubles de Cicer	57
9. Effet de la co-inoculation avec des PGPR sur la teneur en protéines solubles de Cicer.....	59

Conclusion

Bibliographie

Reference

LISTES DE TABLEAUX

Tableau 01. Analyse de variance de La longueur de la partie aérienne du <i>cicer arietinum L</i>	46
Tableau 02. Analyse de variance de la longueur de la partie racinaire de <i>cicer arietinum L</i>	47
Tableau 03. Analyse de variance de la surface foliaire du <i>cicer arietinum L</i>	49
Tableau 04. Test de kruskal-Wallis de la teneur en chlorophylle du <i>cicer arietinum L</i>	50
Tableau 05. Analyse de la variance a deux facteur de classification du poid frais de <i>cicer arietinum L</i>	52
Tableau 06. Analyse de la variance a deux facteurs de classification du poid sec du <i>cicer arietinum L</i>	52
Tableau 07. Analyse de la variance a deux facteur de classification de la biomasse végétale du <i>cicer arietinum L</i>	54
Tableau 08. Analyse de la variance a deux facteur de classification de la teneur en sucres solubles d <i>cicer arietinum L</i>	55
Tableau 09. Analyse de variance a deux classifications du <i>cicer arietinum L</i> cultivé dans des conditions contrôlées.	56

LISTES DES FIGURES

Figure 01. Plante, fleurs et graines de pois chiche. Photographies montrant, (a) une plantule de pois chiche germée ; (b) plant de pois chiche; (c) vue adaxiale de la partie apicale d'une plante de pois chiche ayant des feuilles composées unipennées ; (d-1) fleur de pois chiche de type desi ; (d-2) fleur de pois chiche de type kabuli ; (e) disposition 1+2+2 de la corolle montrant (1) standard, (2) aile et (3) quille de type desi et kabuli ; (f) anthères diadelphes; (g-1) graine de pois chiche de type desi et (g-2) graine de pois chiche de type kabuli.(Gangola , 2014)	17
Figure 02. Représentation schématique des différentes zones de la rhizosphère (Lepinay, 2013).....	20
Figure 03. Quelques effets directs et indirects des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes sur la croissance des plantes (Siddiqui 2006)	25
Figure 04. Schéma simplifié des principales activités du PGPR et de leurs interactions avec le système racinaire ;.....	26
Figure 05. Mécanismes d'actions des bactéries solubilisant les phosphates (Khan, Z. H.; Qadir, I.; Yaqoob, S.; Khan, R. A.; Khan, M. A.2009)	28
Figure 06. Rôles importants de six phytohormones importantes dans les plantes (oksana et al. ,2018).....	31
Figure 07. Remplissage des pots (Aoulmi et Hamdi; 2022).....	37

Figure 08. Le dispositif expérimental. (Aoulmi et Hamdi; 2022).....	38
Figure 09. Plante de <i>cicer arietinum</i> L traité avec rhizobacterie en présence du plomb. (Aoulmi et Hamdi; 2022)	38
Figure 10. Plante de <i>cicer arietinum</i> L traité avec rhizobacterie en présence du cadmium. (Aoulmi et Hamdi; 2022)	39
Figure 11. balance (Aoulmi et Hamdi; 2022).....	39
Figure 12. chlorophylle-mètre cm 200 plus (Aoulmi et Hamdi; 2022)	40
Figure 13. Réactif de Bradford (Aoulmi et Hamdi; 2022)	41
Figure 14. Dosage de protéine soluble de la partie aérienne et partie racinaires du <i>cicer arietinum</i> L (Aoulmi et Hamdi; 2022).....	41
Figure 15. Dosage des sucres solubles. (Aoulmi et Hamdi; 2022).....	42
Figure 16. Filtration du sol (Aoulmi et Hamdi; 2022)	433
Figure 17. Effet de la co-inoculation avec des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR) sur la Longueur de la partie aérienne des plantes de <i>Cicer arietinum</i> L, cultivées dans des conditions contrôlées.	47
Figure 18. Effet de la co-inoculation avec des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR) sur la Longueur de la partie racinaire de <i>Cicer arietinum</i> L, cultivées dans des conditions contrôlées.	48
Figure 19. Effet de la co-inoculation avec des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR) sur la surface foliaire des plantes de <i>Cicer arietinum</i> L, cultivées dans des conditions contrôlées.	50
Figure 20. Effet de la co-inoculation avec des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR) sur le teneur en chlorophylle des plantes de <i>Cicer arietinum</i> L, cultivées dans des conditions contrôlées.	51
Figure 21. Effet de la co-inoculation avec des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR) sur le poids frais des plantes de <i>Cicer arietinum</i> L, cultivées dans des conditions contrôlées.	53
Figure 22. Effet de la co-inoculation avec des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR) sur le poids sec des plantes de <i>Cicer arietinum</i> L, cultivées dans des conditions contrôlées.	55
Figure 23. Effet de la co-inoculation avec des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR) sur la biomasse végétale des plantes de <i>Cicer arietinum</i> L, cultivées dans des conditions contrôlées.	56
Figures 24. Effet de la co-inoculation avec des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR) sur la teneur des sucres solubles des plantes de <i>Cicer arietinum</i> L, cultivées dans des conditions contrôlées.	58
Figure 25. Effet de la co-inoculation avec des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR) sur le teneur des protéines solubles des plantes de <i>Cicer arietinum</i> L, cultivées dans des conditions contrôlées.	60

LISTE D'ABREVIATIONS

S_o → Sol + Eau distillé

S_{Cd} → Sol + Cadmium (12 ppm)

S_{CA} → Sol + Consortium A (bactéries isolées des racines de *stipa tenacissima*)

S_{CB} → Sol + Consortium B (bactéries isolées du sol de *stipa tenacissima*)

S_(CA x CB) → Sol + Consortium A + Consortium B

S_{CA+ Cd} → Sol + Consortium A + Cd

S_{CB+ Cd} → Sol + Consortium B + Cd

S_{(CA x CB) + Cd} → Sol + Consortium A + Consortium B + Cd

S_{Pb} → Sol + Plomb (800 ppm)

S_{CA+ Pb} → Sol + Consortium A + Pb

S_{CB+ Pb} → Sol + Consortium B + Pb

S_{(CA x CB) + Pb} → Sol + Consortium A + Consortium B + Pb

% : Pourcentage

BSA: l'albumine de sérum de bœuf

AIA : Acide Indole Acétique

ABA: Acide Abscissique

Cm : Centimètre

cm² : centimètre carré

ccl : Indice de teneur en chlorophylle

INTRODUCTION

Bien que secondaire par rapport aux secteurs pétroliers et industriels, l'agriculture joue un rôle important dans l'économie Algérienne, en employant 23 % de la population active et en participant à 11 % du P.L.B. dans cette dernière décennie . Les légumineuses alimentaires ont une superficie moyenne annuelle d'environ 60.000ha pour une production totale en grain secs de 250.000 tonnes (**World, 2008**). La superficie occupée par ce segment a évolué rapidement entre 2000 et 2015 (en passant de 19.570 ha à 30.055 ha) (**Djeghar et al, 2014**) Les cultures de légumineuses fournissent majoritairement des glucides (source d'énergie métabolique) et des protéines (sources d'éléments constitutifs et régulateurs) mais également une panoplie variée selon les espèces des autres éléments (lipides , fibres , éléments minéraux , vitamines) pour l'alimentation des hommes et des animaux .

Les rendements restent encore modestes à cause de nombreuses contraintes, d'ordre. Culturelles, socio – économiques, abiotiques et biotiques qui causent une instabilité du rendement et une baisse de la production, tels que le déficit hydrique, la salinité, les variations de température, la déficience des sols en éléments minéraux (**Graham, 1981 ; Bennanie et al, 2005**).

Les microorganismes du sol peuvent être bénéfiques en affectant positivement la qualité du sol et la croissance des plantes. La diversité des communautés bactériennes rhizosphériques est influencée à la fois par le sol, sa composition, ses caractères physicochimiques, ainsi que par les exsudats racinaires produites par les plantes. Parmi cette grande diversité bactérienne, un groupe de bactéries communément appelé PGPR, de l'anglais « Plant Growth Promoting Rhizobacteria », est capable de coloniser la rhizosphère des plantes et d'apporter un effet positif à leur croissance (**Kang et al, 2012**).

L'expérimentation de cette recherche consiste à déterminer l'effet des bactéries PGPR sur certains paramètres biochimiques et physiologiques du *Pois chiche*. Plusieurs bactéries PGPR ont été isolées de la Rhizosphère de *Stipa tenacissima* présente dans la région de Mesloulah, municipalité d'El Oweinat, état de Tébessa, et les isolats seront utilisés dans des tests intéressants dans notre expérience en les ajoutant au sol de la plante de pois chiche.

CHAPITRE

I

Généralité sur le cicer arietinum L

1. Cicer arietinum

1.1. Origine

Le pois chiche (*Cicer arietinum* L) peut provenir du Moyen-Orient, en particulier du sud-est de la Turquie et de la Syrie (Saxena, 1984 ; Singh, 1997). Des restes carbonisés trouvés au Proche-Orient suggèrent que cette espèce était cultivée avec des céréales, des pois et des lentilles au VIIe siècle avant J.-C. (Vanier, 2005 ; Redden et Berger, 2007). Cette culture s'est développée rapidement dans la région méditerranéenne (Ladizinsky, 1987). Labdi (1995) a mentionné que Davis (1969) et Ladizinsky (1975) ont trouvé deux espèces sauvages dans le sud-est de la Turquie et les ont nommées respectivement *Cicer echinospernum* Davis et *Cicer reticulatum* Ladiz. Les deux espèces n'étaient pas très différentes du cultivar *Cicer arietinum* L. Ladizinsky (1989), montrant que *Cicer reticulatum* Ladiz possède 2n chromosomes (2n = 16 chromosomes) et a été identifié comme *Cicer reticulatum* Ladiz par analyse protéique et enzymatique d'ancêtres spontanés pois chiches.

Il est cultivé principalement en Algérie, en Éthiopie, en Iran, en Inde, au Mexique, au Maroc, au Pakistan, en Espagne, en Syrie, en Tanzanie, en Tunisie et en Turquie (Naghavi et Jahansouz, 2005). Il prospère dans des environnements écologiquement divers (Chandirasekaran et al, 2007).

1.2. Classification

Cicer arietinum L est un membre de la tribu des Cicereae, sous-famille Faboideae ou Papilioideae, famille Fabaceae ou Leguminosae (Toker et al, 2014).

Le nom Cicer est d'origine latine, du grec « kikis » signifiant force ou **puissance** (Singh et Diwakar, 1995). Le genre compte 40 espèces, dont une espèce sauvage temporaire « *C. flexuosum* Lipsky », 9 espèces annuelles, et le pois chiche (*C. arietinum* L.) classé en 32 espèces pérennes (Toker et al, 2014).

Le pois chiche a également de nombreux noms différents, tels que garbanzo en espagnol, pois chiche en français, Kichar ou Chicher en allemand, et Gram ou Bengal gram en anglais (Singh et Diwakar., 1995). Le pois chiche est également connu sous le nom de "Nakhut" ou "Nohut" dans les régions voisines de la Turquie, de la Roumanie, de la Bulgarie, de l'Afghanistan et de la Russie (Vander Maesen, 1987).

La classification de pois chiche selon United States Département of Agriculture (USDA) est comme suit :

✓ Règne : Plantae
✓ Embranchement : Spermatophyta (plantes à graines)
✓ Sous embranchement : Magnoliophyta (=angiospermes, phanérogames ou plantes à fleurs)
✓ Classe : Magnoliopsida
✓ Sous-classe : Rosidae
✓ Ordre : Fabales
✓ Famille : Fabaceae
✓ Genre : Cicer
✓ Espèce : <i>Cicer arietinum</i> L.

1.3. Description botanique

Cicer arietinum est une plante herbacée annuelle aux branches étalées et dépliées (Muehlbauer et Rajesh, 2008), autofécondée et diploïde à $2n=16$ chromosomes (Vail, 2005). Il mesure 20 à 100 cm de haut, est très ramifié, à port érigé et à croissance indéterminée (Giller, 2001).

1.4. Morphologie de la plante

Le pois chiches est des légumineuses herbacées annuelles autogames (Summerfield et Robert, 1985). C'est une plante de 20 à 50 cm de haut au port érigé, cultivée pour ses graines rondes contenant 1 ou 2 graines dans une gousse (Fig. 01). *Cicer arietinum* est la seule plante annuelle cultivée (Summerfield et al, 1984 Van Der Maesen, 1987 ; Gilles, 2001).

Le pois chiche est semé au printemps dans les régions du nord de la Méditerranée. Les plantes ont besoin de 15 à 40 % d'humidité du sol pendant la germination et le développement des graines ; trop d'humidité du sol pendant la floraison réduit le rendement en grain (Wery et al, 1994).

Le système racinaire mixte cesse de croître au début de la floraison, permettant à la plante d'explorer de grandes quantités de sol et la rendant tolérante à la sécheresse (**Slama, 1998**). Il se compose d'une racine primaire jusqu'à 1 m de profondeur et de racines secondaires courantes. La profondeur d'enracinement dépend de la technique de culture, de l'état et de la nature du sol. En effet, le bas de la charrue gêne l'allongement de la racine pivotante. Dans les sols de printemps humides, salins, lourds, stagnants et se réchauffant lentement, le développement des racines est limité et la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique est réduite (**Jaiswal et Singh, 2001**). Les nodules, développés sur les racines, permettent la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique pour satisfaire 80% des besoins de la plante en azote assimilable.

Les feuilles sont imparipennées (**Poitier, 1981**) et sont constituées de 7 à 15 folioles ovales et dentelées sans vrilles, situées en alternance sur l'axe (**Saxena, 1984**). Le dessous des feuilles est couvert de poils formés par des poils associatifs et multicellulaires.

Les tiges sont herbacées. Selon le génotype du pois chiche, à une certaine hauteur, la tige se ramifie en deux ou trois branches, formant des branches secondaires, suivies de branches tertiaires (**Braune et al, 1988**).

Les fleurs sont symétriques, nodulaires, solitaires ou groupées par deux. Ils sont insérés dans le pédoncule axillaire des aisselles des feuilles. L'apparition des premières fleurs dépend de plusieurs facteurs, tels que la maturité précoce du cultivar, la date et la densité de semis, et les techniques de culture. Cependant, comme le pois chiche est une espèce indéterminée, dans des conditions d'eau favorables et des températures douces, les branches continuent à se développer, à fleurir et à produire des gousses et des graines (**Leport et al, 2006**). La première fleur, connue sous le nom de fausse ou fausse fleur, est imparfaite et ne produit pas de gousse (**Roberts et al, 1980**).

Le fruit est une gousse sphérique, élargie, ovale, poilue, pendante avec un bec (**Ladizinsky, 1987**). Il peut avoir 1 à 3 particules et peut être lisse ou ridée, rond ou irrégulier. La germination est hypoembryonnée (**Sassene, 1989**) ; la partie aérienne sécrète une solution composée de 94,2 % d'acide malique, 5,6 % d'acide oxalique et 0,2 % d'acide acétique (**Van Der-Maessen, 1972**). La durée d'un cycle de pois chiche dépend de la chaleur et de l'humidité du sol. Si l'humidité du grain est d'environ 18 %, il peut être récolté (**Jaiswal et Singh, 2001**).

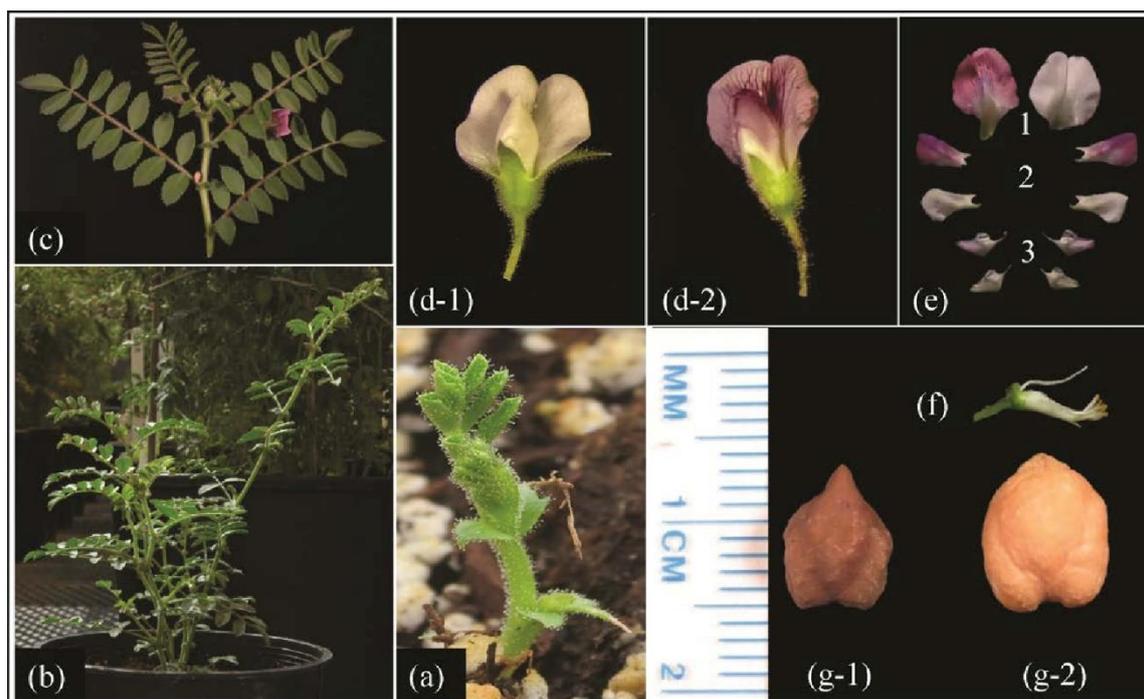


Figure 01. Plante, fleurs et graines de pois chiche. Photographies montrant, (a) une plantule de pois chiche germée ; (b) plant de pois chiche; (c) vue adaxiale de la partie apicale d'une plante de pois chiche ayant des feuilles composées unipennées ; (d-1) fleur de pois chiche de type desi ; (d-2) fleur de pois chiche de type kabuli ; (e) disposition 1+2+2 de la corolle montrant (1) standard, (2) aile et (3) quille de type desi et kabuli ; (f) anthères diadelphes; (g-1) graine de pois chiche de type desi et (g-2) graine de pois chiche de type kabuli. (**Gangola , 2014**).

1.6. Intérêts économiques et agronomiques

Sur le plan agronomique, en tant que légumineuse, *Cicer arietinum* peut être intégrée dans des systèmes de production biologique utilisant la fertilisation biologique. A cette fin, il est utilisé avec d'autres légumineuses dans des systèmes de rotation des cultures et en association avec d'autres cultures, notamment des céréales, pour assurer une efficacité d'utilisation optimale des ressources azotées. En fait, l'importance des légumineuses, en particulier des pois chiches, sont qu'elles contribuent à améliorer les niveaux de fertilité des sols en fixant l'azote dans l'atmosphère par l'intermédiaire de bactéries. Sur le plan économique, le remplacement de la jachère nue par la culture du pois chiche dans un système de jachère céréalière représente un gain de terres arables (**Kande, 1965**).

2. Généralité sur la rhizosphère

2.1. Étymologie

Le terme rhizosphère a été introduit en 1904 par Lorenz Hiltner (**Anton et al, 2008**), bactériologiste spécialisé en microbiologie des sols et professeur d'agronomie à l'Institut technique de Munich (**Lombi et al, 2001**). "Rhizo" vient du grec rhiza, qui signifie racine. "Sphère" vient du latin sphaera (synonyme), et le mot lui-même vient du grec ancien sfaira (qui signifie balle, balle ou sphère). La sphère définit la sphère d'influence du système racinaire. La rhizosphère est également appelée « moitié cachée » par rapport au volume de la plante en raison du volume qu'elle occupe (**Bowen et Roriva, 1991**).

2.2. Définition

La rhizosphère est la zone de sol qui se trouve en dessous et qui est directement affectée par les racines des plantes. C'est un lieu de communication intense entre les végétaux et les substrats minéraux. Celle-ci peut être affectée par la compaction des sols, des inondations persistantes, la salinisation, l'eutrophisation ou la pollution, voire des phénomènes de sécheresse. C'est aussi une zone d'activité microbienne intense (**Anoua et al, 1997**). Il joue un rôle important dans la résistance du sol à l'érosion, au gel, au feu, aux inondations et plus encore. Il en va de même pour la résilience (donc le risque est aussi agronomique) de ces sols et plantes cultivées (**Krafczyket al, 1984**).

2.3. La microbiologie de la rhizosphère

La rhizosphère est une niche écologique avec de nombreux micro-organismes qui jouent un rôle important dans la santé des plantes (**Villejoubert, 2016**).

Ces micro-organismes ne sont pas isolés dans le sol, mais constituent des communautés complexes dans lesquelles existent diverses interactions microbiennes (**Lepinay, 2013**). Les interactions végétales bénéfiques comprennent la symbiose, dont la plus célèbre est la symbiose des rhizobiums dans les légumineuses (**Han et al, 2020**). Par conséquent, les mycorhizes contractés par les racines des plantes et certains champignons du sol (**Rimington et al, 2018**)

Cependant, certains microbes sont nocifs, comme *R. solanacearum* qui affecte les cultures de pommes de terre, d'autres semblent n'avoir aucun effet (**Wang et al, 2019**).

Les protozoaires et les nématodes qui se nourrissent de bactéries sont également concentrés autour des racines. Par conséquent, la plupart des cycles des nutriments et de la prédation se produisent à proximité immédiate des racines, le site d'une activité métabolique intense. (**Dommergues, 1978**).

En général, la structure racinaire et la composition des exsudats racinaires changent au cours du développement de la plante et sous l'influence des conditions environnementales telles que la disponibilité de l'eau et la température. Par conséquent, la dynamique des populations microbiennes de la rhizosphère peut également changer. En effet, les plantes exercent une pression sélective en émettant des signaux spécifiques, ce qui réduit souvent la diversité microbienne et favorise des espèces ou des souches spécifiques (**Bertrand et al, 2000**).

2.4. La structure de la rhizosphère

La géométrie de la rhizosphère entre en collision avec la géométrie du système racinaire de la plante, qui est la zone entourant les racines. Cependant, la surface s'agrandit au fur et à mesure que la plante grandit, les microbes interagissent avec la plante et exercent leurs effets sur les racines et ces microbes associés se multiplient dans le sol.

Trois composants distincts ont été identifiés dans la rhizosphère (**Fig. 02**) :

A. Rhizosphère,

La zone du sol qui est affectée par les racines en libérant des substrats qui affectent l'activité microbienne.

B. La surface de la racine,

La surface de la racine, comprend des particules de sol fortement attachées.

C. La racine elle-même (la rhizosphère interne)

Fait partie du système racinaire car certains micro-organismes endophytes sont capables de coloniser le tissu racinaire interne (Bowen et Rovira, 1991). Un grand nombre de micro-organismes tels que les bactéries et les algues coexistent dans la rhizosphère, et les bactéries sont le type le plus abondant dans cette partie de l'environnement végétal et sont susceptibles d'avoir un impact important sur la physiologie végétale.

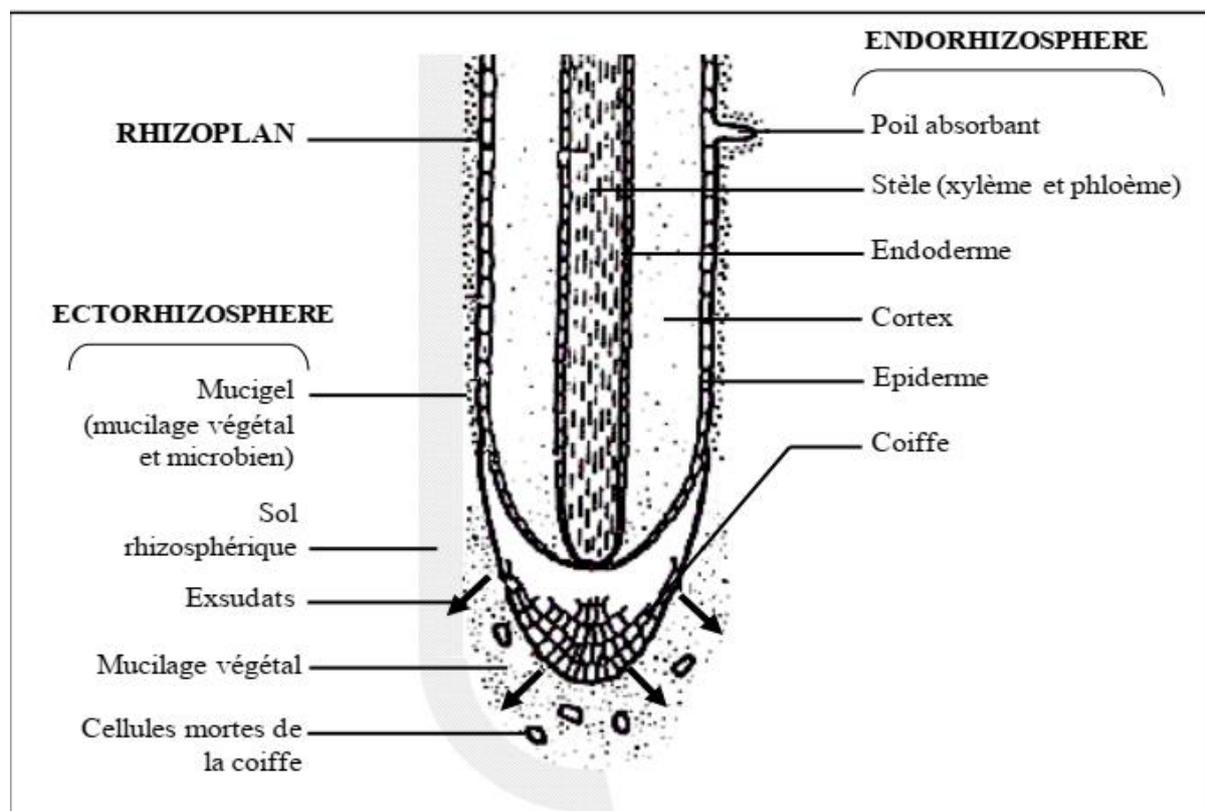


Figure 02. Représentation schématique des différentes zones de la rhizosphère (Lepinay, 2013).

2.5. Les activités de la rhizosphère

Certains phénomènes écologiques se produisent au niveau de la rhizosphère. En effet, les racines libèrent de grandes quantités de matière organique sous forme de mucus, de sécrétions, et plus de 40 % des produits de la photosynthèse transitent par le système racinaire (Soufiane, 1989). Exsudation ; ce terme est souvent utilisé à tort comme synonyme de dépôt de rhizosphère. Il s'agit en fait de la diffusion passive de composés solubles de faible poids moléculaire (tels que des sucres ou des acides aminés) à l'extérieur de la cellule, qui sont rapidement métabolisés par des micro-organismes (Davet, 1996 ; Aouar, 2012). Les exsudats racinaires sont un facteur clé dans les échanges de plante à plante

La densité et la diversité des bactéries de la rhizosphère sont directement liées à la nature et à la quantité des exsudats racinaires, et cet effet se manifeste par une altération de la croissance des plantes (Lemanceau, 1992).

3. Les Rhizobactéries promotrices de la Croissance des Plantes

3.1. Définition de Rhizobacteria (PGPR)

Le terme PGPR vient de l'anglais « Plant Growth Promoting Rhizobacteria » et désigne des bactéries qui ont des effets bénéfiques sur la croissance et le développement des plantes de diverses manières (**Abnatura., 2013**). Les rhizobactéries sont des bactéries qui ont une forte capacité à coloniser les racines (**Schroth Et Hancock., 1981, 1982**). Les bactéries non symbiotiques répondant à cette définition appartiennent à différents genres et espèces, dont les plus étudiés sont : *Agrobacterium radiobacter*, *Azospirillum spp*, *Bacillus spp*, *Pseudomonas spp fluorescent* (**Lemanceau., 1992**)).

3.2. Biodiversité des PGPR dans la rhizosphère

3.2.1. Les PGPR diazotrophes

Des bactéries libres fixatrices d'azote sont utilisées pour stimuler la croissance des plantes. La disponibilité d'énergie pour établir le processus de fixation de l'azote est la principale limitation, qui est compensée par le mouvement vers l'intérieur de la plante : *Azoarcus sp.*, *Gluconacetobacter diazotrophicus*, *Herbaspirillum sp* et *Azotobacter sp* forment des groupes bactériens non symbiotiques fixateurs d'azote. (**Ahmad et al. 2008**).

A. Azotobacter

Azotobacter paspali, décrit par DOBEREINER et PEDROSA (**1987**), est une bactérie fixatrice d'azote atmosphérique strictement aérobie, asymbiotique, isolée de la rhizosphère de la graminée tropicale très spécifique *Paspalum notatum*. *Paspariella diazotropha* a un effet positif sur la germination et le développement des graines, et il convient de noter que l'inoculation des cultures de blé avec ce genre a entraîné une augmentation de 30 % du rendement (**Saharan Et Nohra., 2011**).

B. Azospirillum

Les espèces d'*Azospirillum*, isolées de la rhizosphère de plusieurs grains à travers le monde, principalement réparties dans les régions tropicales et tempérées, sont utilisées depuis de nombreuses années.

1970. Cette bactérie a été initialement sélectionnée pour sa capacité à fixer l'azote atmosphérique et représente un bon candidat PGPR (**Antoun Et Prevost., 2005**).

C. Azoarcus

Azoarcus a attiré beaucoup d'attention en raison de son énorme diversité génétique et métabolique et est divisé en trois genres : *Azovibrio*, *Azospira* et *Azonexus*, qui diffèrent des

autres genres en ce qu'ils se développent de manière optimale lorsque les acides carboxyliques et l'éthanol sont utilisés à la place des sucres. 37-42°C (**Reinhold et al, 1986**). *Azoarcus*, un endophyte du riz, est considéré comme un modèle pour les endophytes fixateurs d'azote (**Ahmad et al, 2008**).

3.2.2. *Bacillus*

Certaines espèces de *Bacillus* sont des bactéries fixatrices d'azote, *notamment Bacillus subtilis*, isolées de la rhizosphère de diverses plantes à des concentrations supérieures à 10⁷ bactéries par gramme de sol de rhizosphère (**Antoun Et Prevost., 2005**).

3.2.3. *Pseudomonas*

Les *Pseudomonas* et les *Pseudomonas* fluorescentes sont des bactéries ubiquistes, rencontrées souvent dans les sols, classées comme étant les meilleurs candidats PGPR (**Saharan Et Nohra., 2011**). Les effets bénéfiques de la bactérisation des graines sont observés lors de l'inoculation des graines de pomme de terre (*Solanum tuberosum*) par *P. fluorescens* et *P. putida* (**bur et al.,1978 ; Alabouvette et al., 1993**) ont démontré que lors de l'utilisation de *Fusarium oxysporum* pathogènes, *P. fluorescens* et *P. putida* se manifestent comme principales candidates de contrôle biologique du flétrissement fusarien, avec une application bénéfique pour la suppression des fusarioses chez plusieurs espèces des plantes (**Chung et al, 2005**).

CHAPITRE

II

Interaction PGPR -Racine

1. Les Rhizobactéries Promotrices

Dans le sol, la rhizosphère contenant plus d'un million de micro-organismes par gramme de sol, l'activité microbienne est très intense, notamment sous l'influence du système racinaire. Les micro-organismes trouvent l'énergie nécessaire à leur métabolisme dans le milieu extérieur. (Sucres, acides aminés, acides organiques et hormone), libérées par les racines.

Les bactéries sont capables de coloniser efficacement les systèmes racinaires et d'avoir des effets bénéfiques sur les plantes en stimulant la croissance des plantes et en les protégeant des phytopathogènes. (**Ahmad et al, 2008**). La définition originale des bactéries de la rhizosphère était limitée aux bactéries vivant librement dans la rhizosphère atmosphérique fixatrice d'azote. Rhizobia et Frankia ne sont pas considérés comme PGPR Kloepper, et ces collaborateurs (**1978**) ont signalé une stimulation de la croissance de la fixation biologique de l'azote par Rhizobium dans les nodules de légumineuses ou Frankia dans les nodules de légumineuses comme l'aulne (*alnus spp*) est loin d'être décrit comme un effet PGPR. (**Antoun et Prévost, 2005**).

La plupart des souches bactériennes utilisées comme PGPR appartiennent aux genres *Agrobacterium*, *Bacillus* et *Pseudomonas*. De nombreuses recherches se sont concentrées sur ces deux dernières bactéries, car elles sont des habitants communs de la rhizosphère et sont très actives dans le contrôle de la croissance des plantes et des maladies liées au sol selon (**Adam, 2008**).

2. Les effets directs et indirects des pgpr

Les PGPR peuvent affecter directement la croissance des plantes de plusieurs manières : en fixant l'azote atmosphérique, en synthétisant plusieurs hormones et enzymes végétales et en dissolvant des minéraux qui peuvent réguler les niveaux d'hormones végétales. Des bactéries particulières favorisant la croissance des plantes peuvent posséder une ou plusieurs de ces propriétés Mécanisme (**Compant Et al, 2005; Siddiqui, 2006**).

L'amélioration indirecte de la croissance des plantes se produit lorsque le PGPR atténue ou prévient les effets délétères d'un autre phytopathogène en produisant des sidérophores qui limitent le fer disponible pour l'agent pathogène, en produisant des antibiotiques tueurs d'agents pathogènes, des antibiotiques et en induisant une résistance systémique chez les plantes (**Fig. 03**). Le PGPR provoque également des modifications structurales de la paroi cellulaire et des

changements biochimiques/physiologiques qui conduisent à la synthèse de protéines et de produits chimiques impliqués dans les mécanismes de défense des plantes. Les PGPR ont été utilisés avec succès à des fins biologiques contre les nématodes, les champignons, les bactéries et les virus qui causent des maladies des plantes dans différentes régions du monde (Compant, 2005 ; Siddiqui 2006).

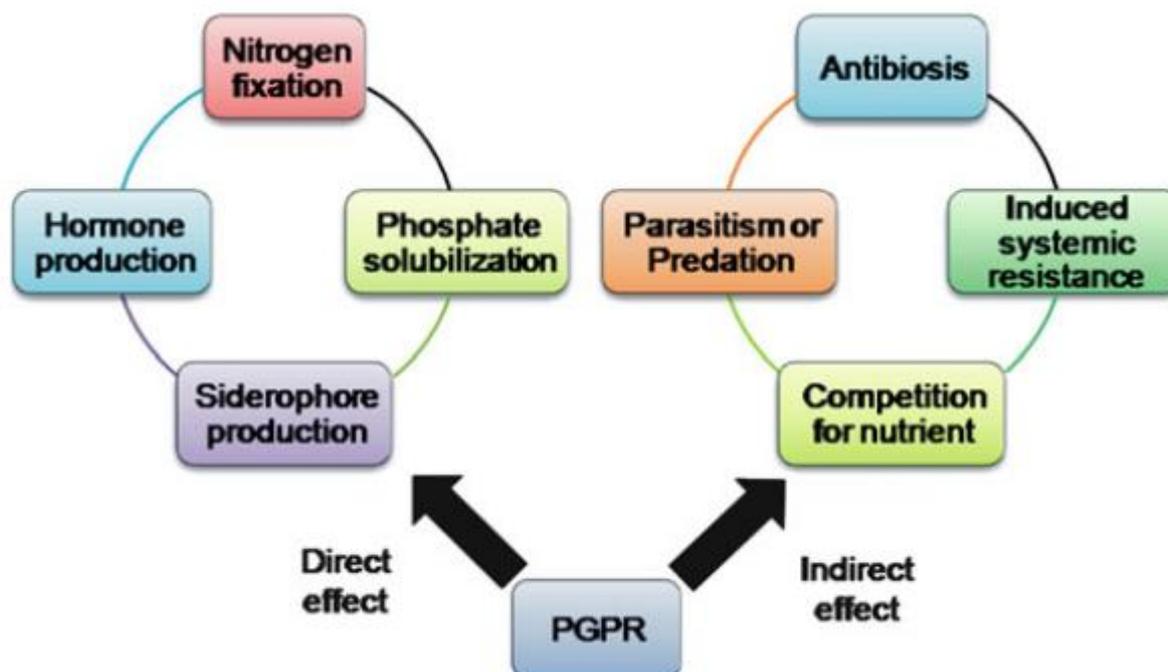


Figure 03. Quelques effets directs et indirects des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes sur la croissance des plantes (Siddiqui , 2006).

3. Mécanismes directs

En l'absence d'agents pathogènes, la production de molécules organiques entraîne la libération de nutriments et de régulateurs de croissance et leur biodisponibilité accrue dans la rhizosphère, reflétant les effets bénéfiques directs des PGPR sur les plantes. (Parray, et al, 2015).

Selon Vessey (2003), ces bactéries telluriques, situées sur ou autour des tissus végétaux stimulent la croissance des plantes par une multitude de mécanismes.

3.1 Stimulation et germination des graines

3.2. Acquisition des ressources

3.2.1. Fixation de l'azote

L'azote est souvent sous une forme gazeuse (N_2) inaccessible aux plantes et aux animaux, ou qu'aucune espèce végétale ne peut fixer l'azote atmosphérique et l'utiliser directement pour leur croissance (Pujic et Normand ,2009 ; Arora NK et al, 2012). Les PGPR les plus connus pour leur rôle de stimulation des plantes grâce à leur capacité de fixer l'azote atmosphérique sont : *Azoarcus sp.*, *Burkholderia sp.*, *Gluconacetobacter diazotrophicus*, *Herbaspirillum* ; *Azotobacter* *Paenibacillus* , qui transforment l'azote atmosphérique en ammoniac en utilisant un système enzymatique .

La rhizobia est un vaste groupe de rhizobactéries qui ont la capacité d'établir des interactions symbiotiques par la colonisation et la formation des nodules racinaires, dans lesquelles l'azote est fixé et transformé en ammoniac puis rapidement en nitrate pour le rendre disponible à leur l'hôte. La bactérie entre d'abord dans la racine et plus tard sur les nodules dans lesquelles se produit la fixation de l'azote (Munes et Mulugeta, 2013).

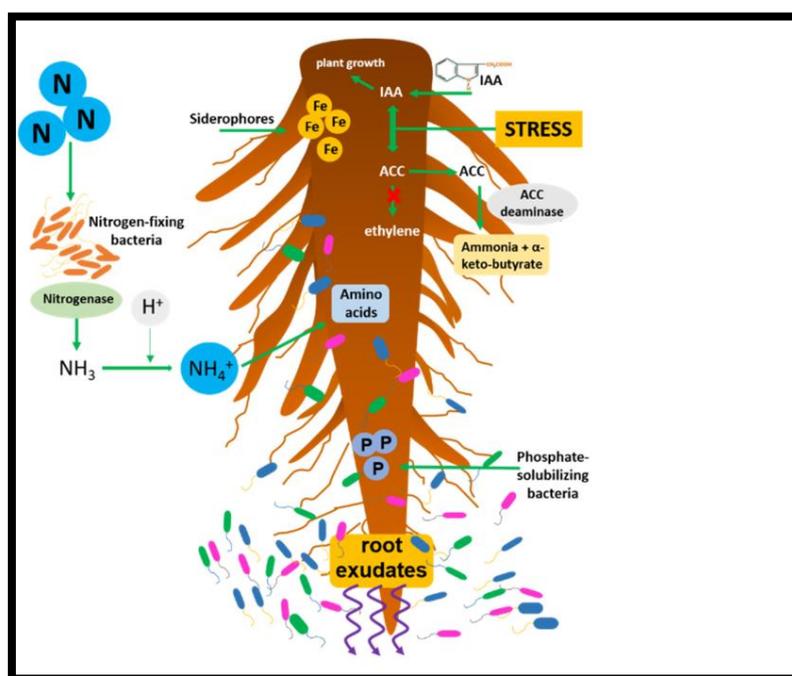


Figure 04. Schéma simplifié des principales activités du PGPR et de leurs interactions avec le système racinaire ;

fixation de l'azote, solubilisation du phosphate, absorption du fer par les sidérophores, activité ACC désaminase abaisser les niveaux d'éthylène, la production d'IAA stimulant la croissance des cellules végétales (**Vocciante et al, 2022**).

3.2.2. Solubilisations du phosphate

L'amélioration de la fertilité des sols est l'une des stratégies les plus courantes pour augmenter les rendements agricoles. En plus de la fixation biologique de l'azote, la dissolution du phosphate est également importante. Le phosphate (P) est un macronutriment essentiel pour la croissance et le développement des plantes et un important nutriment limitant la croissance.

Contrairement à l'azote, Il n'existe pas de source biologiquement disponible (**Ezawa et al ,2002**). Même dans un sol fertile, la plupart du phosphore n'est pas disponible pour les plantes et une grande quantité de phosphore existe sous forme insoluble. Les bactéries solubilisant les phosphates (PSB) sont courantes dans la rhizosphère et peuvent être utilisées pour résoudre ce problème (**Vessey, 2003**). Les micro-organismes rendent le phosphore disponible pour les plantes par la minéralisation du phosphore organique du sol et la dissolution des phosphates précipités (**Kucey et al ,1989 ; Pradhan et Sukla, 2005**). La capacité de certains micro-organismes à convertir le phosphore insoluble en une forme accessible est une caractéristique importante des PGPR. Les bactéries de la rhizosphère solubles dans le phosphate pourraient être une source prometteuse de biofertilisants agricoles (**Sharma et al, 2007**).

Le principal mécanisme de solubilisation des phosphates est la production d'acides organiques. Les acides gluconiques et 2-cétogluconique sont les plus souvent rencontrés. Les acides glycolique, oxalique, malonique et succinique, ont également été identifiés. Certaines souches sont également capables de produire des mélange d'acides lactique, isovalérique, isobutyrique et acétique. La libération de ces acides mobilisant le phosphore par l'intermédiaire d'interaction ionique avec les cations du sel de phosphate conduit à l'acidification des cellules microbiennes et de leur environnement et par conséquent la libération du phosphate sous forme ionique. L'action du phosphate assure la libération des groupements phosphate liés aux matières organiques (**Kumar et Narula 1999 ; Poole et al ,2002**).

Au sein des communautés bactériennes du sol, les espèces de *Bacillus*, *Enterobacter*, *Erwinia* et *Pseudomonas sp.* (**Subbaro, 1988**). *B. megaterium*, *Polymixa*, *Circulans*, *Coagulans*, *Subtilis*, *Sircalmous* sont les plus performantes (**Podile et Kishore, 2006**) dans la solubilisation des phosphates. Celle-ci permet à *B. megaterium*, par exemple, d'améliorer le nombre et le poids sec de nodules, le rendement des composants, la disponibilité et l'absorption

des nutriments des cultures du soja (Son, et al, 2006 ; Sharma,et al, 2007). Ainsi, la co-inoculation de Bacillus spp. Avec d'autres souches PGPR réduit la demande de phosphore par 50% sans affecter le rendement du maïs. L'inoculation par *B. megaterium* solubilisant les phosphates améliore les rendements de la canne à sucre de 12,6% (Sundra et al, 2002). Les PSB sont communes dans la rhizosphère des plantes cultivées, et quelques exemple d'associations bénéfiques comprennent *B. megaterium* et les pois chiches *B. licheniformis*, *B.megaterium* et le blé et les épinards, *Pantoea agglomerans* et la tomate (Kim et al ,1998), *Pseudomonas chlororaphis*, *P. putida* et le soja *Avena sativa* et les souches PGPR isolées de la rhizosphère de fourrage), *Serratia marcescens*, *Pseudomonas sp* et le maïs (Hameeda et al, 2008).

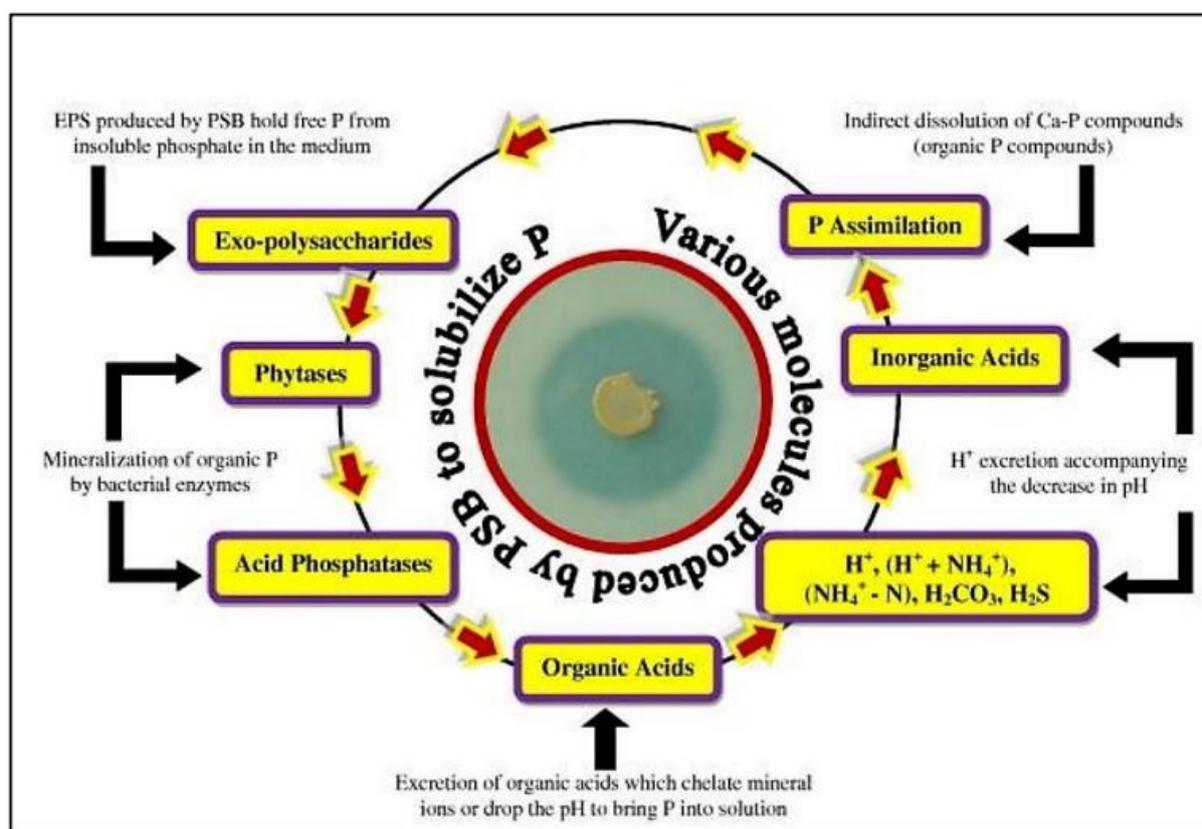


Figure 05 : Mécanismes d'actions des bactéries solubilisant les phosphates (Khan et al; Qadir ; Yaqoob ; 2009).

3.2.3. Solubilisations du potassium

Les concentrations de potassium soluble dans le sol sont généralement très faibles et plus de 90% de potassium dans le sol existe sous forme de roches insolubles et de minéraux de silicate (Parmar Et Sindhu, 2013). La carence en potassium est devenue l'une des principales contraintes à la production agricole en raison de l'application déséquilibrée d'engrais. Sans

suffisamment de potassium, les plantes ont des racines rabougries, une croissance lente, de petites graines et de faibles rendements. Les microbes du sol jouent un rôle clé dans le cycle naturel du potassium. Les micro-organismes dissolvant le potassium présents dans le sol peuvent fournir une solution alternative pour rendre le potassium disponible pour l'absorption par les plantes. (**Kumar Et Dubey, 2012**)

3.2.4. Productions des sidérophores

Le fer est un nutriment vital important pour presque toutes les formes de vie (**Neilands, 1995**). Certains PGPR produisent des sidérophores, des composés de faible poids moléculaire, typiquement inférieur à 1 kDa, qui contiennent des groupements fonctionnels capables de capter le fer en les rendant assimilables par les plantes (**Kirdi Et Zermane., 2010**).

Les sidérophores (sidéros = fer ; phoros = transport) (**Rossum ,1994**) sont des composé organique avec une affinité très élevée et spécifique pour le fer chélaté. Les sidérophores augmentent également la disponibilité du fer grâce à une forte complexation de Fe³⁺. Ces complexes restent en solution, augmentant la diffusion du fer à la surface cellulaire. Près de 500 structures sidérophores sont connues à ce jour, produites par des bactéries, des champignons et des plantes (**Boukhalfa Et Crumbliss, 2002**).

3.2.5. Productions des phytohormones

Les phytohormones sont des messagers chimiques qui affectent la capacité des plantes à répondre à leur environnement. Sans oublier qu'ils jouent un rôle important dans les réponses des plantes aux stress biotiques et abiotiques. De nombreuses études ont montré que l'utilisation d'hormones comme molécules de signalisation n'est pas seulement applicable aux plantes, mais également impliquée dans la communication entre les bactéries et d'autres micro-organismes ou ISR. Il existe cinq grands groupes d'hormones: les auxines, les gibbérellines, l'éthylène, les cytokinines et l'acide abscissique (**Porteous et al ,2006**)

3.2.5.1. Les auxines

L'auxine, la première hormone végétale découverte dans les années 1920, est synthétisée dans les bourgeons terminaux puis transportée à travers les tissus vivants jusqu'aux racines où elle s'accumule. Le rôle de ces molécules peut être résumé dans les points suivants (**Porteous et al, 2006**)

- Favorise la croissance (élongation des cellules).
- Inhibe la croissance des bourgeons latéraux (dormance apicale).
- Empêche la chute des feuilles et des fruits.
- Peut contrôler l'abscission des fruits.
- Elongation des racines et dans la prolifération des poils absorbants.
- Développement des tiges et des racines : croissance des bourgeons auxiliaires.
- Développement des fleurs et des fruits.

3.2.5.2. Les gibbérellines

Celles-ci sont produites par des champignons et des plantes supérieures, le seul groupe d'hormones végétales pouvant être caractérisées par leur structure chimique plutôt que par leur activité biologique. Les gibbérellines appartiennent à une grande famille chimique dont la structure de base est l'entakaurène. Elles stimulent l'allongement des tiges, la croissance des feuilles et des fruits, rompent la dormance des graines et des bourgeons ; les GB sont sous forme conjuguée (généralement avec du glucose) et constituent des réserves temporaires observées dans différents organes : graines de haricot, graines de tomate, graines de céréales. Les GB artificielles sont utilisés pour obtenir des fruits sans fécondation, pour induire la floraison ou pour lever la dormance de certaines graines. Les inhibiteurs de GB (anti-gibbérellines) sont utilisés pour réduire l'élongation cellulaire et donc le taux de croissance cellulaire (Mezaache, 2012)

3.2.5.3. La réduction de la production de l'éthylène

C'est un simple hydrocarbure gazeux de formule chimique $H_2C=CH_2$. Il est produit en abondance à partir de fleurs lorsqu'il fleurit et de fruits lorsqu'il mûrit. Il provoque la chute des feuilles et active généralement leur maturation. L'application d'éthéphon a divers effets (Porteous et al, 2006)

Dans des conditions de croissance défavorables, telles que la sécheresse et la salinité, la production de ce gaz augmente par les plantes, ce qui la rend plus nuisible que bénéfique. Certains micro-organismes possèdent une enzyme, l'ACC désaminase, qui régule la production d'éthylène (Mezaache, 2012)

3.2.5.4. La production des cytokinines

Sont des composés relativement simples qui agissent comme des facteurs de croissance (Singleton *et al*, 2006), principalement produits dans les racines puis transportés dans toute la plante. Ils existent au site d'action de l'AIA, peuvent interagir avec ce dernier, et sont souvent synthétisés in situ (Tsuji *et Minami*, 1987)

La première cytokinine naturelle a été extraite des graines de maïs en 1964. Les cytokinines sont principalement produites par les racines. Ils fonctionnent souvent avec d'autres hormones, en particulier l'hormone de croissance. Ils stimulent la division cellulaire et la synthèse des protéines. L'effet des cytokinines sur la croissance des fruits a été démontré chez certaines espèces (bananes, tomates, pommes). En culture in vitro, les cytokinines sont utilisées pour stimuler le bourgeonnement (Porteous *et al*, 2006)

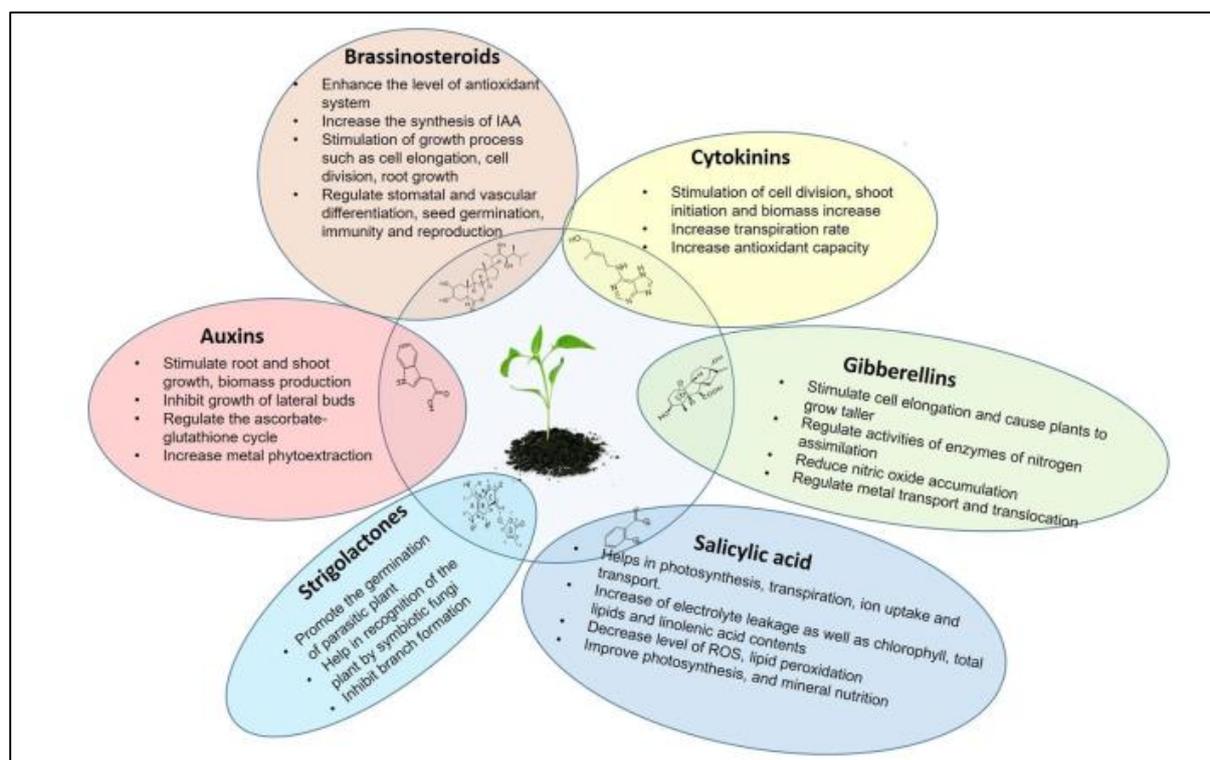


Figure 06 . Rôles importants de six phytohormones importantes dans les plantes (oksana *et al*,2018).

3.2.5.5. L'acide abscissique

Inhibe de nombreux phénomènes de croissance et de développement et prolonge la période de dormance des bourgeons et des graines. Cette hormone, parfois appelée stress ou hormone du stress, agit en contrôlant l'ouverture et la fermeture des stomates chaque fois que les

conditions environnementales de la plante ne lui sont pas favorables (froid, blessure). (Porteous ,2006)

4. Mécanisme indirect d'action des pgpr

Le principal avantage de l'utilisation des PGPR est de conférer une résistance aux maladies induites par des agents pathogènes chez les plantes. Les rhizobactéries jouent un rôle important dans la lutte contre ces agents pathogènes, où un large spectre de maladies bactériennes, fongiques et parasitaires sont inhibées par la production d'antibiotiques, la compétition (pour les nutriments, l'oxygène et l'espace), l'activation et la production de résistance systémique induite (ISR). Des enzymes (chitinase, protéase, lipase), cette protection est appelée lutte biologique. De plus, le PGPR peut être utilisé comme biofertilisant efficace pour augmenter les rendements des cultures en produisant des enzymes, etc. (cellulases, amylases, etc.) (Lugtenberg Et Kamilova ,2009 ; Glick Et *al*, 2014).

4.1. Productions des antibiotiques

La production d'antibiotiques est considérée comme l'un des mécanismes de contrôle biologique les plus puissants et les mieux étudiés des PGPR. Exemples d'antibiotiques produits par PGPR: l'acide phénazine-1-carboxylique l'oomycineA, les rhamnolipides (Shilev, 2013)

- L'acide phénazine-1-carboxylique est sécrété par la souche 2-79 de *Pseudomonas fluorescens*, qui synthétise l'acide phénazine-1-carboxylique (PCA), un pigment qui inhibe l'antibiotique *G. graminis* var. Le blé et d'autres agents pathogènes racémiques sont inférieurs à (1 g/ml) in vitro, et 2-79 mutants déficients en production de PCA (Phz-) ne parviennent pas à inhiber *G. graminis* var. Les tritici et leur capacité à inhiber le piégeage sont considérablement réduits, tandis que des mutants génétiquement restaurés pour la production de PCA (Phz+) coordonnent l'activité antifongique agrégée in vitro et sur le blé. Ces résultats suggèrent fortement que le contrôle de l'absorption par la souche 2-79 est principalement dû à la production de PCA dans la rhizosphère du blé. Les efforts visant à déterminer le rôle des antibiotiques dans la lutte biologique ont toujours été entravés par le manque de preuves directes que les antibiotiques sont présents dans les sols naturels qui peuvent inhiber la maladie. Les limitations physiques et biologiques de la production, de l'activité et de la détection des antibiotiques dans le sol ont été passées en revue, dont les plus fondamentales peuvent être les carences en éléments nutritifs. Les sols amendés ou

traités avec des nutriments organiques pour augmenter la disponibilité des nutriments soutiennent souvent la production d'antibiotiques (**Linda S et al, 1990**).

- L'oomycineA : Ce dernier est responsable de la capacité de *Pseudomonas* à réduire l'infection des racines du coton par *Pythium* de 70% et d'augmenter le taux d'émergence des graines de coton de 50% (**Shilev, 2013**).
- Les rhamnolipides : *Pseudomonas aeruginosa* produit et sécrète des biosurfactants glycolipidiques contenant du rhamnose appelés rhamnolipides. La production de rhamnolipides dépend de voies métaboliques centrales, telles que la synthèse des acides gras et l'activation des sucres par le dTDP, et des enzymes impliquées dans la production de l'alginate d'exopolysaccharide. La synthèse de ces surfactants est régulée par un système de régulation génétique très complexe qui contrôle également divers traits associés à la virulence de *P. aeruginosa*. Les rhamnolipides ont une variété d'applications industrielles et environnementales potentielles, y compris la production de produits chimiques fins, la caractérisation des surfaces et des revêtements de surface, les additifs d'assainissement de l'environnement et les agents de contrôle biologique. (**Maier et Soberón- Chávez, 2000**).

Ces antibiotiques sont connus pour posséder des activités antivirales, antimicrobiennes, anti-inflammatoires, anti-oxydantes, cytotoxiques, anti tumorales et agissant également sur la croissance de plantes (**Kim, 2012**).

4.2. Composé volatiles

La communauté scientifique définit les composés organiques volatils (COV) par un ensemble de caractéristiques. Pour être défini comme un COV, il doit s'agir d'un composé organique de faible poids moléculaire, de pression de vapeur assez élevée pour s'évaporer et entrer en phase gazeuse à température et pression atmosphériques normales (**Dicke et Loreto, 2010 ; Huang et al, 2015**). Les COVs ont généralement aussi une faible solubilité dans l'eau et une odeur distincte (**Herrmann, 2010**). La source de COV peut être d'origine humaine ou biologique (**Baghi, 2013**).

Les COVs naturels sont des métabolites secondaires principalement émis par les plantes, les insectes et les microorganismes. Toutes les émissions naturelles représentent près de 90 % des émissions totales de COVs (**Potard, 2017**). L'ammoniac est un inhibiteur de certains microorganismes pathogènes. Il est produit comme intermédiaire dans le catabolisme des acides.

CHAPITRE

III

MATERIELS ET METHODES

Objectif de l'expérimentation

L'objectif de ce travail l'étude de l'effet des bactéries rhizosphériques de l'alfa (*stipa tencissima* L) sur la croissance de pois chiche (*cicer arietinum*. L).

1. Présentation du site de l'essai

Cet essai a été réalisé sur un site expérimental qui se trouve au niveau de la serre et aussi au laboratoire au niveau de Faculté des Sciences Exactes et Sciences de la Nature et de la Vie de l'Université d'El Arbi Tebessi – Tébessa.

2. Matériel

2.1 Matériel végétal

2.1.2 *Cicer arietinum* L

Les graines utilisé dans l'expérimentation sont de la variété de : FLIP 84.92C.

2.1.2.1 systématiques du *Cicer arietinum* L

Règne	Plantae
Embranchement	Spermatophytes
Classe	Dicotylédones
Sous classe	Rosidae
Ordre	Fabales
Famille	Fabaceae
Sous famille	Papilionacées
Genre	Cicer
Espèce	Cicer arietinum L
Noms vernaculaire	Pois chiche

2.1.2.2 Les caractéristiques du *Cicer arietinum* L

- Plante annuelle à cycle court (6 à 7 mois),
- A feuilles composées et aux fleurs blanches ou roses pourpres. C'est une espèce autogame quasi stricte et ses gousses peuvent contenir 1 à 3 graines.
- Sa croissance est de type indéterminé, interrompue en général par les conditions sèches en fin de cycle. En situation fraîche et plus humide.

- Elle est capable de fixer l'azote atmosphérique (si associé à son rhizobium spécifique) et ne nécessite pas d'apport d'engrais azoté.
- Les fleurs sont sensibles aux températures fraîches (moyennes inférieures à 15°C), qui entraînent des coulures et une mauvaise nouaison (gousses sans graines).
- La teneur en protéines du pois chiche varie de 17 à 23 %. Sa graine, bien pourvue en lysine, contient 5 à 6 % de matières grasses, sensiblement plus que toutes les autres légumineuses à graines riches en amidon.

2.1.2. Isolement des bactéries

L'isolement des bactéries été fait par le groupe du Dr. Ahmed Dakkak et l'étudiante de doctorat Akrouit Khaoula.

3. Méthode

3.1 Stérilisation des graines

Les graines ont été débarrassées de leurs valves fructifères et ont subis le protocole de stérilisation suivant (**Fatana, 2007**).

- 1) Trempage dans un bain d'éthanol à 95% pendant quelques secondes.
- 2) Trempage dans un bain d'eau de Javel à 5% pendant 15 minutes.
- 3) Ensuite rincées 3 fois successifs dans des bains d'eau distillée stérile pendant 10 minutes et laissées sécher.

3.2 Préparation du sol

Le substrat de notre essai se compose d'un mélange de sable et de terreau industriel à des proportions respectives de (1V/2V). Avant de l'utiliser, le sable subis plusieurs opérations de préparation, en premier lieu, il a été tamisé afin d'éliminer les débris végétaux et animaux, pour obtenir du sable fin. Puis rincé abondamment à l'eau de robinet, le sable est ensuite rincé plusieurs fois à l'eau distillé et séché à l'air libre (**Aoumeur, 2012**). Ce mélange est stérilisé dans un autoclave pendant 45 minutes.

3.4 DISPOSITIF EXPEREMENTALE

Les graines de *Cicer arietinum L* sont mises en germination dans des pots en plastique, 10 graines pour chaque pot à 1 cm de profondeur. Des pots contenant de sol contaminé par le

plomb (800 ppm) et d'autres pots contenant de sol contaminé par le cadmium (12 ppm). Le sol inoculé par des bactéries isolées de la rhizosphère de *stipa tenacissima* avec trois répétitions pour chaque traitement selon le codage indiqué dans le tableau suivant. Les graines ont été irriguées avec 100 ml de l'eau distillée chaque deux jour pendant un mois. L'essai a été réalisé dans une serre avec des conditions semi contrôlés.

So → Sol + Eau distillé

S_{Cd} → Sol + Cadmium (12 ppm)

S_{CA+ Cd} → Sol + Consortium A bactéries isolées des racines de *Stipa tenacissima*) + Cd

S_{CB+ Cd} → Sol + Consortium B (bactéries isolées du sol de *Stipa tenacissima*) + Cd

S_{(CA x CB) + Cd} → Sol + Consortium A + Consortium B + Cd

S_{Pb} → Sol + Plomb (800 ppm)

S_{CA+ Pb} → Sol + Consortium A + Pb

S_{CB+ Pb} → Sol + Consortium B + Pb

S_{(CA x CB) +Pb} → Sol + Consortium A + Consortium B + Pb



Figure 07. Remplissage des pots (Aoulmi et Hamdi; 2022).

3.5 L'irrigation

L'arrosage est effectué chaque jour pendant une semaine et puis trois fois par semaine par l'eau distillée.



Figure 08. Le dispositif expérimental. (Aoulmi et Hamdi; 2022).

3.6 Méthodologie et mesures effectuées

3.6.1 Paramètres morphologiques

3.6.1.1 La longueur de la plante (partie aérienne et partie racinaire).

Vers la fin du traitement on enlève chaque plante du pot et on sépare la partie aérienne de la partie racinaire, on les lave et on procède à la mesure de la longueur de la partie aérienne et souterraine avec une règle graduée.



Figure 09. Plante de *cicer arietinum* L traité avec rhizobacterie en présence du plomb. (Aoulmi et Hamdi; 2022).



Figure 10. Plante de *cicer arietinum L* traité avec rhizobactérie en présence du cadmium.
(Aoulmi et Hamdi; 2022).

3.6.1.2 Le poid frais et le poid sec

A l'aide d'une balance nous avons mesuré le poids frais de la partie aérienne (tiges et feuilles) et le poids sec de la partie racinaire.



Figure 11. Balance (Aoulmi et Hamdi; 2022).

3.6.1.3 La biomasse végétale

Nous devons convertir le poids sec en pourcentage :

Poids frais (g) _____ > 100%

Poids sec (g) _____ > X ?

$$x = (\text{poids sec} / \text{poids frais}) * 100$$

3.6.1.4 surfaces foliaires

La surface foliaire (SF) est déterminée selon la formule décrite par **Bezzala (2005)**.

$$SF = (\pi \times a \times b)/4$$

SF : Surface foliaire en (cm²).

a : La longueur de limbe en (cm).

b : La largeur de limbe en (cm).

3.6.2 Les paramètres biochimiques

3.6.2.1 La teneur en chlorophylle

La mesure du taux de chlorophylle des feuilles a été effectuée avec un chlorophylle-mètre.



Figure 12. chlorophylle-mètre cm 200 plus (Aoulmi et Hamdi; 2022).

3.6.2.2 Dosages des protéines solubles :

La méthode retenue pour le dosage des protéines totales est celle de **Brad Ford (1976)** qui Utilisé la BSA (Sérum d'Albumine de Bovin) comme standard.

- Elle consiste à prendre **10 mg** Du matériel végétal, chaque échantillon est broyé avec **5 ml** d'eau distillée puis filtré et versé dans un tube à essai en plastique contenant **5 ml** d'eau distillée.
- Pour la préparation du réactif : prélèvement de **0,1 mg** du BBC (bleu de coomassie) ensuite on ajoute **50 ml** d'éthanol à **95%** puis le mélanger pendant 2 heures puis on ajoute **100 ml** d'acide orthophosphorique **85 %** mettre le mélange pendant 2 heures ensuite on ajoute l'acide orthophosphorique **85 %** en utilisant pas plus de 1L d'eau distillé à la fin.

- Pour le dosage on prend **0,2 ml** de réactif de Brad Ford avec **0,2 ml** de la solution à analyser et **1,6 ml** d'eau distillée (bien agiter au vortex). Parallèlement, il est préparé un essai de contrôle en utilisant **0,2 ml** d'eau distillée; après 5min à une heure on procède à la lecture de l'absorbance à **595 nm**.

Les lectures du dosage ont été faites par spectrophotomètre à une longueur d'onde de **595nm**.

La teneur en protéines est calculée selon la formule suivante :

$$\text{La teneur en protéines} = (\text{DO} - 0.0143 / 0.0041) \times 10$$



Figure 13. Réactif de Bradford (Aoulmi et Hamdi; 2022).



Figure 14. Dosage de protéine solubles de la partie aérienne et de la partie racinaires du *cicer arietinum L* (Aoulmi et Hamdi; 2022).

3.6.2.3 Dosages des sucres solubles totaux :

Les sucres solubles totaux (saccharose, glucose, fructose, leurs dérivés méthyles et les polysaccharides) sont dosés par la méthode de **(Dubois et al, 1956)**.

- Elle consiste à prendre **100 mg** de matériel végétal, dans des tubes à essai, on ajoute **3 ml** d'éthanol à **80%** pour faire l'extraction des sucres, puis on laisse à température ambiante pendant **48 heures**.
- Au moment du dosage les tubes sont placés dans l'étuve à **80°C** pour faire évaporer l'alcool. Dans des tubes en verre propres, on met 2 ml de la solution à analyser, on ajoute **1 ml** de phénol à **5%** ; on ajoute rapidement **5 ml** d'acide sulfurique concentré **96%** ($d = 1,86$) tout en évitant de verser de l'acide contre les parois de tube, on passe au vortex pour homogénéiser la couleur de la solution. On laisse les tubes pendant **10 min** et on les place au bain-marie pour 10 à 20 min à une température de **30°C**. A ce moment-là l'absorbance est lue à une longueur d'onde de **585 nm**.

Calculez la teneur en sucre à l'aide de la formule suivante :

$$\text{La teneur en sucres} = (\text{DO} + 0.0332 / 0.0022) \times 30$$



Figure 15. Dosage des sucres solubles. (Aoulmi et Hamdi; 2022).

3.3. Analyse physique du sol

3.3.1 Mesure de Ph

La mesure de pH consiste à homogénéiser 5 g de sol dans 20 ml d'eau distillée. Après agitation, à l'aide d'un homogénéiseur pendant 15 minutes et décantation le pH du surnageant est déterminé.

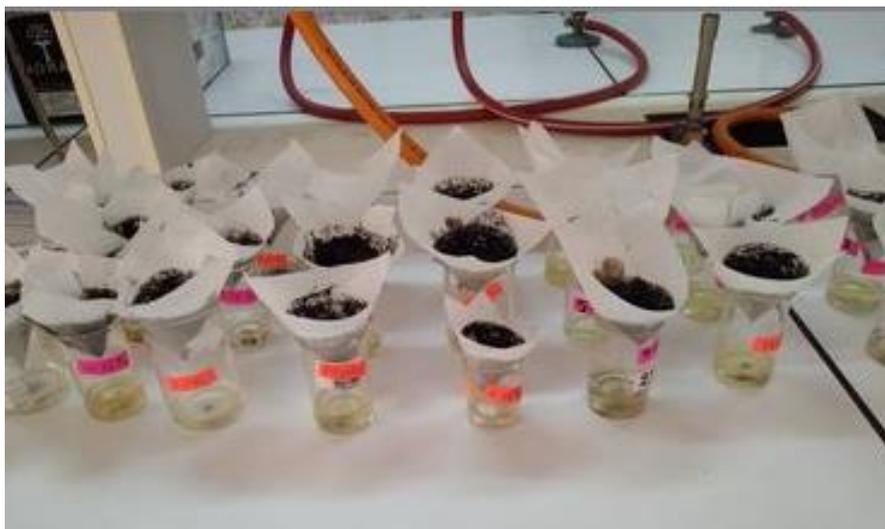


Figure 16. Filtration du sol (Aoulmi et Hamdi; 2022).

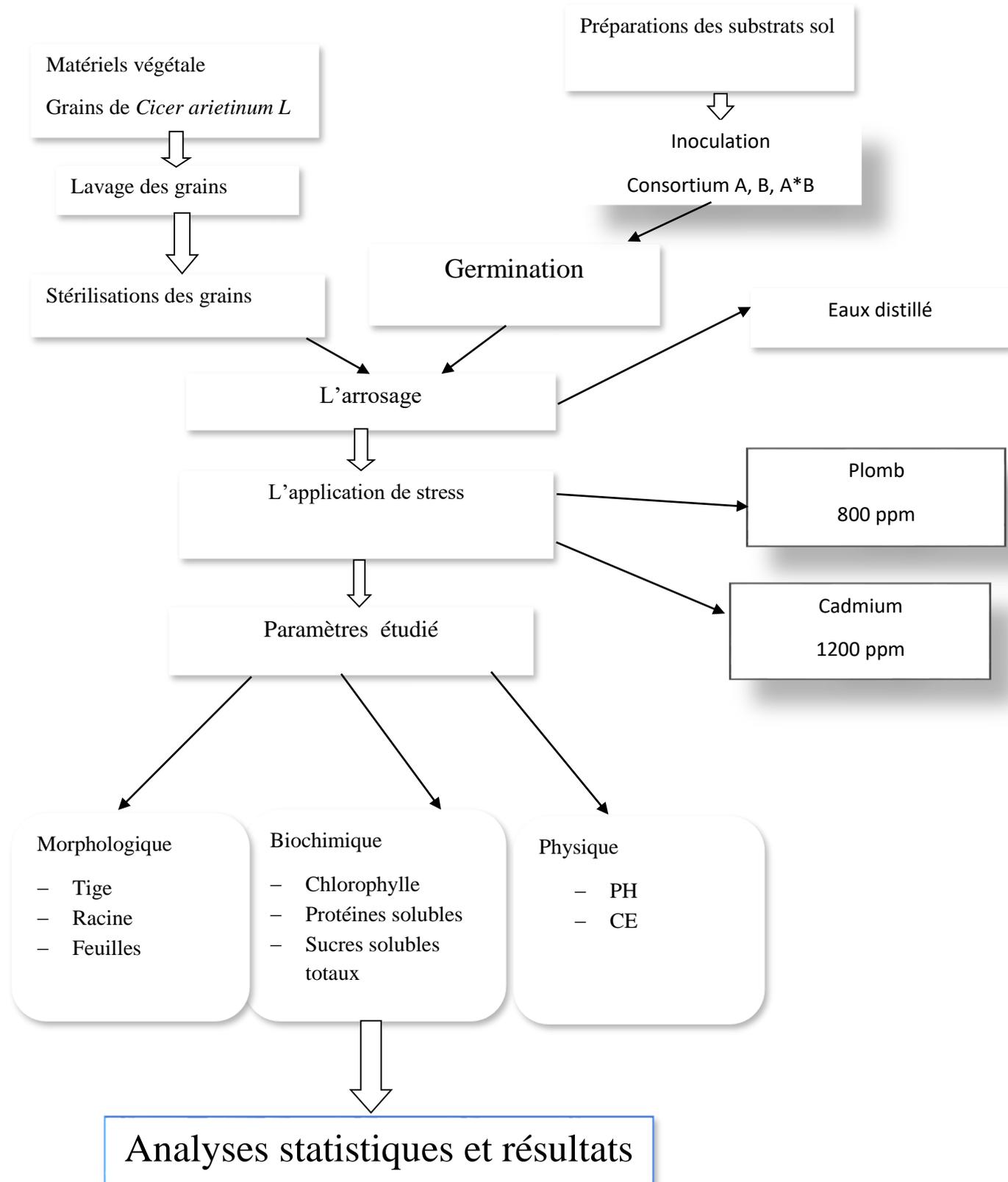
3.3.2 Mesure de la conductivité

La CE permet de déterminer la salinité d'un sol. Elle s'effectue à partir de l'extrait du sol dilué au 1/5 dans l'eau distillée en homogénéisant 10g de sol/ 50 ml H₂O. Après agitation (30mn) et décantation, la CE de l'extrait est mesurée à l'aide d'un salinomètre (Hanna HI 9032). Les résultats sont exprimés en mS/cm.

4. l'analyse statistique

Traitement de données et analyse statistique

Les données sont calculées sous forme d'une moyenne de 3 répétitions à l'aide du tableur EXCEL 2007 et les graphiques également réalisés à l'aide du même tableur. Les données recueillies pour l'ensemble des caractères étudiés ont été soumises à une analyse de la variance avec le logiciel XLSTAT. L'analyse de la variance effectuée est à un critère de classification (facteur traitement) et à deux critères de classification (facteur traitement et facteur organe). Les moyennes sont comparées à l'aide du test de Dunett dans le cas de l'ANOVA 1 et à l'aide du test de Tukey dans le cas de l'ANOVA2, lorsque cela est nécessaire (différences au moins significatives).



CHAPITRE

IV

Résultat Et Discussion

Résultat et discussion

1. Effet de la co-inoculation avec des PGPR sur la Longueur de la partie aérienne de *Cicer arietinum* L.

L'analyse de la variance du tableau 1 a révélé une différence très hautement significative ($P < 0,001$) sur la Longueur de la partie aérienne du *cicer arietinum* L.

Tableau 01. Analyse de variance de longueur de la partie aérienne du *cicer arietinum* L.

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	8	917,119	114,640	11,559	< 0,0001
Erreur	18	178,518	9,918		
Total corrigé	26	1095,637			

D'après la **figures 17** la Longueur de la partie aérienne du témoin est de (10,99 cm elle augmente de façon significatif pour les sols contaminé par (plomb et cadmium) inoculé par le **consortium a** et aussi **consortium b**.

On marque une augmentation très hautement significatif sur la Longueur de la partie aérienne pour les sols stressé par le plomb et traité par le **consortium a** et aussi le **consortium b** atteint a (25,33 cm \pm 4,149) et (25,13 cm \pm 2,350) respectivement et tandis que nous observons une augmentation non significatif pour les sols traité par l'interaction entre le **consortium a** et le **consortium b**.

La longueur de la partie aérienne s'élève avec un effet hautement significatif pour les sols pollué par le cd et traité sous l'influence des **consortium a** et **consortium b** et (**consortium b*consortium a**) atteignant (22,66 cm \pm 3,403), (27,233 \pm 2,616) ,(21,27 \pm 4,837) respectivement comparé au témoin .

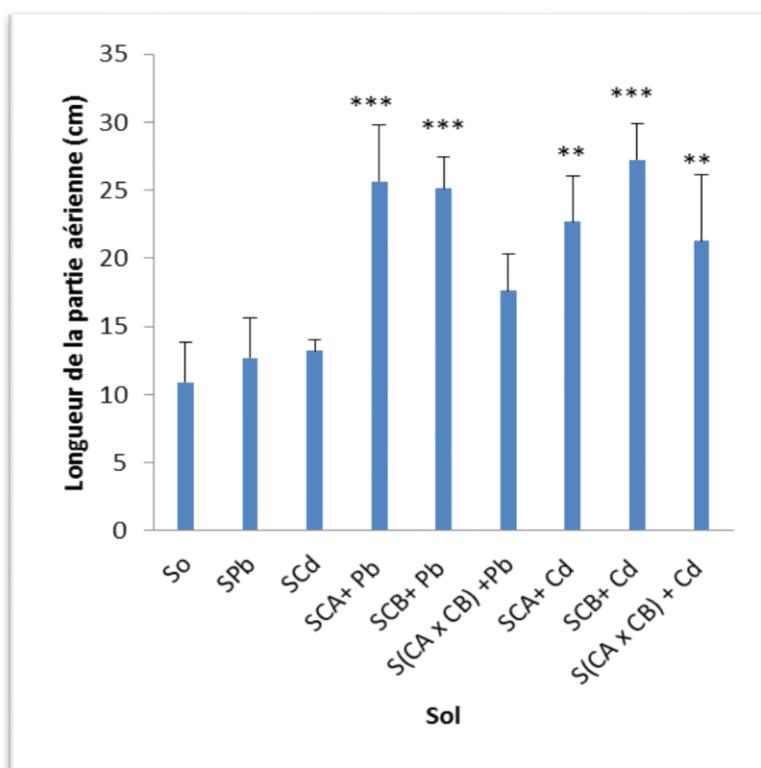


Figure 17. Effet de la co-inoculation avec des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR) sur la Longueur de la partie aérienne des plantes de *Cicer arietinum* L, cultivées dans des conditions contrôlées.

2. Effet de la co-inoculation avec des PGPR sur Longueur de la partie racinaire de *Cicer arietinum* L.

L'analyse de variance du (**tableau 2**) montre aucune différence significatif ($p < 0,05$) sur la partie racinaires du *cicer arietinum* L.

Tableau 02. Analyse de variance de la longueur de la partie racinaire de *cicer arietinum* L.

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	8	109,426	13,678	3,581	0,012
Erreur	18	68,756	3,820		
Total corrigé	26	178,183			

Les résultats exprimé dans la **figure 18** nous montre aucun effet significatif pour les sols pollué par les métaux lourd (plomb et cadmium) avec l'inoculation des **consortium a** et **consortium b** par rapport au témoin.

La longueur des racines diminue non significativement pour les sols contaminés par le plomb et l'influence des traitements **consortium a** et **consortium b** comparé aux témoins ce dernier est de (9,33 cm \pm 2,930).

Une augmentation légère non significatif de la longueur des racines est marqué chez les sols contaminé par le cadmium avec l'inoculation du **consortium a** en revanche on observe une faible diminution non significatif pour les sols contaminé par le cadmium et inoculé par le **consortium b** et interaction entre **consortium a** et **consortium b** comparativement au sol témoin.

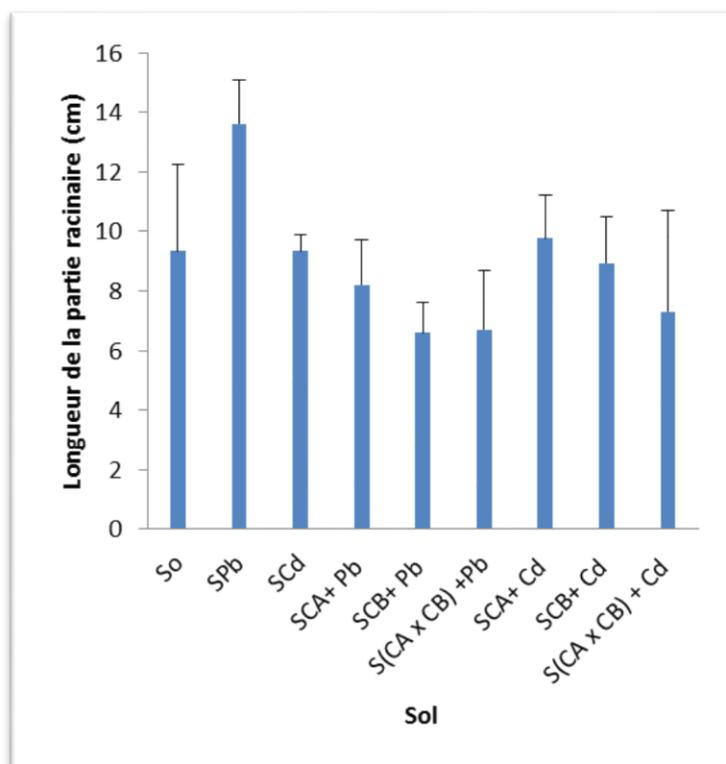


Figure 18. . Effet de la co-inoculation avec des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR) sur la Longueur de la partie racinaire de *Cicer arietinum* L, cultivées dans des conditions contrôlées.

3. Effet de la co-inoculation avec des PGPR sur la surface foliaire de *Cicer arietinum* L.

L'analyse de variance du **tableau 03** a révélé de différence non significatif ($p > 0,05$) sur la surface foliaire du *cicer arietinum* L.

Tableau 03. Analyse de variance de la surface foliaire du *cicer arietinum* L.

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	8	0,078	0,010	0,745	0,652
Erreur	18	0,236	0,013		
Total corrigé	26	0,314			

Les mesures de la surface foliaire chez les sols contaminé par le plomb et l'inoculation des **consortium a** et **consortium b** ont marqué une réduction faible non significatif arrive a ($0,28 \text{ cm}^2 \pm 0,139$) pour les sols inoculées par le **consortium a** et de ($0,30 \text{ cm}^2 \pm 0,017$) pour les sols inoculées par le **consortium b** par rapport au sol témoins (**figures 19**).

En revanche les mesures de la surface foliaire chez les sols traite pollué par le cadmium montre une augmentation légère de façon non significatif sous l'influence de différents traitement (**consortium a** , **consortium b** , **consortium a *consortium b**).atteint a ($0,35 \text{ cm}^2 \pm 0,80$) , ($0,40 \text{ cm}^2 \pm 0,05$) , ($0,39 \text{ cm}^2 \pm 0,18$) respectivement .

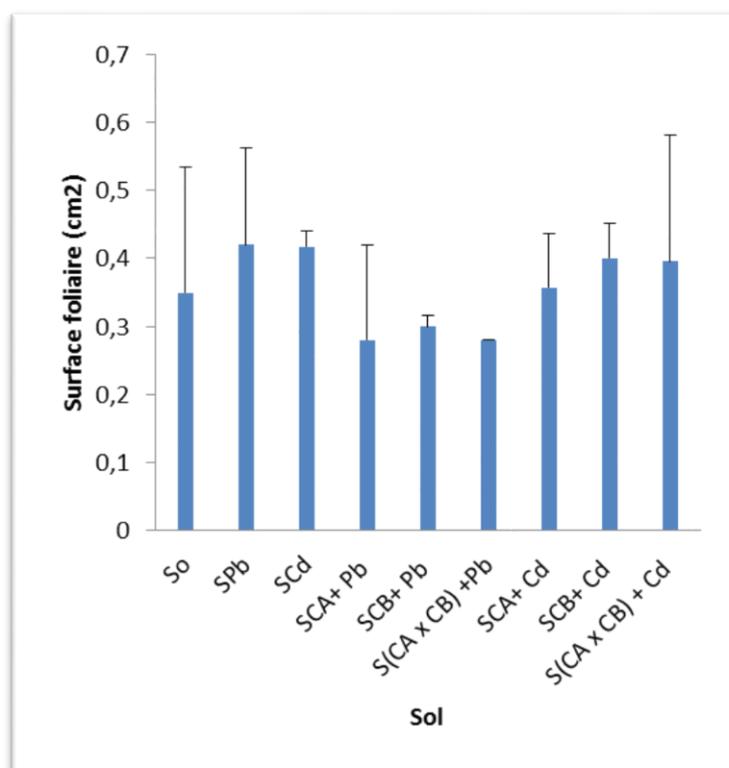


Figure 19. Effet de la co-inoculation avec des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR) sur la surface foliaire des plantes de *Cicer arietinum* L, cultivées dans des conditions contrôlées.

4. Effet de la co-inoculation avec des PGPR sur le teneur de chlorophylle de *Cicer arietinum* L.

Le test de kruskal Wallis **tableau 4** montre une différence hautement significatif ($p=0,01$) sur la teneur de chlorophylle de *cicer arietinum* L.

Tableau 04. Test de kruskal-Wallis de la teneur en chlorophylle du *cicer arietinum* L.

K (Valeur observée)	20,037
K (Valeur critique)	15,507
DDL	8
p-value (bilatérale)	0,010
alpha	0,05

D'après la (**figure 20**) la teneur de la chlorophylle s'abaisse de manière très hautement significatif pour les sols contaminés par le plomb avec les différents traitements car on marque une diminution forte pour les sols inoculés par les **consortium a** de valeur atteinte à ($0,73 \text{ ccl} \pm 0,208$), pareil pour les sols inoculés par les **consortium b** et les sols traités sous l'influence de

l'inoculation de l'interaction entre **consortium a** et **consortium b** comparativement au témoin ce dernier a atteint a ($1,26 \text{ ccl} \pm 0,252$).

Nous notons une réduction très hautement significatif de la teneur de chlorophylle chez les sols contaminé par le cadmium et traité avec l'inoculation des **consortiums a** et aussi le traitement du **consortium b** et le traitement (**consortium a*b**) arrivé a ($0,567 \text{ ccl} \pm 0,058$) ($0,567 \text{ ccl} \pm 0,058$) ($0,533 \text{ ccl} \pm 0,058$).

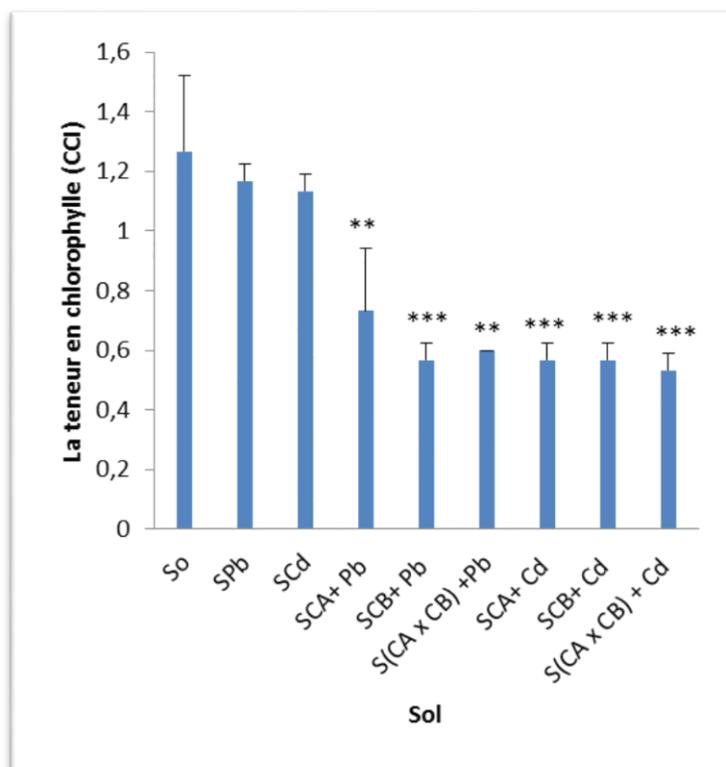


Figure 20. Effet de la co-inoculation avec des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR) sur le teneur en chlorophylle des plantes de *Cicer arietinum* L, cultivées dans des conditions contrôlées.

Tableau 05. ph et conductivité des sols de *cicer arietinum L.*

	PH	Sol	Conductivité	Qualité des sols
So	6,873±0,155	Neutre	687,000±43,486	Légèrement salé
SCd	6,887±0,040	Neutre	628,333±70,784	Légèrement salé
Sca+cd	7,023±0,064	Neutre	632,444±40,995	Légèrement salé
Scb+cd	7,010±0,056	Neutre	682,444±79,977	Légèrement salé
S (ca*cb) +cd	6.633±0,352	Neutre	673,000±59,573	Légèrement salé
Spb	6,657±0,356	Neutre	586,667±59,366	Légèrement salé
Sca+pb	6,790±0,311	Neutre	774,000±71,840	Légèrement salé
Scb+bb	7,020±0,072	Neutre	756,667±94,007	Légèrement salé
S (ca*cb)+pb	7.153±0,216	Neutre	688,222±82,186	Légèrement salé

5. Effet de la co-inoculation avec des PGPR sur le poids frais de *Cicer arietinum L.*

L'analyse de la variance a deux facteur de classification présenté dans le (tableau 05) représente une différence hautement significatif ($p < 0,01$) sur le poids frais de traitement appliqué de sol et une différence hautement significatif ($p < 0,01$) de l'organe et une différence hautement significatif ($p \leq 0,05$) pour sol*organe.

Tableau 06. Analyse de la variance à deux facteurs de classification du poids frais de *cicer arietinum L.*

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Sol	8	1,876	0,234	3,222	0,007
Organe	1	5,685	5,685	78,117	< 0,0001
Sol*Organe	8	2,318	0,290	3,982	0,002

D'après la **figure 21** le poids frais de la partie aérienne de témoins est de 0,84 g cette valeur augmente de manière non significatif pour le partie aérienne des sols pollué par le plomb et inoculé par le **consortium a** et **consortium b** pour atteindre à (1,52 g ±0,33) et (1,21 g ±0,48) respectivement.

Au niveau des feuilles On marque une augmentation hautement significatif du poids frais des sols contaminé par du cadmium et inoculé par les **consortium a** atteint à $(1,87 \text{ g} \pm 0,72)$ en revanche le poids frais diminue pour les traitement des **consortium b** et interaction entre **consortium a** et **consortium b** de valeur $(1,04 \text{ g} \pm 0,43)$ et $(1,23 \text{ g} \pm 0,48)$.

Une diminution non significative est marquée pour le poids frais des racines des différents traitements.

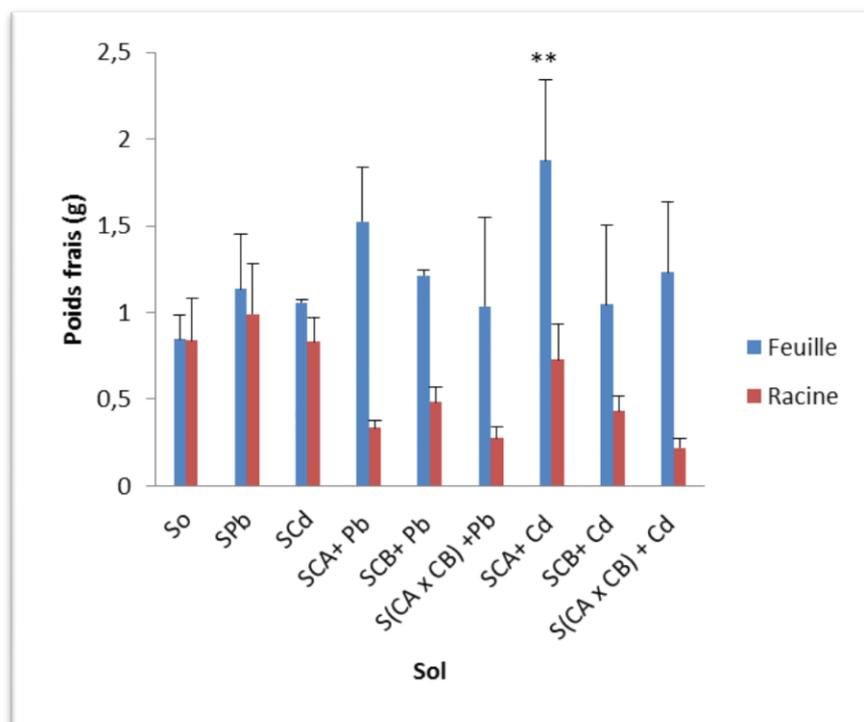


Figure 21. Effet de la co-inoculation avec des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR) sur le poids frais des plantes de *Cicer arietinum* L, cultivées dans des conditions contrôlées.

6. Effet de la co-inoculation avec des PGPR sur le poids sec de *Cicer arietinum* L.

L'analyse de la variance a deux facteurs de classification présenté dans le (tableau 06) a révélé une différence hautement significatif ($p < 0,01$) sur le poids sec du traitement appliqué au sol, et une différence très hautement significatif ($p < 0,01$) de l'organe, une différence significatif ($p \leq 0,05$) de l'interaction sol*organe.

Tableau 07. Analyse de la variance à deux facteurs de classification du poids sec du *cicer arietinum* L.

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Sol	8	0,109	0,014	6,142	< 0,0001
organe	1	0,070	0,070	31,719	< 0,0001
Sol*organe	8	0,066	0,008	3,730	0,003

Les résultats indiqués dans la **figure 22** nous montre le poids sec au niveau feuilles des sols des témoin a atteint ($0,14 \text{ g} \pm 0,08$) ce dernier augmente de façon légère en présence du plomb traité par les **consortium a** et interaction entre les **consortium a** et les **consortium b**. est en revanche on a marqué du diminution pour celle traitée par les **consortium b**.

Chez les sols contaminé par le cadmium on marque une augmentation significatif pour le poids sec au niveau des feuilles des sols traités par les **consortiums a** d'une valeur maximal atteinte a ($0,30 \text{ g} \pm 0,15$).

Le poids sec des racines augmente de manière non significatif pour les traitements **consortium a** et interaction (**consortium a *consortium b**).

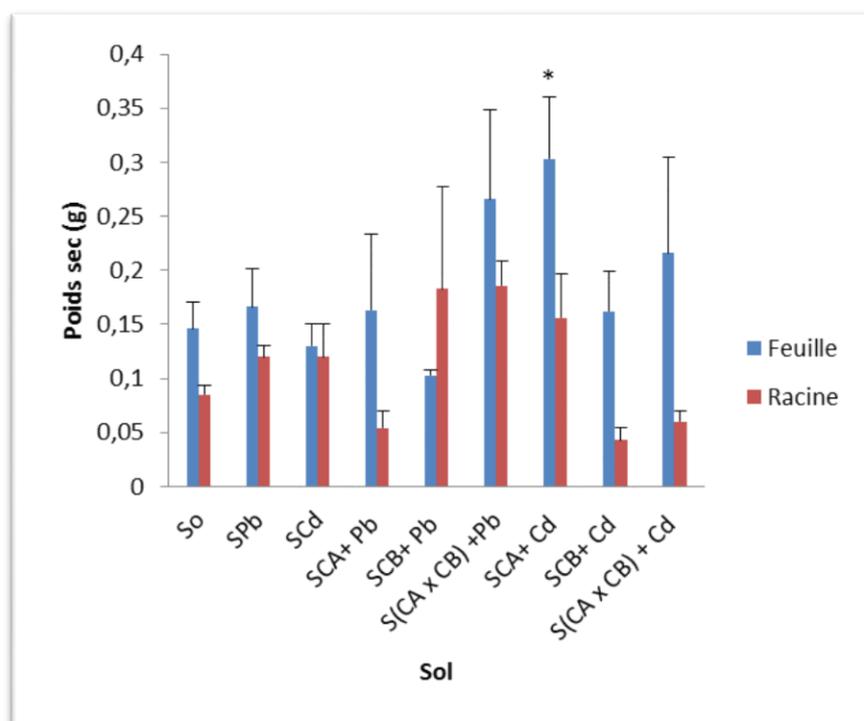


Figure 22. Effet de la co-inoculation avec des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR) sur le poids sec des plantes de *Cicer arietinum* L., cultivées dans des conditions contrôlées.

7. Effet de la co-inoculation avec des PGPR sur la biomasse végétale de *Cicer arietinum* L.

L'analyse de la variance a deux facteurs de classification présenté dans le (tableau 06) a révélé une différence hautement significatif ($p < 0,01$) sur la biomasse végétale traitement de sol et l'organe et l'interaction entre sol et organe.

Tableau 08. Analyse de la variance à deux facteurs de classification de la biomasse végétale du *cicer arietinum* L.

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
sol	8	6201,034	775,129	25,801	< 0,0001
Organe	1	1018,707	1018,707	33,909	< 0,0001
Sol*organe	8	3198,500	399,813	13,308	< 0,0001

Les résultats obtenus dans la **figure 23** montre que la biomasse végétale des feuilles diminue pour les sols pollué par le plomb et l'inoculation des **consortium a** et **consortium b**

tandis qu'on marque une augmentation pour l'interaction (**consortium a *consortium b**) marqué de $(27,66 \% \pm 6,56)$.

Nous notons une légère augmentation non significatif pour les sols contaminé par cadmium et inoculé par le **consortium a** et **consortium b**.

Une augmentation hautement significatif de la biomasse végétale des racines chez le sol pollué par le plomb et inoculé par le consortium **b** arrivé a $(36,92 \% \pm 13,72)$ et l'interaction entre (**consortium b*consortium a**) a $(69,41 \% \pm 4,81)$ par rapport au témoin.

En présence du cadmium on marque une augmentation significatif considérable de la biomasse végétale des racines pour les sols inoculé par l'interaction entre (**consortium a *consortium b**) d'une valeur atteint a $(27,77 \% \pm 4,81)$.

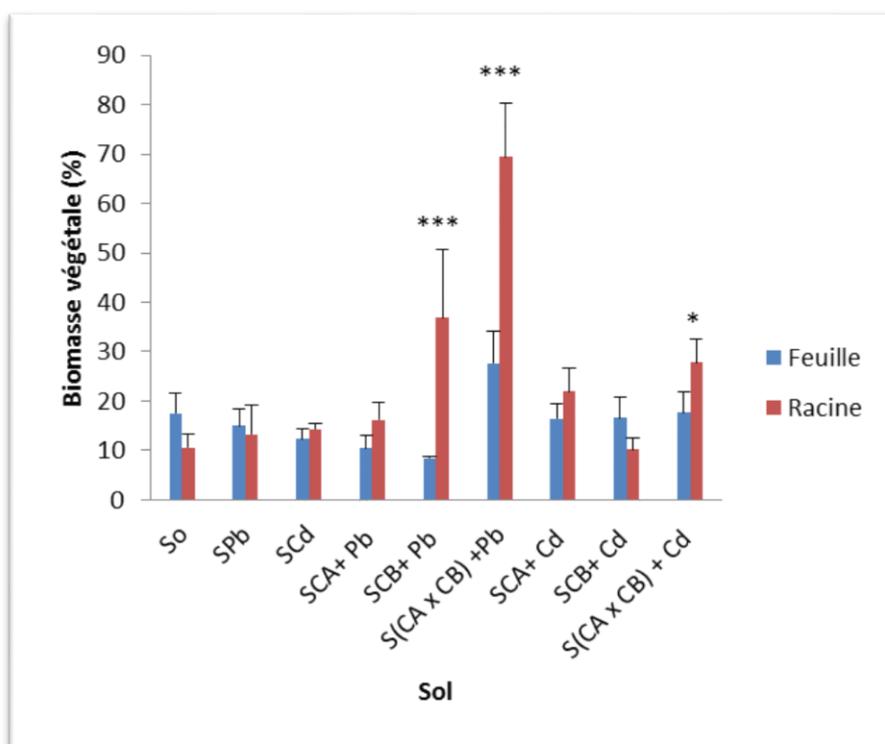


Figure 23. Effet de la co-inoculation avec des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR) sur la biomasse végétale des plantes de *Cicer arietinum* L, cultivées dans des conditions contrôlées.

8. Effet de la co-inoculation avec des PGPR sur la teneur en sucres solubles de *Cicer arietinum* L.

L'analyse de la variance a deux facteur de classification présenté dans le (tableau 06) a révélé une différence hautement significatif ($p < 0,01$) sur la teneur en sucres solubles de (traitement du sol, et l'organe, et l'interaction entre les deux dernier) de plante de *cicer arietinum* L.

Tableau 09. Analyse de la variance à deux facteurs de classification de la teneur en sucres solubles d *cicer arietinum* L.

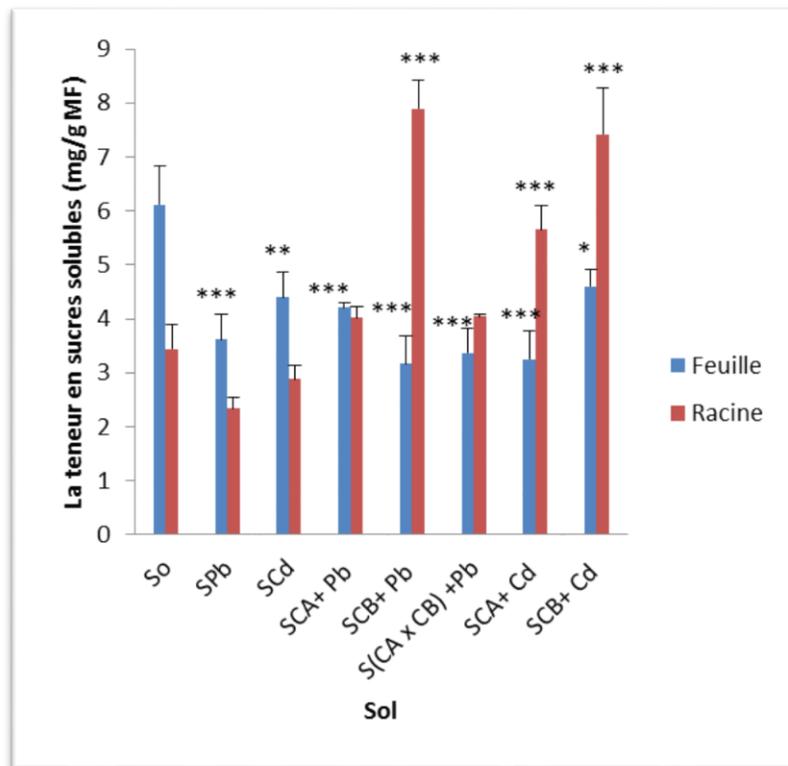
Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Sol	8	87,643	10,955	54,777	< 0,0001
Organe	1	4,653	4,653	23,267	< 0,0001
Sol * Organe	7	66,920	9,560	47,800	< 0,0001

Les résultats exprimés dans la **figure 24** montrent que la teneur en sucres solubles des feuilles du témoin est a (6,11 $\text{mg}\backslash\text{gmf} \pm 0,72$) cette teneur diminue de façons très hautement significatif pour les sols contaminate par le plomb sous l'influence de l'inoculation des **consortium a** et **consortium b** et l'interaction (**consortium a *consortium b**) avec des valeurs (4,20 $\text{mg}\backslash\text{gmf} \pm 0,08$), et (3,16 $\text{mg}\backslash\text{gmf} \pm 0,5$) et (3,37 $\text{mg}\backslash\text{gmf} \pm 0,4$).

En présence du cadmium on marque une diminution remarquable très hautement significatif la teneur pour les sols inoculé avec le **consortium a** et **consortium b** de valeur atteinte (3,24 $\text{mg}\backslash\text{gmf} \pm 0,5$) et (4,59 $\text{mg}\backslash\text{gmf} \pm 0,3$).

La teneur en sucres solubles des racines du témoin est de valeur (0,72 $\text{mg}\backslash\text{gmf} \pm 0,4$) celle-ci augment de manière significatif pour les sols contaminé par de plomb et inoculé par le **consortium b** de valeur (7,89 $\text{mg}\backslash\text{gmf} \pm 0,5$).

Pareil pour les sols traités par le cadmium on note une augmentation significatif pour les sols inoculé par le consortium atteint à (5,65 $\text{mg}\backslash\text{gmf} \pm 0,4$) et le consortium b de valeur (7,42 $\text{mg}\backslash\text{gmf} \pm 8$) comparativement au témoin.



Figures 24. Effet de la co-inoculation avec des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR) sur la teneur des sucres solubles des plantes de *Cicer arietinum* L, cultivées dans des conditions contrôlées.

9. Effet de la co-inoculation avec des PGPR sur la teneur en protéines solubles de *Cicer arietinum* L.

L'analyse de la variance a deux facteur de classification présenté dans le (tableau 06) a révélé une différence hautement significatif ($p < 0,01$) sur la teneur en protéines de (traitement de sol et l'organe et sol* organe) du *cicer arietinum* L.

Tableau 10 : Analyse de variance a deux classifications du *cicer arietinum* L cultivé dans des conditions contrôlées.

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
sol	8	150,002	18,750	41,374	< 0,0001
Organe	1	82,870	82,870	182,861	< 0,0001
Sol*organe	7	57,918	8,274	18,258	< 0,0001

La teneur en protéines solubles des feuilles augmente de manière non significatif pour les sols stressé par le plomb avec l'inoculation des **consortium a** et **consortium b** en revanche en observe une diminution forte très hautement significatif la teneur des protéines solubles des sols inoculée par l'interaction (**consortium a** * **consortium b**) de valeur ($1,41 \text{ mg} \backslash \text{gmf} \pm 0,05$) comparativement au témoin.

En présence du cadmium avec l'inoculation des traitements (**consortium a** et **consortium b**) cette teneur se réduit remarquablement d'une différence très hautement significatif pour atteindre une valeur environ ($8,01 \text{ mg} \backslash \text{gmf} \pm 0,9$).

On note une diminution non significatif de la teneur de protéines des racines des sols mise à l'effet de stress se plomb et inoculé par le **consortium a** et **consortium b** par rapport au témoin.

Une augmentation légère non significatif est note de la teneur des protéines marque pour les sols traite par le cadmium sous influence de l'inoculation des **consortiums a** et **consortium b**

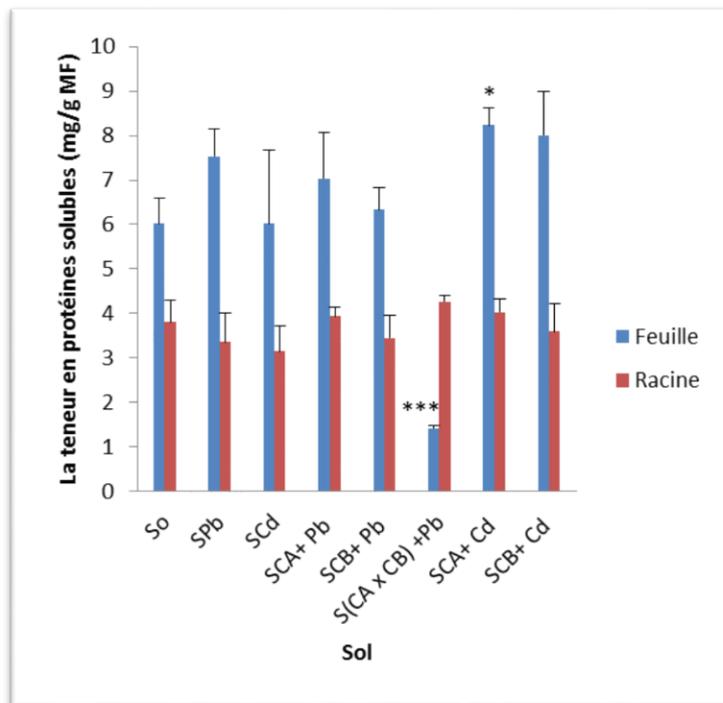


Figure 25. Effet de la co-inoculation avec des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR) sur le teneur des protéines solubles des plantes de *Cicer arietinum* L, cultivées dans des conditions contrôlées.

DISCUSSION

Les métaux lourds sont réputés pour leur toxicité sur la plupart des microorganismes telluriques. Leurs effets de dénaturation des protéines ou de destruction de l'intégrité de la membrane cellulaire affectent la croissance, la morphologie et le métabolisme de ces microorganismes telluriques (**Leita et al, 1995**) c'est pour cela qu'il existe également de nombreux travaux justifiant l'utilisation de microorganismes bénéfiques dans l'amélioration de la résistance des plantes aux stress environnementaux néfastes, par exemple, la sécheresse, les sels, la carence en éléments nutritifs, et les contaminations par les métaux lourds (**Kloepper et al , 1980 ; Lifshitz et al , 1987;Kloepper et Beauchamp, 1992; Okon et al, 1998 ; Lugtenberg et al , 2001; Glick et al, 2007**).

La bioaccumulation/biosorption des métaux lourds par les cellules microbiennes a été reconnue comme des méthodes physico-chimiques potentielles pour l'élimination des ions de métaux lourds (**Hussein et al, 2004**). La bioaccumulation est responsable de l'absorption et de la détoxification des métaux lourds. Généralement, la bioaccumulation consiste en deux processus, le premier est un « processus passif » dans lequel il n'y a aucune implication d'aucun métabolisme, simplement "biosorption", le second est le « processus actif » dans lequel l'implication du métabolisme et de l'énergie a eu lieu pour le transport et la bioaccumulation des métaux et ce sont les caractéristiques de l'organisme vivant (**Gutierrez-Corona et al, 2016; Mishra et al, 2017**). De nombreux PGPR modifient la biodisponibilité des métaux dans le sol par acidification, chélation, complexation, précipitation et réactions redox. L'accumulation ou la chélation des métaux implique certains peptides spécifiques de liaison aux métaux.

Au cours des expériences porté sur l'effet des rhizobactérie promotrice de croissance isolé de la rhizosphère de *stipa tencissima L* sur la croissance du *cicer arietinum L*, nos résultat obtenu montrent que :

La partie aérienne des sols stressé par les métaux lourds avec l'inoculation des différentes traitement (**consortium A , B , A*B**) est augmenté significativement par rapport au témoin contaminé par le (plomb , cadmium) Nos résultats rejoignent ceux de (**aydi ben abdallah et al,2016**) L'explication possible de cette croissance accrue des plantes par PGPR dans le sol contaminé par des métaux peut être attribuée à leur capacité à produire des sidérophores, à solubiliser le phosphate du sol, en plus de la capacité de *R. leguminosarum* à fixer l'azote et à la capacité des pgpr de produire une grande quantité d'IAA qui réduit le stress du métal et

DISCUSSION

conduit à une meilleure croissance et un meilleur développement. Il est bien documenté que l'ammoniac produit par les bactéries agit comme source d'azote pour la plante hôte et par conséquent augmente la biomasse végétale. De plus, la production d'IAA par les bactéries associées aux plantes dans la rhizosphère contribue grandement à la croissance des plantes dans les sols pollués par les métaux en stimulant l'allongement des racines des plantes, ce qui améliore l'absorption des minéraux et des nutriments.

Des chercheurs ont prouvé que la surface foliaire augmente avec l'inoculation des pgpr comme l'étude de (**Gholami et al , 2009**), qui fait l'inoculation du maïs avec des bactéries (*azopirillum , pseudomonas*) la surface foliaire a augmenté de 65 % par rapport aux autres non inoculés , l'amélioration pourrait être attribuée à la fixation de N₂ et au phosphate capacité de solubilisation des bactéries ainsi que la capacité de celles-ci micro-organismes pour produire des substances favorisant la croissance .

La diminution non significative des racines des sols contaminés et traités avec les (**consortium A, B , A*B**) à l'exception du sol traité par le (**consortium A**) nos résultats sont expliqués par (**Vacheron et al, 2013**), qui indique que Les PGPR peuvent aussi conduire à une modification du métabolisme racinaire de l'éthylène, par désamination bactérienne de son précurseur chez la plante (l'acide 1-aminocyclopropane carboxylique ; ACC). Cela conduit à une réduction de la concentration en éthylène dans les racines et à la répression de la croissance racinaire.

D'après (**genrich et al,2000**) il ont trouvé que la teneur du chlorophylle a augmenté contrairement à nos résultats car on a trouvé que la teneur en chlorophylle a baissé pour tous les traitements (**consortium A, B , A*B**) des 2 métaux ,il a indiqué que Dans tous les cas, les tendances observées indiquent que les bactéries de type sauvage et mutantes ont aidé la plante à pousser en présence d'un métal lourd ajouté, même si les résultats n'étaient pas toujours statistiquement significatifs. En particulier, la concentration en chlorophylle des plantes cultivées en présence de métal lourd augmentait lorsque la bactérie de type sauvage ou mutante était présente. De plus, l'élévation la plus significative de la teneur en chlorophylle dans les feuilles des plantes en présence d'un métal lourd a toujours été lorsque le mutant surproducteur de sidérophores.

DISCUSSION

Vivas *et al.* (2003) ont montré que la souche bactérienne A appartenant au genre *Brevibacillus* diminuait la quantité de Pb absorbée par les plantes, lorsqu'elle était exprimée sur la base du poids des racines. La bactérie a également augmenté la production d'IAA qui à son tour stimule la biomasse racinaire et améliore l'azote de la croissance des plantes, l'accumulation de P et la formation de nodules. Denton (2007) a rapporté que les rhizobactéries favorisant la croissance des plantes et les champignons AM stimulaient la croissance des plantes dans un sol contaminé par des métaux lourds et atténuaient les effets toxiques des métaux lourds par les sécrétions d'acides, de protéines, de phytoantibiotiques et d'autres produits chimiques, nos résultats ont noté que la poid frais et le poid sec des sols inoculés ont augmenté significativement par rapport au témoin, ils sont don soutenu par les résultats de (hadi,et bano, 2010).

Une augmentation significatif de la biomasse est noté dans le sol contaminé par le cadmium et traité par les (PGPR) trouvé que la production de sidérophores, la solubilisation des phosphates, et les activités de fixation de l'azote ont augmenté la biomasse de la vigne en présence d'une forte concentration et L'adaptabilité environnementale des bactéries résistantes au Cd, Pb et Cu du sol rhizosphérique de *Boehmeria nivea* poussant autour des raffineries minières a été évaluée par (Jiang *et al.*,2017).

La diminution des sucres solubles totaux dans les sols contaminés est a cause de la perturbation des métaux lourd des fonction des mithoconthdrie et la respiration selon (Shanker *et al.*, 2005), Sucre soluble tel que le glucose, le saccharose et le fructose sont des substances métaboliques importantes sources et jouent un rôle clé dans la signalisation cellulaire au cours de différents types de stress biotiques dont les métaux lourds, par réduire la quantité de sucre soluble qui finit par affecter la germination des graines et la croissance des semis (Rosa *et al.*, 2004). Nos résultats ont montré que les sucres soluble totaux ont diminué pour les sols contaminés au niveau des feuilles des traitements (consortium A, B, A*B), mais une élévation est marqué par au niveau des racines de tous les traitements La teneur élevée en sucres totaux et en certains bioconstituants peut être considérée comme le résultat direct du taux élevé de photosynthèse (Qurashi *et Sabri*, 2011).

De plus, l'accumulation d'acides aminés et de sucres est nécessaires pour réguler les activités osmotiques et protéger structure cellulaire des conditions de stress en maintenant la

DISCUSSION

cellule bilan hydrique et stabilité membranaire. Le PGPR promeut la croissance des plantes directement en facilitant l'acquisition d'azote, phosphore et autres éléments essentiels (**Ahmed et Kibret ,2014**).

Une augmentation significative de la teneurs des protéines soluble a été constaté pour les sols inoculés avec les consortiums par rapport au sols non inoculés ces résultats sont soutenu par les résultats de (**islam et al ,2014**) , L'explication la plus plausible d'un tel effet est que la concentration effective des métaux est diminuée en raison de l'exclusion et Del 'immobilisation de *P. aeruginosa*, ce qui supprime indirectement l'effet inhibiteur du stress oxydatif induit par le Zn sur la croissance et les activités enzymatiques. Cependant, les activités enzymatiques antioxydants dans les plantes stressées par les métaux sont très variables, selon l'espèce végétale, l'ion métallique, la concentration et la durée d'exposition, mais ces processus reflètent le statut redox modifié des cellules stressées (**Sharma et Dietz, 2008**). Il existe quelques études concernant l'activité des enzymes antioxydants chez les plantes sous inoculation de PGPR dans des conditions de stress. Normalement, les dommages oxydatifs sont contrôlés par un certain nombre de composants enzymatiques et non enzymatiques. Parmi ces SOD, le fait d'être un composant essentiel du système de défense antioxydant implique la conversion très rapide des radicaux super oxydes en H₂O₂ et joue un rôle important dans la protection des cellules contre l'effet toxique des espèces oxygénées (**Verma et Dubey, 2003**).

Au niveau physiologique une exposition au plomb entraîne de nombreuses perturbations (**Souahi et al, 2017 ; Souahi et al, 2021 ; Souahi, 2021**).

CONCLUSION

Les résultats des travaux effectués au cours de cette étude, ont montré des résultats intéressants concernant L'effet des pgpr sur la plante de *cicer arietinum L* ,En raison des mécanismes directs et indirects utilisés par PGPR, l'utilisation des microbes dans la culture des plantes d'intérêt agronomique est considérée comme un outil utile dans l'agriculture moderne et représente donc le cœur des pratiques agricoles respectueuses de l'environnement. Dans ce contexte, l'utilisation accrue des PGPR de la rhizosphère de *stipa tencissima* est l'un des voies majeures pour maintenir ou augmenter le rendement des légumineuses ainsi que réduire l'empreinte environnementale via l'élucidation des différents mécanismes impliqués qui contribueront à faire de ces rhizobactéries bénéfiques pour les plantes un partenaire précieux en agriculture pour développer des idées futures.

Bibliographie

REFERENCE

- [1]. **Abnatura RD.** (2013). Les Rhizobactéries PGPR. Bulletin Technique. Avril 2013 Issue <http://www.abnatura.com/ESW/Files/abnatura_bulletin. (Accessed 21.04.18)
- [2]. **Ahmad, I., Pichtel, J., & Hayat, S. (2008).** Plant-Bacteria Interactions: Strategies and Techniques to Promote Plant Growth. Weinheim : WILEY-VCH Verlag GmbH & Co.
- [3]. **Antoine Blanchard et Flora Limache (2005).** Les stimulateurs des défenses naturelles des plantes (SDN). DAA protection des plantes et environnement.
- [4]. **Anton, J., Pena, A., Santos, F., Martinez-Garcia, M., Schmitt-Kopplin, P., and Rossello-Mora, R. (2008).** Distribution, abundance and diversity of the extremely halophilic bacterium *Salinibacter ruber*. *Salin. Syst.* 4:15. doi: 10.1186/1746-1448-4-15
- [5]. **Antoun, H., Prévost, D., 2005.** Ecology of plant growth promoting rhizobacteria. In : PGPR: Biocontrol and Biofertilization. Siddiqui, Z.A. (ed.). Springer, The Netherlands. pp : 16-39
- [6]. **Aouar, L. (2012).** Isolement et identification des actinomycètes antagonistes des microorganismes phytopathogènes. Thèse doctorale unv, Mentouri-Constantine,
- [7]. **Arora NK , Tewari S , Singh LN , Maheshwari DK. (2012).** PGPR for protection of plant health under saline conditions, p 239-258. In: Maheshwari DK. (eds). *Bacteria in agrobiolgy: stress management*. Springer, Heidelberg, Dordrecht, London, New York
- [8]. **Aydi Ben Abdallah, R., Mokni-Tlili, S., Nefzi, A., Jabnoun-Khiareddine, H., DaamiRemadi, M., 2016.** Biocontrol of Fusarium wilt and growth promotion of tomato plants using endophytic bacteria isolated from *Nicotiana glauca* organs. *Biol. Contr.* 97, 80–88.
- [9]. **Baghi R., 2013.** Emissions biogéniques de composés organiques volatils en région méditerranéenne - développement instrumental, mesures et modélisation.
- [10]. **Ben Mbarek K., 2011.** Comportement du pois chiche (*Cicer arietinum* L.) du type kabuli vis-à-vis du stress hydrique et identification de génotypes tolérants la sécheresse. Thèse de Doctorat en Sciences Agronomiques. Université de Sousse Chott-Mariem, Tunisie ; 247p
- [11]. **Bertrand, H., C. Plassard, X. Pinochet, B. Touraine, P. Normand et J.C. Cleyet-Marel (2000).** Stimulation of the ionic transport system in *Brassica napus* by a plant growth-promoting rhizobacterium (*Achromobacter* sp.). *Can. J. Microbiol.*, 46:229–236
- [12]. **Boukhalfa H, Crumbliss AL. (2002).** Chemical aspects of siderophore mediated irontransport. *Bio Metals* .15: 325-339.

- [13]. **Bowen, G.D. and Rovira, A.D.** 1999. The rhizosphere and its management to improve plant growth. *Advances in Agronomy* 66, 1–101
- [14]. **Braun Ph., Planquaert Ph. et Wery J.,** 1988. *Le pois chiche : Utilisation*. Ed. ITCF, Montpellier, France ; 11 p.
- [15]. **Chanderasekaran.R.** (2007). Option for reducing Ascochyta blight severity in chickpea (*Cicer arietinum* L.). Thesis of Master of Science. University of Saskatchewan Saskatoon.
- [16]. **Compant S, Duffy B, Nowak J, Clement C, Barka EA** (2005) Use of plant growth promoting bacteria for biocontrol of plant diseases: principles, mechanisms of action and future prospects. *Appl Environ Microbiol* 71:4951–4959.
- [17]. **Davis PH** (1970) *Flora of Turkey and the East Aegean Islands*, vol 3. Edinburgh University Press, Edinburgh
- [18]. **Ezawa, T., SE. Smith et FA. Smith** (2002). P metabolism and transport in AM fungi. *Plant soil*, 244: 221-230.
- [19]. **Faisal Islam , Tahira Yasmeen , Qasim Ali , Shafaqat Ali , Muhammad Saleem Arif , Sabir Hussain , Hina Rizvi,** (2014), Influence of *Pseudomonas aeruginosa* as PGPR on oxidative stress tolerance in wheat under Zn stress page 291
- [20]. **Genrich I. Burd, D. George Dixon, and Bernard R. Glick** .(2000), Plant growth-promoting bacteria that decrease heavy metal toxicity in plants
- [21]. **Geoffroy Villejoubert.** (2016), Synthèse bibliographique : Conversation dans la rhizosphère – Dialogue moléculaire et diversité des interactions plantes –micro-organismes, université Paul Savatier ,Toulouse
- [22]. **Gholami, S. Shahsavani, and S. Nezarat,** (2009) , The Effect of Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) on Germination, Seedling Growth and Yield of Maize
- [23]. **Giller KE** (2001) *Nitrogen fixation in tropical cropping systems*, 2nd edn. CAB International, Wallingford
- [24]. **Graham P. ET C. Vance** (2003)-Legumes: importance and constraints to greater use. *Plantphysiol.* 131:872- 877
- [25]. **Gyaneshwar P, Kumar GN, Parekh LJ, Poole PS.** (2002). Role of soil microorganisms in improving P nutrition of plants. *Plant soil.* 245(1): 83-93.
- [26]. **Huang, X., Kiefer, E., von Rad, U., Ernst, D., Foissner, I. and Durner, J.** (2002). Nitric oxide burst and nitric oxide-dependent gene induction in plants. *Plant Physiol. Biochem.*
- [27]. **Hussein, H., Ibrahim, S.F., Kandeel, K., Moawad, H.,** (2004.) Biosorption of heavy metals from waste water using *Pseudomonas* sp. *Electron J Biotechnol* 7 (1), 30–37

- [28]. **Jaiswal R. and Singh N.P.**, 2001. Plant Regeneration from NaCl Tolerant Callus/Cell Lines of Chickpea, International Chickpea and Pigeonpea, Newsletter 8; ICRISAT (International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics); 73 p.
- [29]. **Kande J.**, 1965. Contribution à l'étude de la valeur nutritionnelle de deux graines de légumineuses le pois chiche (*Cicer arietinum* L.) et la lentille (*Lens esculata*) Diplôme d'étude .Ecole pratique des hautes études
- [30]. **Kim KY, Jordan D, Mc Donald GA.** (1998). Enterobacter agglomerans, phosphate Solubilizing bacteria, and microbial activity in soil: effect of carbon sources. Soil Biol. Biochem. 30: 995-1003.
- [31]. **Kim J, D.C.**, 1994. Rees Nitrogenase and biological nitrogen fixation Biochemistry, 33 (), pp. 389–397
- [32]. **Kirdi, B., Zermane, N.**, (2010). Rôle des PGPR dans la stimulation de la croissance végétale et la lutte contre les phanérogames parasites : *Orobanche crenata* Forsk. Et *Cuscuta campestris* Yuncker / “Role of PGPR in Plant Prowth Promotion and control of the parasitic weeds: *Orobanche crenata* Forsk. and *Cuscuta campestris* Yuncker
- [33]. **Kloepper J.W and M.N Schrot (1978)** Plant growth promoting rhizobacteria and plant growth under gnotobiotic conditions. Phytopathology 71: 642-644.
- [34]. **Krafczyk, I., Trolldenier, G., et Beringer, H.** 1984. Soluble root exudates of maize: influence of potassium supply and rhizosphere microorganisms. Soil Biology and Biochemistry, 16(4), 315-322.
- [35]. **Kucey, R. M. N., H. H. Janzen et M. E. Legget** (1989). Microbial mediated increases in plant available phosphorus. Adv. Agron. 42: 199-228
- [36]. **Kumar, P., Dubey, R.**, (2012). Plant Growth Promoting Rhizobacteria for Biocontrol of Phytopathogens and Yield Enhancement of *Phaseolus vulgaris* L. J. Curr. Perspect. Appl. Microbiol. N° 1 P 6–38.
- [37]. **Kumar, V. et N. Narula** (1999). Solubilization of inorganic phosphates and growth emergence of wheat as affected by *Azobacter chroococcum* mutants. Boil. Fert. Soils, 28(3): 301-305
- [38]. **Ladizinsky G.**, 1987. Pulse domestication before cultivation. Econ. Bot., 41: 60-65. Naghavi M. R., Jahansouz M. R. (2005). Variation in the agronomic and morphological traits of Iranian chickpea accessions. J. Integr. Plant. Biol. 47(3): 375-379.
- [39]. **Leita, L., De Nobili, M., Muhlbachova, G., Mondini, C., Marchiol, L., and Zerbi, G.** (1995). Bioavailability and effects of heavy metals on soil microbial biomass survival during laboratory incubation. Biol. Fertil. Soils. 19, 103-108.
- [40]. **Lemanceau, P.**, (1992). Beneficial effects of Rhizobacteria on Plants: exemple of Fluorescent *Pseudomonas* spp. Agronomie, N°12 P 413-437.

- [41]. **Leport L., Turner N.C., Davies S.L. and Siddique K.H.M.**, 2006. Variation in pod production and abortion among chickpea cultivars under terminal drought. *Europ. J. Agronomy*, 24: 236-246.
- [42]. **Linda S. Thomashow, David M. Weller, Robert F. Bonsall, and Leland S. Pierson**,1990. Production of the Antibiotic Phenazine-1-Carboxylic Acid by Fluorescent *Pseudomonas* Species in the Rhizosphere of Wheat. U.S. Department of Agriculture, Washington State University. 56(4)pp 908–912.
- [43]. **Manu pratap gangola** (2014) . Raffinose Family Oligosaccharides (Rfo) Biosynthesis In Chickpea (*Cicer Arietinum* L.) Seeds . page 6
- [44]. **Marco Vocciante, Martina Grifoni, Danilo Fusini , Gianniantonio Petruzzelli Elisabetta Franchi** (2022) , The Role of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) in Mitigating Plant’s Environmental Stresses
- [45]. **Mezaacha, S.** (2012). Localisation des déterminants de la suppression de quelques souches de *Pseudomonas* isolée de la rhizosphère de la pomme de terre. Université Ferhat Abbas Sétif. 141P.
- [46]. **Mezaache, S.** (2012). Localisation des déterminants de la suppression de quelques souches de *Pseudomonas* isolées de la rhizosphère de la pomme de terre. Université Ferhat Abbas Sétif. 141: 3-26p.
- [47]. **Mishra, J., Singh, R., Arora, N.K.**, (2017.) Alleviation of heavy metal stress in plants and remediation of soil by rhizosphere microorganisms. *Front Microbiol*, 8, 1706.
- [48]. **Moore, E. R. B., Tindall, B. J., Martins Dos Santos, V. A. P., Pieper, D. H. Ramos, J. L. & Palleroni, N. J.** (2006). Nonmedical: *Pseudomonas*, In M. Dworkin, S. Falkow, E. Rosenberg, K. H. Schleifer, et E. Stackebrandt (ed.), *Prokaryotes*, Springer, USA. P. 646- 703p.
- [49]. **MOULIN L., 2002.** Etude moléculaire de la diversité symbiotique des rhizobia : de l'analyse du gène nod A à l'identification de rhizobia au sein des bêta-protéobactéries. Thèse de doctorat. Université Claude Bernard-Lyon I. 289p
- [50]. **Muehlbauer, F. J. and Rajesh, P. N.** 2008. Chickpea, a common source of protein and starch in the semi- arid tropics. PH. Moore, R Ming (eds.) *Genomics of tropical crop plants*
- [51]. **Munees A, Mulugetakibret.** (2013). Mechanisms and applications of plant growth promoting rhizobacteria: Current perspective, *Journal of King Saud University- Science*, January Volume 26, Issue 1, p 1-20.
- [52]. **Oksana Sytar, · Pragati Kumari, · Saurabh Yadav, · Marian Brestic, Anshu Rastogi** (2018) , *Phytohormone Priming: Regulator for Heavy Metal Stress in Plants*

- [53]. **Parmar, P., Sindhu, S.**, (2013). Potassium Solubilization by Rhizosphere Bacteria: Influence of Nutritional and Environmental Conditions. *J. Microbiol. Res.* N° 3 P 25–31.
- [54]. **Parray J., A., Jan S., Kamili A.,N., Qadri R., A., et al.** (2015). Current Perspectives on Plant Growth-Promoting Rhizobacteria. *J Plant Growth Regul* 121 : 325-334.
- [55]. **Poitier G.A.**, 1981. Flore de la Tunisie ; 2 tomes ; 1190 p
- [56]. **Potard, K.** 2017. Les émissions de composés organiques volatiles (COVs) des sols dans les paysages agricoles : identification des sources et incidences sur la qualité de l'air. Thèse de doctorat en Biologie, Université de Rennes 1. 157 p.
- [57]. **Qin Han, Qun Ma, Yong Chen, Bing Tian, Lanxi Xu, Yang Bai, Wenfeng Chen, Xia Li.** (2020), Variation in rhizosphere microbial communities and its association with the symbiotic efficiency of rhizobia in soybean, *Multidisciplinary Journal of Microbial Ecology*, 14:1915.
- [58]. **Redden R., Berger J.**, 2007. 1 History and Origin of Chickpea. Chickpea breeding and management, Centre for Agriculture and Biosciences International, 638 p
- [59]. **Roberts E.H., Summerfield R.J., Minchin F.R. et Haley P.**, 1980. Phenology of chickpea (*Cicer arietinum* L.) in contrasting aerial environments. *Experimental Agriculture*, 16: 343-360.
- [60]. **Rosa, M., M. Hilal, J.A. González and F.E. Prado.** 2004. Changes in soluble carbohydrates and related enzymes induced by low temperature during early developmental stages of quinoa (*Chenopodium quinoa*) seedlings. *J. Plant Physiol.*, 161: 683-9.
- [61]. **Rouibah, M.** 1989. The contribution to the study of the wilting of the chickpeas in Algeria. Institut National Agronomique El- Harrach. Algérie, 51p.
- [62]. **Ryu R., Patten C. L.** (2008). Aromatic amino acid-dependent expression of indole-3-pyruvate decarboxylase is regulated by 4 Tyr R in *Enterobacter cloacae* U W5. *Am. Soc. Microbiol.*, 19: 1-35.
- [63]. **Saharan BS. et V. Nehra** (2011). Plant growth promoting rhizobacteria: a critical review. *Life Sciences and Medicine Research*, Volume 2011: LSMR-21.
- [64]. **Sassene A.**, 1989. Etude de la fertilisation et de l'inoculation du pois chiche. Mémoire d'Ingénieur en Agronomie, INA, Algérie ; 77p.
- [65]. **Saxena N.P.**, 1984. Chickpea. In: Goldsworthy P.R., Fisher N.M. *The Physiology of Tropical Field Crops*: 419-452
- [66]. **Shanker, A.K., C. Cervantes, H. Loza-Tavera and S. Avudainayagam.** 2005. Chromium toxicity in plants. *Environ Intern.*, 31: 739-53.

- [67]. **Sharma, K., G. Dak, A. Agrawal, M. Bhatnagar et R. Sharma** (2007). Effect of phosphate solubilizing bacteria on the germination of *Cicer arietinum* seed and seedling growth. *J. Herb. Toxicol.*, 1: 61-63.
- [68]. **Sharma, K., G. Dak, A. Agrawal, M. Bhatnagar R. Sharma** (2007). Effect of phosphate solubilizing bacteria on the germination of *Cicer arietinum* seed and seedling growth. *J. Herb. Med. Toxicol.*, 1: 61-63.
- [69]. **Shilev S**, 2013. Soil Rhizobacteria Regulating the Uptake of Nutrients and Undesirable Elements by Plants. Chapitre 5 plant microbe symbiosis fundamentals and advance naveenkumararora editor
- [70]. **Siddiqui ZA** (2006) PGPR: prospective biocontrol agents of plant pathogens. In: Siddiqui ZA (ed) PGPR: biocontrol and biofertilization. Springer, The Netherlands, pp 111–142.
- [71]. **Singleton P., & Sainsbury D.**, 2006. Dictionary of Microbiology and Molecular Biology, Third Edition Paul Singleton and Diana Sainsbury. John Wiley & Sons Ltd. ISBN. Pp: 637- 638
- [72]. **Son, TTN., CN. Diep et TTM. Giang** (2006). Effect of brady rhizobia and phosphate solubilizing Bacteria application on soy bean in rotational system in the Mekong delta. *omonrice* 14: 48-57.
- [73]. **Souahi H, Gharbi A, Gassarellil Z** (2017). Growth and physiological responses of cereals species under lead stress. *International Journal of Biosciences* 11(1): 266-273.
- [74]. **Souahi H, Gassarellil Z, Gharbi A, Meksem Amara L** (2021). Comparative growth of cereal species under lead stress. In: Ksibi M. et al. (eds) Recent Advances in Environmental Science from the Euro-Mediterranean and Surrounding Regions (2nd Edition). EMCEI 2019. Environmental Science and Engineering. Springer, Cham.
- [75]. **Souahi H, Chebout A, Akrouf K, Massaoud N, Gacem R** (2021). Physiological responses to lead exposure in wheat, barley and oat. *Environmental challenge* 4: 100079.
- [76]. **Souahi H** (2021). Impact of lead on the amount of chlorophyll and carotenoids in the leaves of *Triticum durum* and *T. aestivum*, *Hordeum vulgare* and *Avena sativa*. *Biosystems Diversity* 29(3): 207-210.
- [77]. **Soufiane B.** (1998). Isolement à partir de la rhizosphère des conifères de bactéries et d'actinomycètes antagonistes aux champignons phytopathogènes .mémoire de maîtrise. faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation .université Laval, Québec
- [78]. **Spaepen S., Vanderleyden J., Remans R.** (2007). Indole-3-acetic acid in microbial and microorganism. *Plant signaling. FEMS Microbiol. Rev.*, 31(4): 425-448.

- [79]. **Sundara, B., V. Natarajan et K. Hari** (2002). Influence of phosphorus solubilizing bacteria on the changes in soil available phosphorus and sugarcane yields. *Field Crops Res.* 77:43–49
- [80]. **Tariq M. Hameed S, Yasmeen T, Zahid M , et al.** (2014). Molecular characterization and identification of plant growth promoting endophytic bacteria isolated from the root nodules of pea (*Pisum sativum* L.) *World J Microbial Biotechnol* 30: 719-725.
- [81]. **Toker, C., Uzun, B., Ceylan, F.O., et Ikten, C.** (2014). Chickpea. In: *Alien Gene Transfer in Crop Plants*, A. Pratap and J. Kumar Eds , Springer, Dordrecht, (2), 121-151
- [82]. **Tsuji, A., Kaneko, Y., Takahashi, K., Ogawa, M., & Goto, S.** (1982). The effects of the perature and pH on the growth of eight enteric and nine glucose non-ferenting species of growth negative rods. (1): 15-24p.

- [83]. **Vacheron, J., Desbrosses, G., Bouffaud, M. L., Touraine, B., Moënne-Loccoz, Y., Muller, D., Legendre, L., Wisniewski-Dyé, F., Prigent-Combaret, C.** – 2013 - Plant growth-promoting rhizobacteria and root system functioning. *Frontiers in Plant Science* 4, 356.
- [84]. **Ven der Maesen, L. J. G.** (1987). Origin, history and taxonomy of chickpea. In: Saxena, K.B. (Ed), the chickpea, CAB International. Walling ford, Oxon, UK, MCA S.
- [85]. **Vessey, J.K.** (2003). Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant and Soil*. 255: 571-586.
- [86]. **Wang J, Li R, Zhang H, Wei G, Li Z** (2020a) Beneficial bacteria activate nutrients and promote wheat growth under conditions of reduced fertilizer application. *BMC Microbiol* 20: 1–12
- [87]. **Wery J., Silim S.N., Kinght E.J., Malhotra R.S. and Cousin R.** 1994. Screening techniques and sources of tolerance to extremes of moisture and air temperature in cool season food legumes. *Euphytica*, 73 : 73-83.
- [88]. **Zermane N., Kroschel J et Kharrat M.,** 2001. Investigation of the Orobanche problem in Tunisia. Fer P. Thalouarn, D. M Joel, FJ. Musselman, C. Parker et J. A. C. Verkleij (eds). Proceeding of the 7th international parasitic weed symposium, Nantes, France