



République Algérienne Démocratique 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

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

Domaine: Sciences de la Nature et de la Vie

Option: Ecophysiologie Végétale

THÈME :

Contribution à l'étude de l'effet des bactéries isolées
de la rhizosphère du *Stipa tenacissima* sur la
croissance de *Triticum*

Présenté et soutenu par :

YOUNES khawla

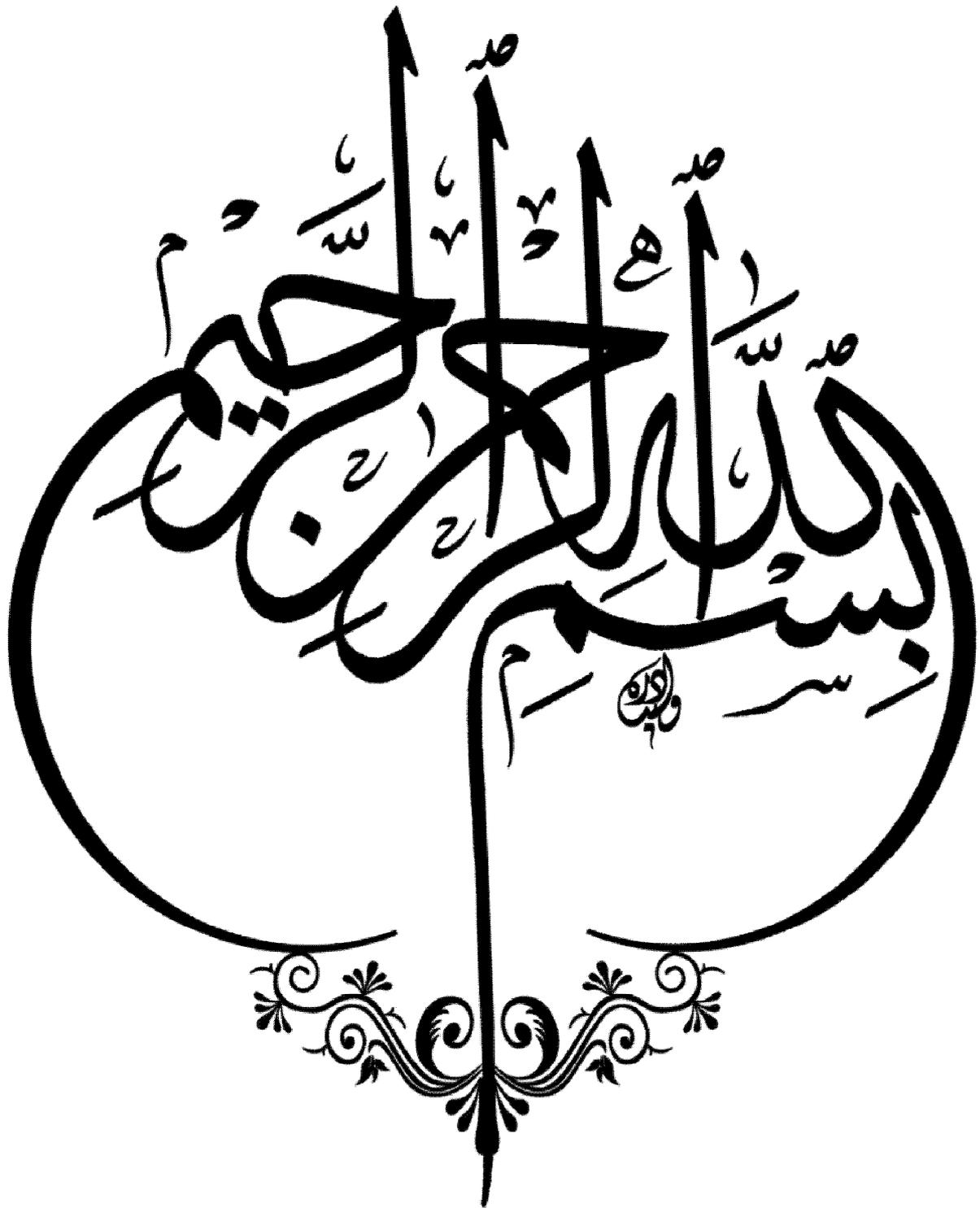
KEFALI Rihab

Devant le jury composé

Pr. MAALEM Souhail	Professeur	Université de Tébessa	President
Dr.SOUAHI Hana	MCA	Université de Tébessa	Promotrice
Dr. HIOUN Soraya	MAA	Université de Tébessa	Examinatrice

Date de soutenance : Le 12 /06/2022

Année universitaire : 2021/2022



Remerciement

Nous tenons en premier reconnaissant à Allah de nous avoir donné la bonne santé et le bien-être, le courage, la volonté, la patience qui ont été nécessaire pour terminer ce modeste travail.

Nous sommes extrêmement reconnaissants et redevable à notre promotrice Mme. SOUABI Hana d'avoir accepté de nous encadrer, pour tout son aide, sa disponibilité et sa confiance.

Nous voudrions remercier le président du jury Mr MAALEM Souhail et L'examinatrice Mme HIOUN Soraya.

Nous ne manquerons pas de remercier tous les enseignants du département des êtres vivants de la faculté des sciences exactes et sciences de la nature et de la vie de Tébessa, de nous avoir partagé leur savoir et leur expérience.

Nous adressons nos plus sincères remerciements à nos familles, nos parents, nos sœurs, nos frères et tous nos amis, aussi à toute l'équipe de laboratoire de la faculté, nous remercions tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la confection de ce mémoire.

Dédicaces

C'est avec un grande gratitude et des mots sincères ,je remercie allah et alhamde lillah qui m'a aidé, que je dédie ce modeste travail de la fin d'étude à mes chers parents qui ont sacrifié leur vie pour ma réussite à mon père younes pour avoir toujours cru en moi et pour ses nombreux sacrifices, à ma mère pour son soutien et ses encouragements , j'espère qu'un jour , je pourrai leurs rendre un peu de qu'il on fait pour moi , que dieu leur prête bonheur et longue vie.je dédie aussi de ce travail à mes frères, Et bien sûr à la plus belle notre encadreur Dr. hana et mon binôme Rihab

KHAWLA

Dédicaces

*D'abord, je veux dédiée ma mère mon
raison de bonheur et mon père mon
source de force, sans le soutien de mes
parents je n'ai pas le courage d'être
ici aujourd'hui. Je donne ma dédicace
aussi à mes chers frères et sœurs et à
toutes mes amies, à Zineb et mon
binôme Khaoula. Et bien sûr à la plus
belle notre encadreur Dr hana*

Rihab

Résumé

La croissance des plantes est fortement influencée par de nombreux facteurs biotiques et abiotiques, La contamination des sols par les métaux lourds est l'un des facteurs majeurs limitant la productivité des plantes et par conséquent la production agricole, Ces éléments sont par nature non biodégradables, et sont d'une forte toxicité environnementale qui peut être impliquée dans de nombreuses maladie.

Nous avons découvert que le *stipa tenacissima* une des plantes qui s'adapte bien aux conditions environnementales difficiles. Dans ce cadre, nous avons étudié l'effet des bactéries isolées de la rhizosphère du *stipa tenacissima* sur la croissance de *Triticum durum* à la présence des métaux lourds (le plomb=800ppm et le cadmium=12ppm). Cette culture effectuée sous une serre semi-contrôlée, arrosée régulièrement par l'eau distillée 3 fois par semaine pendant 1 mois, Cette étude consiste des paramètres morphologiques, physiologiques et biochimiques, qui prouve que ces bactéries a un rôle d'aide la plante pour résister dans le sol polluée par certains dosage de métaux lourds.

Nos résultats ont montré que le traitement des graines de blé dur par le consortium de deux souches (A : bactéries isolées des racines de *Stipa tenacissima*, B : bactéries isolées du sol de *Stipa tenacissima*) montrent plutôt un effet positif sur quelques paramètres de croissance comme (le nombre des feuilles et racines la longueur de la partie areine le poids frais et le poids sec la TRE et TRS).

Les résultats obtenus nous a permis de dire que et que l'utilisation des technologie microbiennes dans l'agriculture exercent sur les plantes divers effets en influençant leur développement et la réponse aux facteurs de stress

Mots clé : métaux lourds, Plomb, Cadmium, *Stipa tenacissima*, *Triticum durum*, Inoculation, le consortium des bactéries, Rhizosphère

ABSTRACT

Plant growth is strongly influenced by many biotic and a biotic factors, Soil contamination by heavy metals is one of the major factors limiting plant productivity and therefore agricultural production. These elements are by nature non-biodegradable, and are of high environmental toxicity which can be involved in many diseases, we discovered that the *Stipa tenacissima* one of the plants that adapts well to difficult environmental conditions. In this context, we studied the effect of bacteria isolated from the rhizosphere of *Stipa tenacissima* on the growth of *Triticum durum* in the presence of heavy metals (lead=800ppm and cadmium=12ppm). This culture carried out under a semi-controlled greenhouse, watered regularly with distilled water 3 times a week.

This study consists of morphological, physiological and biochemical parameters, which prove that these bacteria have a role in helping the plant to resist in the soil polluted by certain dosages of heavy metals.

Our results showed that the treatment of wheat seeds by the consortium of two strains (A: bacteria isolated from the roots of *Stipa tenacissima*, B: bacteria isolated from the soil of *Stipa tenacissima*) rather show a positive effect on some growth parameters(number of the leaves the number of roots the fresh weight. The soluble sager content and aerial part length and RWC)

The obtained results allowed us to say that and that the use of microbial technologies in agriculture exert on plants various effects by influencing their development and response to stress factors

Keywords: heavy metals, Lead, Cadmium, *Stipa tenacissima*, *Triticum durum*, Inoculation, the consortium of bacteria, Rhizosphere

ملخص

يتأثر نمو النبات بشدة بالعديد من العوامل الحيوية وغير الحيوية، يعد تلوث التربة بالمعادن الثقيلة أحد العوامل الرئيسية التي تحد من إنتاجية النبات وبالتالي الإنتاج الزراعي. هذه العناصر بطبيعتها غير قابلة للتحلل، وهي ذات سمية بيئية عالية يمكن أن تشارك في العديد من الأمراض، وجدنا أن نبات *Stipa tenacissima* أحد النباتات التي تتكيف جيداً مع الظروف البيئية الصعبة. في هذا السياق، درسنا تأثير البكتيريا المعزولة من الجزء الأرضي لنبات *Stipa tenacissima* على نمو *Triticum durum* تحت تأثير المعادن الثقيلة (الرصاص = 800ppm الكاديوم = 12ppm) يتم إجراء هذه الاستزراع تحت دفينة جزئية الرقابة، ويتم سقيها بانتظام بالماء المقطر 3 مرات في الأسبوع لمدة شهر.

تتكون هذه الدراسة من معايير مورفولوجية وفزيولوجية وكيميائية حيوية، والتي تثبت أن هذه البكتيريا لها دور في مساعدة النبات على مقاومة التربة الملوثة بجرعات معينة من المعادن الثقيلة.

أظهرت نتائجنا أن معالجة بذور القمح القاسي باتحاد السلالتين (A: البكتيريا المعزولة من جذور *Stipa tenacissima*، B: البكتيريا المعزولة من تربة *Stipa*) لها تأثير إيجابي على بعض معاملات النمو مثل (عدد الأوراق والجذور و استطالة الجزء العلوي والكتلة الجافة والكتلة الطازجة المحتوى النسبي للماء والمحتوى النسبي للسكريات)

من خلال النتائج المتحصل عليها، يمكن القول أن المعالجة البيولوجية لها دور في حماية النبات من الإجهاد المعدني والتقليل من نسبة التلوث بالمعادن الثقيلة في التربة

الكلمات المفتاحية: المعادن الثقيلة، الرصاص، الكاديوم، *Stipa tenacissima*، *Triticum durum*، التلقيح، اتحاد البكتيريا، الجزء الأرضي للنبات.

TABLEAU DES MATIERES

Sommaire	page
Remerciement	
Dédicace	
Résumé	
Abstract	
ملخص	
Liste des tableaux	
Listes des Figures	
Liste des abréviations	
I. Introduction	01
L'objectif de travail	03
Synthèse bibliographique	
Chapitre 01 : Métaux lourds	
1. Le sol	04
1.1 Définition du sol	04
2. Métaux lourds	04
2.1. Définition des métaux lourds	04
2.2. Origines de la contamination du sol par métaux lourds	04
2.3. Effet des métaux lourds sur la matière organique du sol	05
2.4. Techniques de dépollution	06
3. Interaction entre les plantes et le sol	07
4. Diversité microbienne	07
5. Généralité sur le blé dur	08
Chapitre 02 : Généralité sur la rhizosphère	
1. La rhizosphère	10
2. Rôle de la rhizosphère	11
3. Les rhizo-bactérie promotrice de la croissance	11
4. Exsudat racinaire	12
5. Les interactions dans la rhizosphère	13
5.1. L'interaction entre les micro-organismes	13

TABLEAU DES MATIERES

5.2. L'interaction plante –microorganisme	13
6. Effets des PGPR sur la plante	14
A. Effet directe des PGPR sur la plante	14
A.1. Fixation de l'azote	14
A.2. Solubilisation de phosphate	14
A.3. Production des sidérophore	14
A .4. Solubilisation du potassium	15
A.5. Production phytohormone	15
A .5 .1. L'auxine	15
A.5.2. Les cytokinine et gibbérelline	16
B. Mécanisme indirecte	16
B.1. La compétition pour l'espace et les nutriments	16
B.2. L'antibiose	17
Partie expérimentale	
Matériels et méthodes	
1. Localisation du site de l'essai	19
2. Isolement des bactéries	19
3. Matériel végétal	19
4. Stérilisation des graines	20
5. Préparation du sol	21
6. Dispositif expérimental	21
7. l'arrosage	22
8. Méthodes et mesures adoptées	23
8.1. Paramètres morphologiques et physiologiques	23
8.1.1. Nombre des feuilles et des racines et la longueur de la partie aérienne et la partie souterraine.	23
8.1.2. Le poids frais et le poids sec	23
8.1.3. La biomasse végétale	23
8.1.4. Surface foliaire	23
8.1.5. taux de germination	24

TABLEAU DES MATIERES

8.1.6.teneur relative en eau	24	
8.2. Paramètres biochimiques	24	
8.2.1.teneur en chlorophylle	24	
8.2.2.Dosage des sucres solubles totaux	25	
8.2.3.Dosage des protéines totales	25	
8.2.4.Dosages des flavonoïdes	26	
8.2.5.La teneur en phénols totaux	27	
9. Traitement de donnés et analyse statistique	27	
Résultats et discussion		
Résultats	28	
1. Les paramètres morphologiques et physiologiques.	28	
2. Les paramètres biochimiques.	40	
Discussion	46	
Conclusion		56
Références bibliographiques		

TABLEAU DES MATIERES

LISTE DES ABREVIATIONS

So	Sol + Eau distillé
SCd	Sol + Cadmium (12 ppm)
SCA	Sol + Consortium A (bactéries isolées des racines de <i>Stipa tenacissima</i>)
SCB	Sol + Consortium B (bactéries isolées du sol de <i>Stipa tenacissima</i>)
S_(CA x CB)	Sol + Consortium A + Consortium B
SCA+ Cd	Sol + Consortium A + Cd
SCB+ Cd	Sol + Consortium B + Cd
S_(CA x CB) + Cd	Sol + Consortium A + Consortium B + Cd
SPb	Sol + Plomb(800 ppm)
SCA+ Pb	Sol + Consortium A + Pb
SCB+ Pb	Sol + Consortium B + Pb
S_(CA x CB) +Pb	Sol + Consortium A + Consortium B + Pb
RWC (TRE)	relative water content (teneur relative en eau)
BBC	bleu brillante de Coomassie
BSA	sérum d'albumine bovine
FCR	réactif de foin cicolteu
ISR	l'activation des résistances innées
ppm	partie par million
ACC désaminase	1-aminocyclopropane-1-carboxylic acide désaminase
PGPR	Plant Growth Promoting Rhizobacteria

LISTE DES FIGURES

N°	Titer	Page
Figure 01	Origine des métaux lourds dans le sol	05
Figure 02	Représentation schématique des zones de la rhizosphère	10
Figure 03	Interactions entre plantes et bactéries coopératives dans la rhizosphère	12
Figure 04	Plan et de <i>stipa tenacissima</i>	19
Figure05	Graines et plante de <i>Triticum durum</i>	19
Figure 06	Dispositif expérimental des plantules de <i>Triticum durum</i> après l'application des isolats et des métaux lourds	22
Figure 07	Plantes de <i>Triticum durum</i> stresse au Cd	23
Figure 08	Appareil de mesure la chlorophylle (chloro-mètre)	24
Figure 09	Les échantillons végétaux + le réactif (anthrone + acide sulfurique)	25
Figure 10	Effet de la Co-inoculation avec des (PGPR) sur le taux de germination de <i>Triticum durum</i> cultivées dans des conditions contrôlées (A: en présence de cadmium, B : en présence de plomb).	26
Figure 11	Effet de la Co-inoculation avec des (PGPR) sur le taux de germination de <i>Triticum durum</i> cultivées dans des conditions contrôlées (A: en présence de cadmium, B : en présence de plomb).	29
Figure 12	Effet de la Co-inoculation avec des (PGPR) sur le nombre des feuilles de <i>Triticum durum</i> cultivées dans des conditions contrôlées (A: en présence de cadmium, B : en présence de plomb).	30
Figure 13	Effet de la Co-inoculation avec des (PGPR) sur le nombre des racines des de <i>Triticum durum</i> cultivées dans des conditions contrôlées (A: en présence de cadmium, B : en présence de plomb).	31
Figure 14	Effet de la Co-inoculation avec des (PGPR) sur la longueur de la partie aérienne des plantes de <i>Triticum durum</i> cultivées dans des conditions contrôlées (A: en présence de cadmium, B : en présence de plomb)	32
Figure 15	Effet de la Co-inoculation avec des (PGPR) sur la longueur de la partie racines de <i>Triticum durum</i> cultivées dans des conditions contrôlées (A: en présence de cadmium, B : en présence de plomb).	33
Figure 16	Effet de la Co-inoculation avec des (PGPR) sur la surface flaire de <i>Triticum durum</i> cultivées dans des conditions contrôlées (A: en présence de cadmium, B : en présence de plomb)	34
Figure 17	Effet de la Co-inoculation avec des (PGPR) sur la teneur relative en eau de <i>Triticum durum</i> cultivées dans des conditions contrôlées (A: en présence de cadmium, B : en présence de plomb).	35
Figure 18	Effet de la Co-inoculation avec des (PGPR) sur la teneur en chlorophylle de <i>Triticum durum</i> cultivées dans des conditions contrôlées (A: en présence de cadmium, B : en présence de plomb)	36
Figure 19	Effet de la Co-inoculation avec des (PGPR) sur le poids frais de <i>Triticum durum</i> cultivées dans des conditions contrôlées (A: en	38

LISTE DES FIGURES

	présence de cadmium, B : en présence de plomb).	
Figure 20	Effet de la Co-inoculation avec des (PGPR) sur le poids sec de <i>Triticum durum</i> cultivées dans des conditions contrôlées (A: en présence de cadmium, B : en présence de plomb).	39
Figure 21	Effet de la Co-inoculation avec des (PGPR) sur la biomasse de <i>Triticum durum</i> cultivées dans des conditions contrôlées (A: en présence de cadmium, B : en présence de plomb).	40
Figure 22	Effet de la Co-inoculation avec des (PGPR) sur la teneur en sucre soluble des de <i>Triticum durum</i> cultivées dans des conditions contrôlées (A: en présence de cadmium, B : en présence de plomb).	41
Figure 23	Effet de la Co-inoculation avec des (PGPR) sur la teneur en protéine soluble de <i>Triticum durum</i> cultivées dans des conditions contrôlées (A: en présence de cadmium, B : en présence de plomb)	43
Figure 24	Effet de la Co-inoculation avec des (PGPR) sur la teneur en flavonoïdes totaux de <i>Triticum durum</i> cultivées dans des conditions contrôlées (A: en présence de cadmium, B : en présence de plomb)	44
Figure 25	Effet de la Co-inoculation avec des (PGPR) sur la teneur en phénol totaux des plantes de <i>Triticum durum</i> cultivées dans des conditions contrôlées (A: en présence de cadmium, B : en présence de plomb).	45

Liste des Tableaux

N°	Titer	page
Tableau 01	Classification des mécanismes de stimulation de la croissance des plantes contrôlées par les PGPR	18
Tableau 02	Les principales caractéristiques de <i>Triticum durum</i>	20
Tableau 03	Codages des traitements utilisés	22
Tableau 04	Analyse de la variance de taux de germination de <i>Triticum durum</i> cultivées dans des conditions contrôlées en présence de cadmium et en présence de Plomb	28
Tableau 05	de la variance de nombre des feuilles de <i>Triticum durum</i> cultivées dans des conditions contrôlées en présence de cadmium	29
Tableau 06	Analyse de la Test de Kruskal-Wallis nombre des feuilles de <i>Triticum durum</i> cultivées dans des conditions contrôlées (en présence de plomb)	30
Tableau 07	. Analyse de la Test de Kruskal-Wallis du nombre des racines de <i>Triticum durum</i> cultivées dans des conditions contrôlées en présence de cadmium et en présence de Plomb	31
Tableau 08	Analyse de la Test de Kruskal-Wallis de la longueur de la partie aérienne de <i>Triticum durum</i> cultivées dans des conditions contrôlées	34
Tableau 09	. Analyse de variance de la longueur de la partie racinaire de <i>Triticum durum</i> cultivées dans des conditions contrôlées (en présence de cadmium).	33
Tableau 10	Analyse de variance de la surface foliaire de <i>Triticum durum</i> cultivées dans des conditions contrôlées	34
Tableau 11	Analyse de la variance de la teneur relative en eau des <i>Triticum durum</i> cultivées dans des conditions contrôlées	35
Tableau 12	Analyse du test de Kruskal-Wallis teneur relative en chlorophylle des <i>Triticum durum</i> cultivées dans des conditions contrôlées	36
Tableau 13	Analyse de la variance à deux facteurs de classification présente le poids frais <i>Triticum durum</i> cultivées dans des conditions contrôlées	37
Tableau 14	Analyse de variance à deux facteurs de classification présente le poids sec de <i>Triticum durum</i> cultivées dans des conditions contrôlées	38
Tableau 15	Analyse de la variance à deux facteurs de classification la biomasse de <i>Triticum durum</i> cultivées dans des conditions contrôlées.	39
Tableau 16	Analyse de la variance à deux facteurs de classification présente la teneur en sucre soluble de <i>Triticum durum</i> cultivées dans des conditions contrôlées	41

Liste des Tableaux

Tableau 17	Analyse de la variance à deux facteurs de classification la teneur en protéines soluble de <i>Triticum durum</i> cultivées dans des conditions contrôlées.	42
Tableau 18	Analyse de la variance a deux facteurs de classification présente la teneur en phénols de <i>Triticum durum</i> cultivées dans des conditions contrôlées	43
Tableau 19	Analyse de la variance a deux facteurs de classification présente la teneur en flavonoïde de <i>Triticum durum</i> cultivées dans des conditions contrôlées	45

Introduction

Introduction

Le problème des sols contaminés est aujourd'hui très préoccupant pour les pays émergents. Les métaux lourds tels que le plomb, le cadmium, le cuivre, le zinc, et le mercure ne peuvent pas être biodégradés et donc persistent dans l'environnement pendant de longues périodes. De plus ils sont continuellement rajoutés dans les sols par diverses activités ; en agriculture par l'application de boues d'épuration ou par l'industrie métallurgique. L'accumulation des métaux lourds dans l'environnement peut se répercuter sur la santé des êtres humains et des animaux (**Wang et al. 2003**). A l'échelle microscopique, les métaux lourds ont aussi des effets néfastes sur les populations bactériennes, ce qui n'est pas sans conséquence sur le fonctionnement de l'écosystème. Ces dernières années, le développement de techniques efficaces pour décontaminer les sites pollués est devenu indispensable (**Rufus et al. 1997, Salt et al. 1998, Prabha et al. 2007**).

Les bactéries PGPR (*Plant Growth Promoting Rhizobacteria*) font partie de ce type de microorganismes, car elles n'établissent pas une relation de symbiose mutualiste, mais favorisent la croissance des plantes auxquelles elles sont associées (**Kloepper et Beauchamp, 1992**). La sélection d'une souche PGPR efficace est liée à la caractérisation de ses propriétés favorisant la croissance végétale comme : la solubilisation du phosphate, la production de sidérophores et de phytohormones, la capacité à fixer l'azote, et la lutte biologique contre les maladies des plantes (**Cattelan et al. 1999**).

L'objectif de travail

L'objectif principal de ce travail consiste à étudier et analyser l'effet de bactéries isolées de *Stipa tenacissima* sur quelques paramètres morphologiques et biochimiques au niveau des feuilles et des racines du *Triticum durum*.

Notre travail comporte deux grandes parties :

Une partie théorique (synthèse bibliographique) qui est subdivisée en 2 chapitres

- Le premier chapitre : Les métaux lourds
- Le deuxième chapitre : Généralité sur la rhizosphère et les PGPR

Une partie expérimentale qui est composée de deux chapitres

- Le premier présente le matériel et méthodes
- Le deuxième présente Les résultats obtenus et la discussion

Partie I

La synthèse bibliographique

Chapitre 1

Métaux lourds

1. Le sol

1.1. Définition du sol

Le sol est la couche supérieure de la croûte terrestre, composée de matière organique, de matière minérale, d'eau, d'air et d'organismes. Il dispose de son atmosphère interne, ainsi que d'une flore et d'une faune spécifiques. Les sols proviennent de l'altération et de la transformation des roches sous l'action de la nature, de l'atmosphère et des échanges d'énergie qui s'y manifestent (**Barles et al, 1999**). Les micro-organismes présents dans le sol sont impliqués dans le recyclage de nombreux éléments chimiques (carbone, azote, phosphore, soufre, fer, et autres). Il s'agit surtout de ceux impliqués dans la formation et la dégradation de l'humus. Ainsi que ceux ayant un rôle important dans la solubilisation des composants organiques et inorganiques inaccessibles aux plantes (**Ameur, 2014**). Le sol est un système dispersé à trois phases (**Hillel, 1974 in Hubert 2008**).

2. Métaux lourds

2.1. Définition des « métaux lourds »

Le terme métaux lourds, « heavy metal », implique aussi une notion de toxicité. Le terme « éléments traces métalliques » est aussi utilisé pour décrire ces mêmes éléments, car ils se retrouvent souvent en très faible quantité dans l'environnement (**Baker et Walker, 1989**). Dans ce contexte, nous utiliserons le terme « métaux lourds » dans le sens de l'impact toxique sur les humains et les environnements.

- Les métaux essentiels sont des éléments indispensables à l'état de trace pour de nombreux processus cellulaires et qui se trouvent en proportion très faible dans les tissus biologiques (Loué, 1993) Certains peuvent devenir toxiques lorsque la concentration dépasse un certain seuil.
- Les métaux toxiques ont un caractère polluant avec des effets toxiques pour les organismes vivants même à faible concentration. Ils n'ont aucun effet bénéfique connu pour la cellule.

2.2. Origine de la contamination des sols par les métaux lourds

Le problème principal avec les métaux lourds comme le plomb, le cadmium, le cuivre et le mercure est qu'ils ne peuvent pas être biodégradés, et donc persistent pendant de longues périodes dans des sols. Leur présence dans les sols peut être naturelle ou anthropogénique (**Figure 1**).

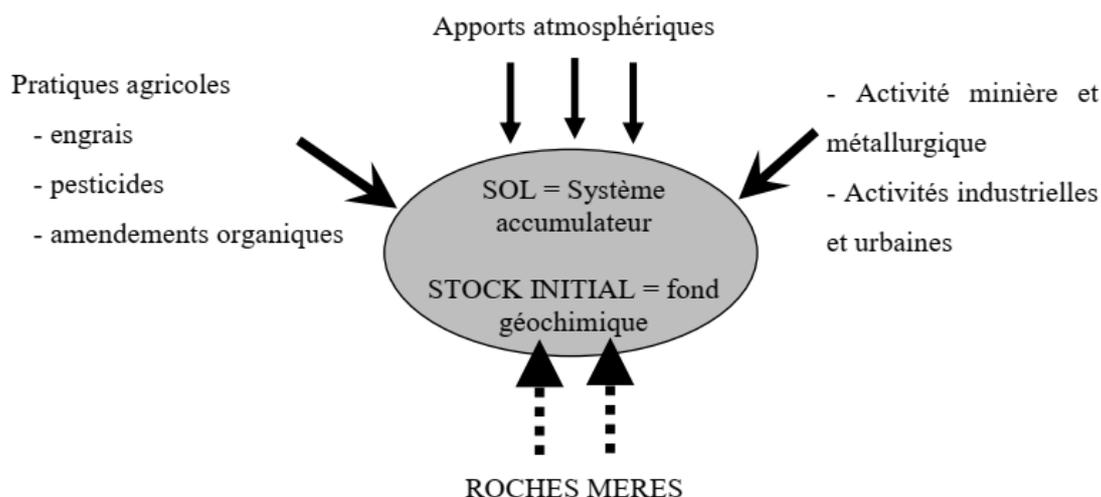


Figure 1: Origine des métaux lourds dans le sol (D'après Robert et Juste, 1999)

* Origine naturelle

Les métaux lourds sont présents naturellement dans les roches, ils sont libérés lors de l'altération de celles-ci pour constituer le fond géochimique (**Bourelhier et Berthelin, 1998**). La concentration naturelle de ces métaux lourds dans les sols varie selon la nature de la roche, sa localisation et son âge

* Origine anthropique

Cependant, la source majeure de contamination est d'origine anthropique. Au cours des décennies dernières, l'apport de métaux lourds au sol dans le monde s'est étendu ; à l'heure actuelle on l'estime à 22000 tonnes de cadmium, 939000 t de cuivre, 783000 t de plomb, et 1350000 t de zinc (**Singh et al. 2003**). Les principaux types de pollutions anthropiques responsables de l'augmentation des flux de métaux, sont la pollution atmosphérique (rejets urbains et industriels), la pollution liée aux activités agricoles et la pollution industrielle.

2.3. Effet des métaux lourds sur les microorganismes du sol

Le sol est un compartiment de l'écosystème possédant de multiples fonctions comme support pour les organismes et microorganismes vivants, réservoir de matière organique et minérale, lieu de transformations, système épurateur, régulateur des flux et des échanges dans les cycles biogéochimiques (cycle de l'azote, du carbone...) (**Gobat et al. 1998**). De nombreux organismes participent à la réalisation de ces fonctions. Le sol est un remarquable réservoir de microorganismes. (**Whitman et al. 1998**) ont estimé à $2,6 \times 10^{29}$ le nombre total de cellules procaryotes vivant dans les sols. Différents types de microorganismes sont représentés dans le sol où ils jouent un rôle crucial dans les cycles

Chapitre 1 : Les Métaux lourds

biogéochimiques des éléments. En moyenne, on compte 10^7 bactéries, 10^5 champignons, 10^5 protozoaires et 10^4 algues par gramme de sol sec (**Robert et Chenu, 1992**).

L'importance écologique des bactéries du sol ne se limite pas à leur nombre ou à leur biomasse, même si ces paramètres y contribuent grandement. En effet, leur atout principal réside dans leur grande diversité génétique et fonctionnelle. La diversité bactérienne dans le sol est en effet plus importante que celle des environnements aquatiques (**Torsvik et Overas, 2002**).

Cette diversité est à l'origine d'un très large éventail de propriétés physiologiques mais aussi d'activités métaboliques et de fonctions que les bactéries peuvent accomplir dans le sol. La diversité métabolique couplée à leur imposante biomasse fait que les bactéries du sol sont capables de métaboliser tous les composés naturels disponibles mais aussi la majorité des composés d'origine anthropique présents dans le sol, après un délai nécessaire à la mise en place des voies métaboliques. Les bactéries sont en effet les acteurs principaux des grands processus de transformation de la matière et des flux d'énergie dans le sol. Certaines étapes clé du cycle des éléments ne peuvent d'ailleurs être réalisées que par les bactéries. Leur disparition ne permet donc plus de garantir à long terme la fertilité du sol.

C'est pourquoi, l'impact écologique des métaux lourds sur les communautés bactériennes telluriques a fait l'objet de très nombreuses études dans ces vingt dernières années. Il est généralement admis que les microorganismes sont plus sensibles aux métaux lourds que les plantes ou les animaux vivant dans les sols pollués (**Giller *et al.* 1998**). Les impacts des métaux lourds sur les communautés microbiennes peuvent être abordés de diverses façons : la densité (colonie forming units, CFU), la taille, la structure des communautés (génétique et fonctionnelle) et également l'activité enzymatique.

2.4. Techniques de dépollution

Les nombreux cas de pollution par les métaux lourds génèrent autant de sites contaminés qu'il faut réhabiliter. Les méthodes physico-chimiques de dépollution de ces sites utilisées *in situ* et *ex situ* présentent l'inconvénient d'être coûteuses et lourdes à mettre en œuvre (**Gadd, 2000 ; Raskin *et al.* 1994 ; Salt *et al.* 1995**).

De plus, elles perturbent fortement l'activité biologique des sols et altèrent leur structure physique. Le besoin de nouvelles techniques économiquement compétitives et pouvant préserver les caractéristiques du sol s'est fait sentir et l'utilisation des biotechnologies s'est avérée être une alternative intéressante. La capacité de certaines

Chapitre 1 : Les Métaux lourds

plantes à tolérer ou même à accumuler des métaux a permis d'ouvrir de nouvelles voies de recherche sur le traitement des sols : on parle de phytoremédiation.

3. L'interaction entre les plantes et le sol.

L'ensemble des plantes partagent de nombreuses fonctions, parmi lesquelles la synthèse décomposés carbonés organiques et le largage d'oxygène dans l'atmosphère. Néanmoins, le règne végétal est très diversifié, des algues unicellulaires jusqu'aux arbres géants (p.ex. *Boscia albitrunca*, dont les racines atteignent 68 m de profondeur ; ou *Sequoia sempervirens*, culminant à 115 m de hauteur). Pour caractériser et comparer de manière standardisée les interactions de l'ensemble de ces plantes avec leur environnement et le sol en particulier, il est possible de recourir à des mesures quantitatives ou qualitatives communes à une majorité de plantes, tels que les traits fonctionnels (**Diamond et al, 1975**).

L'utilisation du concept de traits permet de rendre compte d'une part de la capacité de certaines plantes à survivre et persister dans un environnement donné (p.ex., en milieu sec, la capacité à acquérir l'eau du sol est conditionnée par l'architecture racinaire, avec des conséquences sur la compétitivité et la survie des plantes), et d'autre part des réponses morphologiques, physiologiques ou en cor phénologiques des plantes à des variations de tels ou tels facteurs environnementaux (influence du pH du sol sur la morphologie racinaire). Elle permet également de quantifier l'effet des plantes sur les propriétés des différents compartiments des écosystèmes (par ex influence positive de la densité et du turnover racinaire sur la porosité du sol)(**Bardgett et al 2010**).

En fin, en prenant en compte à la fois les réponses des plantes et du sol ainsi que leurs effets l'un sur l'autre (au travers de boucles de rétroaction), cette approche permet de caractériser des trajectoires environnementales (p.ex. variation de composition de la végétation copulée à la raréfaction ou à l'accumulation d'une ressource donnée) induites par des variations de conditions environnementales par ex, l'action de l'homme. (**Demeyer et al 2001**).

4. Diversité microbiennes du sol

Les communautés microbiennes du sol représentent la plus grande diversité que l'on trouve sur terre. Avec une biomasse microbienne estimée de 1 tonne à 10 tonnes par hectare, elles représentent également une fraction considérable de la biomasse vivante sur terre (**Fierer et al, 2007**). La diversité des communautés microbiennes telluriques est complexe et variable à différents niveaux d'organisation biologique. Elle englobe la

Chapitre 1 : Les Métaux lourd

variabilité génétique au sein des taxons (espèces), le nombre (richesse) et l'abondance relative des taxons (evenness) ainsi que les groupes fonctionnels au sein de la communauté (**Torsvik et amp; Øvreås, 2002**)

Les communautés microbiennes du sol participent activement aux services de soutien du sol, notamment à travers leur rôle dans les cycles biogéochimiques d'éléments majeurs tels que le carbone, le phosphore, le soufre et l'azote... Au niveau de ce dernier, l'implication forte de la composante microbienne dans la fixation de l'azote atmosphérique, l'ammonification, la nitrification et de dénitrification n'est plus à démontrer (**Hayatsu et al. 2008**), De même, la minéralisation de la matière organique, processus central du cycle du carbone, se réalise en grande partie par les microorganismes hétérotrophes du sol qui réduisent des molécules complexes en molécules plus petites, facilement assimilables par les plantes. De par leur plasticité métabolique, les microorganismes telluriques interviennent aussi dans la dégradation et l'immobilisation de polluants (ETM, pesticides...) apportés en milieu agricole ou industriel. Certains microorganismes ont également un impact important sur la santé et la croissance des plantes en réalisant des symbioses (**Barrios, 2007**) ou en induisant des maladies. D'autres sont impliqués dans la formation et la stabilité des agrégats du sol via la production d'agents liants ou l'établissement de liaisons physiques réalisées par les hyphes des champignons (**Six et al. 2002; Le Guillou et al. 2012**).

5. Généralité sur le blé

Les céréales et particulièrement le blé dur occupent une place prépondérante dans l'agriculture et par conséquent l'économie Algérienne. Cette importance se justifie à plusieurs niveaux. Cette espèce constitue un élément de base du modèle alimentaire de la population locale. Néanmoins sa production demeure faible pour satisfaire les besoins sans cesse croissant et son importation constitue une lourde facture à l'économie Algérienne. Les faibles productions s'expliquent principalement par les faibles rendements enregistrés à travers les différentes campagnes agricoles (**MADR, 2018**).

En Algérie, le blé est cultivé en conditions pluviales dans les plaines intérieures et plus particulièrement dans les hauts plateaux, appartenant aux étages bioclimatiques semi-arides. Ces zones sont souvent soumises aux effets des aléas climatiques (augmentation de la température couplée à la baisse des précipitations, stress salin et métallique) qui se répercutent sur la croissance et le développement des céréales et par conséquent sur leur productivité (**Bernard, 2006**). Dans ces aires, les sécheresses variables dans le temps et

l'espace restent le facteur le plus limitant auquel fait face la culture du blé dur (FAO, 2020).

Classification de *triticum durum*.

- Règne : *Plantea*
- S/règne : *Tracheobionta*
- Embranchement : *Phanérogamiae*
- S/Embranchement : *Magnoliophyta (Angiospermes)*
- Division : *Magnoliophyta*
- Classe : *Liliopsida (Monocotylédones)*
- S/Classe : *Commelinidae*
- Ordre : *Poales (Glumiflorale)*
- Famille : *Cyperales*
- S/Famille : *Poaceae (Graminées)*
- Tribue : *Pooideae (Festucoideae)*
- S/tribu : *Triticeae*
- Genre: *Triticum/Triticinae*
- Espèce : *T. durum Desf (APG III, 2009)*

Chapitre 02 :
Généralité sur la
rhizosphère et les
PGPR

1. La Rhizosphère

La rhizosphère est la zone du sol influencée par les exsudats racinaires. Cette zone abrite une variété unique de bactéries appelées rhizobactéries. Ces derniers sont capables de se multiplier et d'entrer en compétition avec d'autres micro-organismes pour le contrôle de cette zone riche en nutriments, la relation, le rôle et les effets des rhizobactéries sur les plantes sont déterminés par le succès de leur établissement dans la rhizosphère ; ils peuvent avoir un effet positif, négatif ou neutre sur la croissance des plantes. Plus de 5 % des rhizobactéries favorisent la croissance des plantes et les protègent des agents pathogènes tels que les bactéries, les champignons et les nématodes (Anoua et al, 1997; Valencia 2008. Kloepper et al. 1992).

L'inoculation des semences avec ces rhizobactéries entraîne souvent des augmentations de rendement allant de 10% à 30%. Ces rhizobactéries sont classées comme appartenant à plusieurs groupes taxonomiques de bactéries. Elles ont été classées comme Rhizobactéries Favorisant la Croissance des Plantes.

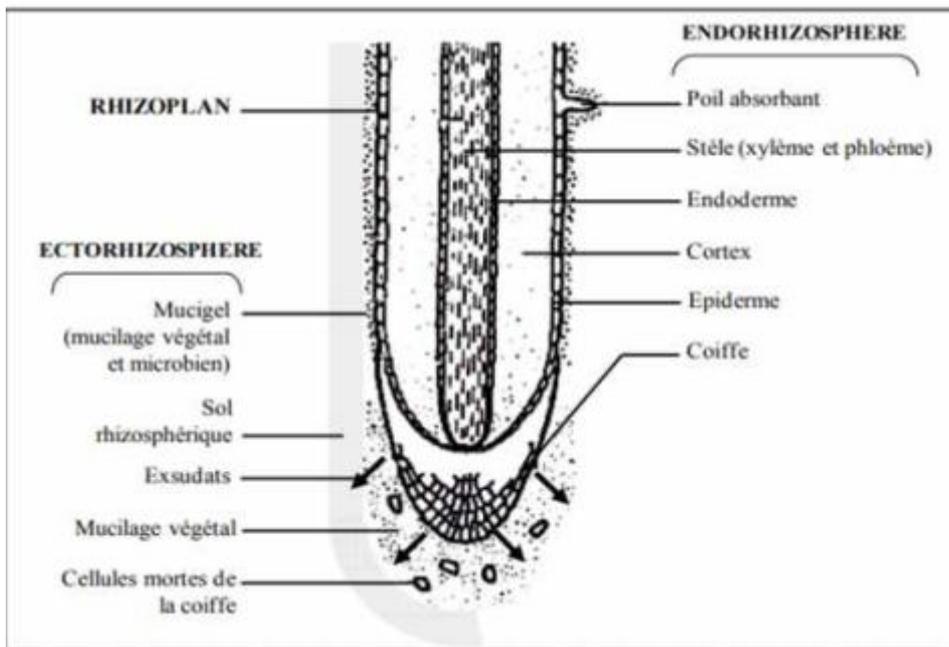


Figure 02. Représentation schématique des zones de la rhizosphère (Lepinay, 2015)

2. Rôle de la rhizosphère

La rhizosphère joue un rôle actif dans la régulation des interactions phyto-micro organiques (Hirsch et al, 2003), Il s'agit d'un espace vivant, où la racine exsude, d'une part, permet le développement d'une faune et d'une flore spécifiques et d'autre part, permettre le développement d'une flore en symbiose qui assure une bonne croissance des plantes, par la production de substances propices à la croissance comme les phytohormones et les antibiotiques pour la protection contre les phytopathogènes. et d'antibiotiques pour protéger contre les phytopathogènes. Synthèse bibliographique 6 C'est une niche écologique qui éveille et stimule diverses activités microbiennes, contribuant ainsi au fonctionnement des cycles des principaux nutriments et oligoéléments tels que le carbone, l'azote, le phosphore, le fer, (Decarne et al. 2010).

3. Les rhizobactéries promotrices de la croissance des plantes (PGPR)

Le terme PGPR a été inventé pour la première fois par (Kloepper et schorth), pour décrire cette population microbienne dans la rhizosphère, elle, qui signifie « *PlantGrowthPromotingRhizobacteria* », fait référence aux bactéries qui ont un effet bénéfique sur la croissance et le développement des plantes par plusieurs moyens (Abnatura., 2013). Les rhizobactéries sont des bactéries qui ont la capacité de coloniser les rhizomes des plantes (Schroth et Hancock, 1981, 1982). Les espèces étudiées comprennent *Agrobacteriumradiobacter*, *Azospirillum*spp, *Bacillus* et *Pseudomonas*spp fluorescents (Lemanceau.1992).

Les effets bénéfiques des rhizobactéries sont liés à leur localisation stratégique à l'interface racine-sol. En effet, le rhizoplan et le rhizophore sont les sites de fortes interactions entre la plante et son environnement (Malek, 2015), Ces échanges sont réciproques. Les micro-organismes bénéfiques, ou PGPR, peuvent émerger de nombreuses niches écologiques, telles que la rhizosphère. Généralement, ce sont des plantes très compétitives capables de coloniser le système rudimentaire des plantes riches en nutriments. Leur abondance dans le sol s'explique par leur reproduction rapide et leur capacité à utiliser une large gamme de substrats comme source d'énergie et de nutriments, les PGPR sont classés en deux groupes en fonction de leur association avec les plantes hôtes : les bactéries libres (non rhizosphérique), qui vivent dans le sol et ne dépendent pas des exsudats racinaires pour leur croissance, et les bactéries symbiotiques, qui ont un effet direct sur les composés organiques trouvés dans les racines. (Kloepper et al., 1999).

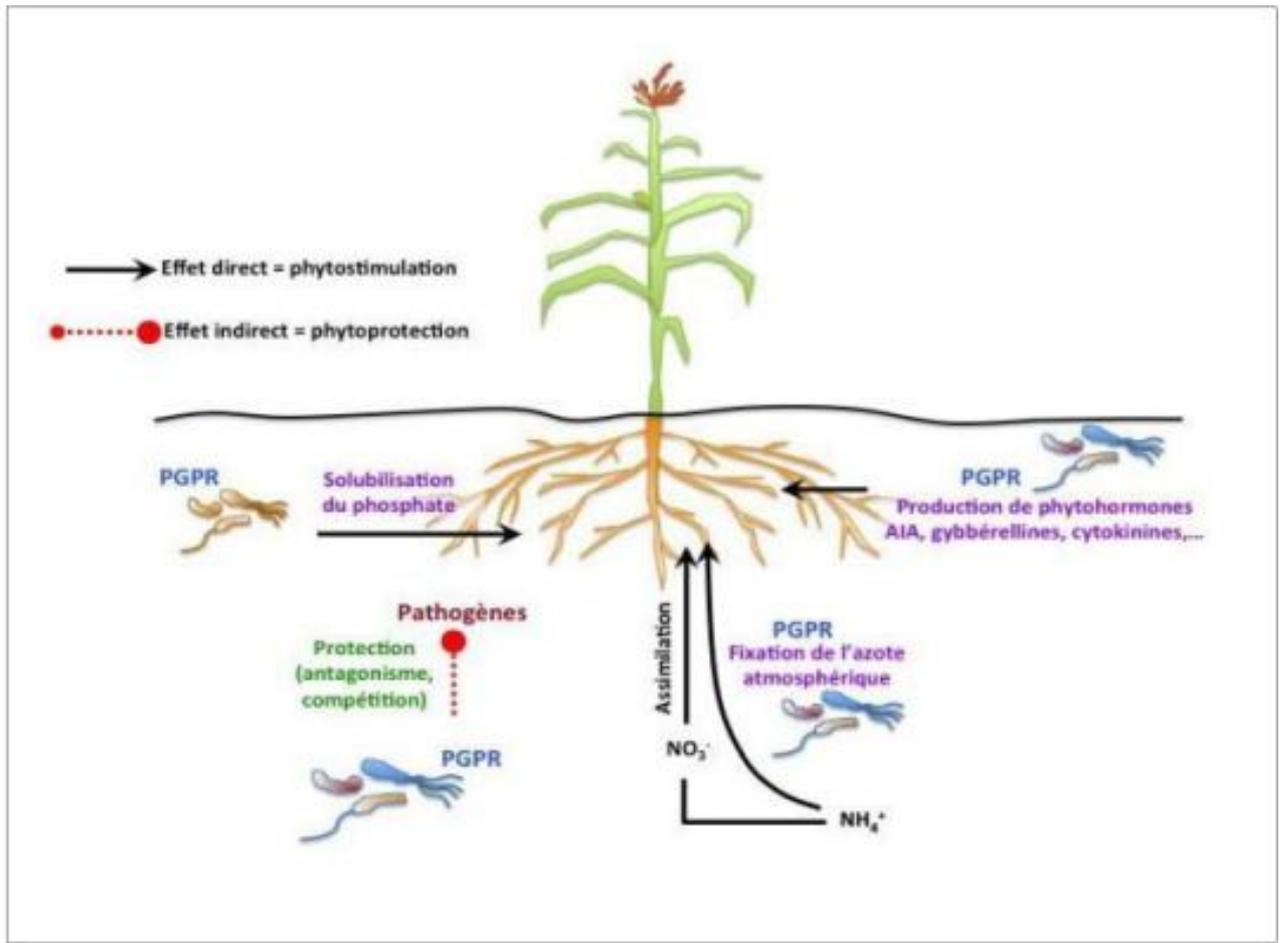


Figure 03. Interactions entre plantes et bactéries coopératives dans la rhizosphère
(Khan *et al.* 2009)

4. Exsudat racinaires

Les exsudats constituent la majorité des substances rejetées par la plante. C'est aussi le micro-organisme qui métabolise le plus vite. Ils contiennent en général des sucres, des acides aminés, des facteurs de croissance, des vitamines, des enzymes et des acides organiques. Ils constituent une source nutritive de la microflore rhizosphérique. Ils agissent aussi bien en stimulant qu'en inhibant certaines espèces (effet rhizosphérique) (Sofiane, 1998). Les exsudats sont principalement composés de dérivés carbonés de produits photosynthétiques, ils peuvent représenter de 30 à 40% des propriétés photosynthétiques de la plante. L'exsudation des racines, aussi connue sous le nom de rhizodéposition, influence clairement la croissance des plantes et l'écologie du sol, (tels que Fe et Zn) (Plassard *et al.* 2015).

Les exsudats racinaires jouent un rôle important dans plusieurs associations de plantes et de microbes, comme la symbiose entre le rhizobium et les racines de légumineuses.

Dans les légumineuses à interaction symbiotique – Rhizobium, les flavonoïdes particuliers produits par les racines des légumineuses améliorent la croissance des cellules bactériennes. Favorise le déplacement des bactéries vers la plante et induit la transcription des gènes de nodulation rhizobienne (**Philips et al. 1992**).

5. Les interactions dans les rhizosphères

5.1. Les interactions entre les micro-organismes

Les micro-organismes, particulièrement les bactéries, sont souvent impliqués dans une multitude d'interactions non génétiques avec d'autres micro-organismes, Particulièrement au niveau rhizosphérique .Ces interactions sont souvent de nature nutritionnelle .Un micro - organisme dépend d'un autre micro -organisme pour dégrader des produits ou des substrats spécifiques. Ou différents micro -organismes sont en compétition pour le même substrat Dans certains cas, un micro-organisme peut avoir un impact négatif sur d'autres micro-organismes. (**kaioua et al, 2015**).

Par exemple, en produisant des antibiotiques ou des produits chimiques toxiques .Les interactions entre populations microbiennes peuvent être reconnues comme des interactions. Négatives (compétition, amensalisme), positives (commensalisme, synergie et mutualisme), ou positives pour l'un et négatives pour l'autre population (parasitisme ou prédation) (**Trevors et al. 1997**) .

5.2. L'interaction plantes-micro-organismes

Il est largement admis que toute collection de microbes peut développer des fonctions vitales dans l'écosystème (**Giri et al. 2005**).Cependant, la plupart des études sur la rhizosphère microbiologie, en particulier celles décrivant les coopératives interactions plantes– microbiens, se sont concentrés uniquement sur bactéries et champignons, Les bactéries et les champignons ont des habitudes trophiques/vivantes différentes , et diverses relations symbiotiques saprophytes ont été identifiées, dont certaines sont nocives (pathogènes) et d' autres bénéfiques (mutualistes) (**Kobayashi et Crouch; 2009**), Les microbes nuisibles comprennent les principaux phytopathogène et les rhizosphères nuisibles parasitant et non parasitant organismes. Les bactéries et les champignons saprophytes bénéfiques peuvent promouvoir la croissance et la santé des plantes Les comprennent les bactéries fixatrices de N₂ et les champignons *mycorhizesarbusculaires* symbiotes mutualistes bénéfiques pour les plantes. (**Barea et al. 2005**) .

6. Effet des PGPR sur la plante:

6. A. Effet directe des PGPR sur la plante.

6. A.1. Fixation de l'azote N

L'azote N est le nutriment le plus vital pour la croissance et la productivité des plantes. La fixation d'azote symbiotique est une relation mutualiste entre une bactérie et la plante. La bactérie entre d'abord dans la racine et plus tard sur les nodules de forme dans lesquels se produit la fixation de l'azote. La rhizobie est un vaste groupe de rhizobactéries qui ont la capacité d'établir des interactions symbiotiques par la colonisation et forme de nodules racines dans le végétale, dans le quelle l'azote est fixé à L'ammoniaque et le rendre disponible pour l'hôte, (Kim *et* Rees, 1994 ;Munees *et* Mulugeta, 2014).

6. A .2. Solubilisation de phosphore

Le phosphore est le deuxième nutriment le plus important limitant la croissance des plantes après l'azote. Il est largement distribué dans le sol sous des formes organiques et inorganiques. Fait important dans tous les processus métaboliques majeurs des plantes, y compris la photosynthèse, le transfert d'énergie, la transduction du signal, biosynthèse et respiration dans les macromolécules (Khan *et al* 2009).

Les plantes ne peuvent pas utiliser le phosphate car 95 99 % du phosphate est présent sous des formes insolubles. Les plantes absorbent le phosphate uniquement sous deux formes solubles: les ions monobasiques et basique HPO_4^{2-} et H_2PO_4^- (Govin *et al* 2015).

La solubilisation microbienne du phosphate joue un rôle important dans la conversion du P insoluble en P soluble. En effet, il a été démontré que certains micro-organe sont impliqués dans la solubilisation des phosphates insolubles. De même, d'autres organismes sont en mesure de profiter du P solubilisé, tels que les champignons et le plantes supérieures. (Salma, 2015).

6. A.3. Production des sidérophores

Le fer est un nutriment vital pour presque toutes les formes de vie, (Neilands, 1995) Ces oligoéléments qui a suomi a une forte compétition certain bactéries sont capable de séquestrer le fer du milieu environ de X molécule appelle sidérophores Ces sidérophores se lient avec l'ion ferrique et forment un complexe sidérophores-ferrique qui se lie ensuite avec des récepteurs dépendants de la suspension de fer à la surface de la cellule bactérienne. L'ion Ferrique est ensuite relâché et actif dans le cytoplasme comme ion

Chapitre 02 : Généralité sur la rhizosphère et les PGPR

ferreux. Beaucoup de bactéries productrices des sidérophores appartiennent aux genres *Bradyrhizobium*, *Pseudomonas*, *Rhizobium*, *Serratia* et *Streptomyces* de la rhizosphère (Kuffner *et al.* 2008).

6. A.4. Solubilisation du potassium.

C'est le troisième nutriment le plus essentiel pour les plantes. Les concentrations de potassium dans le sol sont souvent assez faibles et plus de 90 % du potassium dans le sol existe sous forme de roches insolubles et de minéraux silicatés, (Parmar et Sindhu, 2013). De plus, en raison d'une fertilisation déséquilibrée, la carence en potassium devient l'une des principales limitations de la production agricole. Ont un rendement inférieur (Kumar et Dubey, 2012).

Rapporté quels micro-organismes du sol jouent un rôle important dans le cycle naturel du K et, par conséquent, les micro-organismes dégradant le potassium du sol pourraient constituer une technologie alternative pour fournir du potassium aux plantes. Et par conséquent, les micro-organismes dégradant le potassium du sol pourraient être une technologie alternative pour l'approvisionnement en potassium Il a été rapporté que des micro-organismes du sol à base de potassium végétal (Rogers *et al.*, 1998).

6. A.5. Production de phytohormones

Il existe deux sources de phytohormones naturellement disponibles pour les plantes : production endogène par les tissus de la plante et exogène par des micro-organismes associés. Les PGPRs produisent différentes phytohormones comme : l'AIA (Acide indole acétique : auxines), l'acide gibbérellique et les cytokinines. Ce sont des petites molécules de signal produites en très faible concentration influençant les processus biochimiques, physiologiques et morphologiques dans les plantes.

6. A.5.1. L'auxine

La plus importante des hormones de croissance des plantes .Elle est impliquée dans plusieurs processus, dont la division cellulaire, la différenciation et la création de fissures vasculaires, et elle a un effet positif sur le début de la croissance et l'allongement du racinaire. Elle augmente également la ramification des racines et améliore l'absorption des minéraux et de l'eau, (Patten et Glick, 2002 ; Ahmad et kibret, 2013 ; Gupta *et al.* 2015).

6. A.5.2. Les cytokinines et les gibbérellines.

Les phytohormones sont également impliquées dans l'altération de la morphologie des plantes et l'encouragement de la croissance aérienne. Les gibbérellines sont une classe de phytohormones impliquées dans l'altération (Vanloom., 2007), de la morphologie des plantes par extension tissulaire, en particulier l'extension tige. Ils interfèrent avec le processus de reproduction d'un large éventail de plantes et retardent la maturation des fruits et des feuilles. Les cytokinines peuvent être trouvées dans les racines, les brindilles, les feuilles, les fleurs, les fruits et les grains, mais il existe des preuves solides que la racine est le principal site de biosynthèse des cytokinines (Hopkins, 2003 ; de Salamone et al. 2005).

6. B. Les mécanismes indirects

Le principal avantage de l'utilisation du PGPR est qu'il confère aux plantes une résistance aux maladies causées par des agents pathogènes. Les rhizobactéries jouent un rôle important dans la lutte contre ces agents, supprimant un large éventail de maladies bactériennes, fongiques et parasitaires par la production d'antibiotiques, la compétition (pour les nutriments, l'oxygène et l'espace), l'activation de la résistance innée (ISR), et la fabrication d'enzymes (chitinase, protéase, lipase) ; cette défense est connue sous le nom de bio-contrôle. De plus, le PGPR peut être utilisé comme bio-fertilisant efficace pour améliorer le rendement de la culture par le développement d'enzymes comme les as (cellulases, amylases, etc.)

6. B.1. La compétition pour l'espace et les nutriments

La compétition pour l'espace et les nutriments est un mécanisme biologique utilisé par le PGPR pour éliminer les agents pathogènes des plantes. La compétition entre deux ou plusieurs microorganismes implique des facteurs nutritifs, spatiaux ou autres facteurs environnementaux qui limitent leur croissance (Dommergues et Mangenot, 1970 ; Shameer et Prasad, 2017).

Dans certains cas, la réduction de la maladie peut être liée à la colonisation importante des racines par des bactéries bénéfiques, ce qui réduit le nombre d'habitats pour les microorganismes pathogènes et réduit ainsi leur croissance (Piano et al, 1997). Cependant, la relation entre l'importance de la population de PGPR sur les racines et la protection observée n'a pas été vérifiée dans certains cas et ne peut donc pas être considérée comme une règle générale (Reyes et al, 2004), L'idée qu'une rhizobactéries à croissance rapide

Chapitre 02 : Généralité sur la rhizosphère et les PGPR

puisse éliminer les pathogènes fongiques par compétition pour les sources de carbone et d'énergie a suscité de nombreux débats .Le PGPR doit être présent en nombre suffisant sur les racines pour avoir un effet bénéfique et créer une compétition pour les nutriments dans la rhizosphère (**Defago et Haas, 2005**), cependant La compétition pour les nutriments et les différentes sources de vie est souvent produite par les micro-organismes du sol .

Ces fixateurs de fer et de phosphore PGPR inhibent la croissance des pathogènes tout en favorisant la croissance des plantes.

6. B.2. L'Antibiose

Le mécanisme le plus efficace pour contrôler les maladies des plantes est la création et la libération de molécules qui tuent ou ralentissent la croissance des agents pathogènes cibles (**Harman et Shoresh, 2007**) ,Elle consiste à produire des antibiotiques efficaces contre les agents pathogènes à l' aide d'un agent antagoniste .Ces molécules bioactives sont des métabolites secondaires de faible poids moléculaire , comme les antibiotiques comme l'amphicine, le 2,4-diacétylphloroglucinol (DAPG), le cyanure d'hydrogène (HCN) et la phénicien, qui fonctionnent comme des facteurs anti-pathogènes (**Corbaz, 1990 ; Babalola, 2010 ; Shameer et Prasad, 2017**) .

6. B.3.Effet phytoprotecteur des Sidérophores

La capacité des PGPR, en particulier de *Pseudomonas*, à produire des sidérophores dans l'environnement est bien connue. La chélation du fer est un phénomène qui contribue à l'action antagoniste des composés phytopathogènes en diminuant leur efficacité dans le sol. (**KirdietZermane;2010**).

Tableau01. Classification des mécanismes de stimulation de la croissance des plantes contrôlées par les PGPR (Martinez-iveroset *al.* 2010)

Terme	Définition	Mécanismes	Référence
Biofertilisation	Une suspension contenant des microorganismes vivants qui, une fois appliquée sur des graines, sur une plante ou dans le sol, colonisent la rhizosphère ou l'intérieur de la plante et promeuvent la croissance par l'augmentation de la disponibilité des nutriments principaux pour la plante hôte	<ul style="list-style-type: none"> - La fixation biologique de l'azote. - L'utilisation des formes insolubles de phosphore 	Vessey, 2003; Somers <i>et al.</i> 2004; Fuentes Ramírez et Caballero Mellado, 2006
Phytostimulation	Des microorganismes qui ont la capacité de produire ou de changer la concentration des régulateurs de la croissance	<ul style="list-style-type: none"> - Production des phytohormones. - Réduction de la concentration de l'éthylène à l'intérieur de la plante 	Lugtenberg <i>et al.</i> 2002; Somers <i>et al.</i> , 2004
Biopesticide ou agent de biocontrôle	Des microorganismes qui stimulent la croissance d'une plante par la production des antibiotiques et des métabolites antifongiques	<ul style="list-style-type: none"> - Production des antibiotiques - Production des enzymes qui dégradent les membranes des cellules fongiques - La compétition - L'ISR et l'ASR 	Vessey, 2003; Somers <i>et al.</i> 2004; Chandler <i>et al.</i> , 2008

*Etude
expérimentale*

Matériels et Méthodes

1. Localisation de l'essai

L'essai a été réalisé dans une serre et un laboratoire au niveau de Faculté des Sciences exacte et sciences de la nature et de la vie de l'Université de El Arbi Tébessi _ Tébessa _.

2. Isolement des bactéries

L'isolement des bactéries a été fait par Dr. Ahmed Dakkak, dans la région de Mesloula commune d'Elaouinet wilaya de Tébessa.



Figure 04. Plantes de *Stipa tenacissima*(Younes, Kefali 2022).

3. Matériel végétale

La variété de blé dur (*Triticum durum*) qui a été utilisé dans ce travail est ain lahma.



**Figure 05. Grains et plante de *Triticum durum*
(Younes et Kefali 2022)**

Tableau 02. Les principales caractéristiques de *Triticum durum* (OAIC de Tébessa)

Caractéristiques Agronomiques	Rendement :	Élevé
Caractéristiques technologiques	PMG :	Élevé
	Teneur en protéines :	13.95%
	Qualité semoulière :	très bonne
	Mitadinage :	Sensible
	Résistances aux champignons	Résistante
	Résistances aux maladies :	-Oïdium feuille : Résistante -Oïdium Epi : Résistante -Rouille brune : Très sensible -Septoriose : Moyennement sensible
	Type de développement :	Hiver
	Graine :	Forme Demi Allongée
	Epi	-Compacité Moyenne -Forme en vue de profil (pyramidale) -Couleur (à maturité) faiblement coloré
	Barbes	Couleur noire
	Barbes pigmentation anthocyanique :	Nulle à très faible
	Glume inférieur :	Forme (Epillet au tiers moyen de l'épi) Allongée
	Plante hauteur (tige, épi et barbe) :	Court
	Tige :	pilosité du dernier nœud Nulle à très faible
	Coléoptiles pigmentation anthocyanique :	Nulle à très faible
	Première feuille pigmentation anthocyanique :	Nulle à très faible
Plante port au tallage	: Mi-dressé Mi-étalé	

4. Stérilisation des graines

Les grains ont subi le protocole de stérilisation suivant (**Fatarna, 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 chacun et laissez sécher

5. Préparation du sol

Le substrat utilisé est constitué d'un mélange de sable et de terreau industriel à des proportions respectives de (1v/2v). Avant de l'utiliser, le sable subit 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, Il est ensuite rincé plusieurs fois à l'eau distillé, séché à l'air libre (Aoumeur, 2012). Ce mélange est stérilisé dans un autoclave pendant 45 minutes.

6. Dispositif expérimental

Traitement du sol

Le stress appliqué sur ces plantes est réalisé par le plomb et le cadmium, dont les Traitements sont les suivantes

Le traitement 1 : témoins sans plomb et sans cadmium.

Le traitement 2 : plantes traitée par 800 ppm du plomb.

Le traitement 3 : plantes traitée par 12 ppm du cadmium

Dans un pot contenant 500 grammes de substrat (terreau et sable), nous avons planté 8graines de blé sélectionnés au hasard, en plaçant chaque grain à une profondeur de 1 cm nous avons répété cette processus dans 36 pots 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 03. 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

Tableau 03. Codages des traitements utilisés

Codage	Traitement
So	Sol + Eau distillé
SCd	Sol + Cadmium (12 ppm)
SCA	Sol + Consortium A (bactéries isolées des racines de <i>stipa tenacissima</i>)
SCB	Sol + Consortium B (bactéries isolées du sol de <i>stipa tenacissima</i>)
S(CA x CB)	Sol + Consortium A + Consortium B
SCA+ Cd	Sol + Consortium A + Cd
SCB+ Cd	Sol + Consortium B + Cd
S(CA x CB) + Cd	Sol + Consortium A + Consortium B + Cd
SPb	Sol + Plomb (800 ppm)
SCA+ Pb	Sol + Consortium A + Pb
SCB+ Pb	Sol + Consortium B + Pb
S(CA x CB) + Pb	Sol + Consortium A + Consortium B + Pb

7. L'arrosage

L'arrosage est effectué chaque jour pendant une semaine et puis trois fois par semaine pendant un mois par 100ml d'eau distillée pour chaque pot



Figure 06. Dispositif expérimental des plantules de *Triticum durum* après l'application des isolats et des métaux lourds et l'arrosage (Younes et Kefali 2022).

8. Méthodes et mesures adoptées

8.1. Paramètres morphologique et physiologiques

8.1.1. Nombre des feuilles et des racines et la longueur de la partie aérienne et la partie souterraine.

Nous avons soigneusement extrait une plante avec ses racines de chaque pot au hasard, puis compté les feuilles et les racines. La longueur des feuilles et des racines mesurées en (cm) par un pied à coulisse

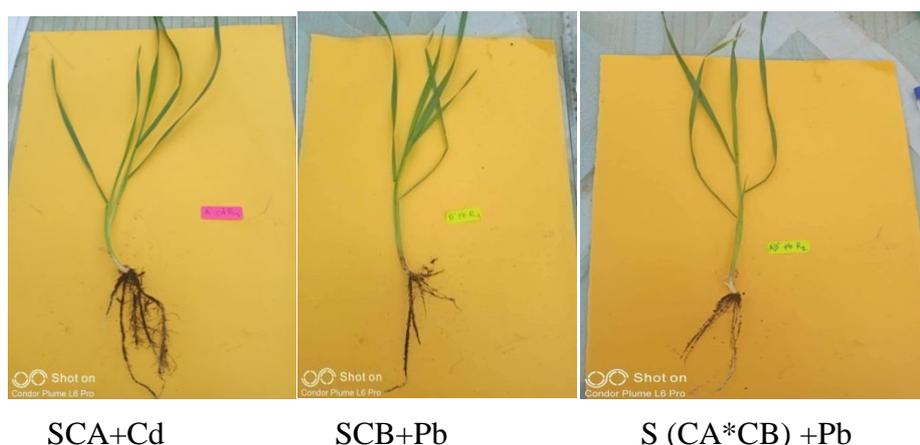


Figure 07. Plantes de *Triticum durum* stressé au Cd et Pb

(Younes et Kefali 2022).

8.1.2. Le poids frais et le poids sec

Nous avons utilisé la balance pour peser la matière végétale fraîche et sèche, et utilisé l'étuve pour sécher nos échantillons.

8.1.3. La biomasse végétale

Pour la Biomasse végétale:

Nous devons convertir le poids sec en pourcentage :

Poids frais (g) $\times 100\%$

Poids sec (g) $\times X\%$

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

8.1.4. Surface foliaire

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).

8.1.5. Taux de germination

Après le semis, nous avons effectué le comptage des graines a germés dans chaque pot, le paramètre de germination évalué pour chaque provenance est le taux de germination, qui correspond au pourcentage des graines de *Triticum durum* germées après quatorze jours selon **come (1970)**.

FGP (%) = Nombre de graines germées / Total des graines testées × 100

8.1.6. Teneur relative en eau (RWC)

La teneur relative en eau est déterminée selon la méthode de Barrs et Weatherley (1962) puis par **(Scippa et al, 2004)**.

La teneur relative en eau RWC est calculée selon la formule suivante :

$$RWC (\%) = [(PF - Ps) / (PpT - Ps)] \times 100$$

PF: pods fairs (g)

Ps : poids sec (g)

PpT : poids de pleine turgescence (g)

8.2. Paramètres biochimiques

8.2.1. Teneur en chlorophylle

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



**Figure 08. Appareil de mesure la chlorophylle (chloro-mètre)
(Younes et Kefali 2022).**

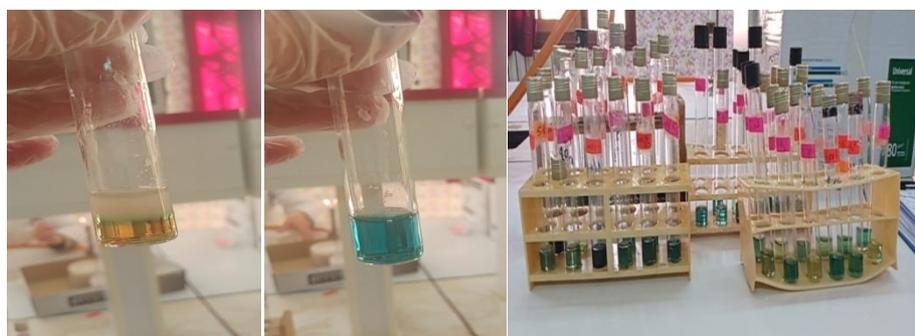
8.2.2. Dosage des sucres solubles totaux

Les sucres solubles totaux sont dosés par la méthode de (Dubois et *al.* 1956). La densité optique est lue à une longueur d'onde de 585 nm. Les valeurs obtenues sont converties en teneur de sucres solubles à partir de la courbe d'étalonnage.

Mode opératoire

Préparation du réactif: 0,2 g anthrone dans 100 ml acide sulfurique (H_2SO_4), il doit rester au moins 4h avant leur utilisation et conserver dans un flacon sombre.

Remarque: ce réactif est préparé sous la haute, dans un bécher verser une petite quantité d'acide sulfurique (H_2SO_4) +0,2 g anthrone (agiter bien par l'agitateur) puis compléter à 100 ml par l'acide sulfurique.



**Figure 09. Les échantillons végétaux + le réactif (anthrone + acide sulfurique)
(Younes et Kefali 2022)**

8.2.3. Dosage des protéines totales

Les protéines sont dosées selon la méthode de Bradford (1976), qui utilise le bleu brillant de Coomassie (BBC) comme réactif et le sérum d'albumine bovine (BSA) comme standard. Le dosage s'effectue en 3 étapes :

- **Préparation de l'échantillon:** (0.1 g) de l'échantillon de chaque pot est broyé dans un mortier avec 5 ml d'eau distillée, puis filtré et versé dans des tubes.
- **Préparation de réactif de Bradford:** pour préparer Ce réactif, IL faut prendre 0.1 g de BBC (Bleu brillant de Coomassie), lui ajouter 50 ml d'éthanol à 95% puis le placer sur un agitateur pendant 2 heures. Rajouter ensuite 100 ml d'acide ortho phosphorique à 85% et compléter à l'eau distillée jusqu'à 1 litre.
- **Le dosage:** dans des tubes à essai propres, on prélève 0.2 ml de l'échantillon végétal et 1.6 ml d'eau distillée (à l'aide d'une micropipette), 5 minutes avant la lecture on ajoute 0.2 ml du réactif de Bradford.

Le dosage se fait par lecture au spectrophotomètre à la longueur d'onde 595 nm après l'étalonnage de l'appareil par la solution témoin (1.8 ml d'eau distillée + 0.2 ml du réactif de Bradford).



Figure 10. Le réactif de Bradford + les échantillons végétal (Younes et Kefali 2022).

8.2.4. Dosages des flavonoïdes

La méthode du trichlorure d'aluminium (Bahorun et *al.* 1996) est utilisée pour quantifier les flavonoïdes.

Principe

La méthode repose sur l'aptitude des flavonoïdes à chélater les métaux (fer et aluminium), cette propriété est propre aux groupements hydroxyle des poly phénols flavonoïdes capable de donner un complexe jaunâtre en présence d'aluminium. La coloration jaune est proportionnelle à la quantité de flavonoïdes présente dans l'extrait (Ribéreau, 1982).

Mode opératoire

Avec une légère modification. 50 μ l de chaque extrait est mélangé avec de 50 μ l de trichlorure d'aluminium ($AlCl_3$) (200mg d' $AlCl_3$ sont dissouts dans 10ml d' H_2O) après 5 min ajoute 150 μ l de d'acétate de sodium ($C_2H_3Na_2$) (500mg d' $C_2H_3Na_2$ son dissouts dans 10ml d' H_2O) est ajouté au mélange, durant 2h 30 heures à la température ambiante et à l'obscurité. L'absorbance est mesurée à 440nm contre un blanc à l'aide d'un spectrophotomètre. La concentration des flavonoïdes a été déterminé à partir d'une courbe d'étalonnage réalisé par un standard étalon la que cétine a différentes concentrations dans les mêmes conditions que l'échantillon, et exprimée en mg d'équivalent de Que cétine paragramme de matière fraîche (mg EQ/g MF).

8.2.5. La teneur en phénols totaux

La teneur en poly phénols totaux est déterminée en utilisant le réactif de Folin Ciocalteu (Singleton et Rossi, 1965). Le réactif FCR, constitué d'un mélange d'acide phosphotungstique ($H_3PW_{12}O_4$) et d'acide phosphomolybdique ($H_3PMo_{12}O_4$), est réduit lors de l'oxydation des phénols, en mélange d'oxydes de tungstène (W_8O_{23}) et de molybdène (Mo_8O_{23}). La coloration bleue résultante est proportionnelle à la teneur en phénols totaux, et possède une absorption maximale aux environs de 750 -765 nm.

Mode opératoire

- Préparation de la solution de carbonate de sodium (Na_2CO_3) à 7,5% Cette solution est préparée en dissolvant 7,5 g de Na_2CO_3 dans 100 ml d'eau distillée.
- Préparation de l'extrait de plante, une masse de 100 mg de feuilles sont extraits en présence de méthanol 80% (1 ml). L'extrait est ensuite agité puis centrifugé à 5000g pendant 5 min.
- Préparation de Folin Ciocalteu (FCR) Dans une fiole jaugée de 10 ml on place 1ml de la solution FCR concentré (2M) et on complète le volume avec de l'eau distillée.

9. 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 Dunette dans le cas de l'ANOVA 1 et à l'aide du test de Tukey dans le cas de l'ANOVA, lorsque cela est nécessaire (différences au moins significatives).

Résultat et discussion

RESULTAT

1. Les paramètres morpho-physiologiques

✓ L'effet de PGPR sur le Taux de germination

L'analyse de teste de kruskal-wallis (**Tableau 04**) montre qu'il ya un effet significative ($p = 0,037$) en présence de cadmium sur le taux de germination de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées et un effet hautement significative ($p = 0,007$) en présence de plomb.

Tableau 04. Analyse de Test de Kruskal-Wallis de taux de germination de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées.

	en présence de cd	en présence de Pb
K (Valeur observe)	14,91 7	19,567
K (Valeur critique)	14,067	14,067
DDL	7	7
p-value (bilatéral)	0,037	0,007
Alpha	0,05	0,05

Le taux de germination des plantes témoin est 100%. dans le sol (SCB et SCA*SCB + Cd), ce taux de germination s'abaisse progressivement pour atteindre ($75\% \pm 0,70\%$) ($14,43 \pm 0,74$) la différence notée est hautement significative . Pour le sol SCd le taux de germination diminue légèrement arrive à ($83,33 \pm 7,21$) et diminue avec un effet significative (figure11), et dans le sol SPb, SCB, SCA+Pb, SCB+Pb. le taux de germination diminue légèrement atteignant ($66,66\% \pm 14,43$), ($79,16\% \pm 0, 83$) ($.33\%7,21$)($75\% \pm 7,21$), cette diminution est très hautement significative par rapport au témoin 100% (**figure11B**).

Résultat et discussion

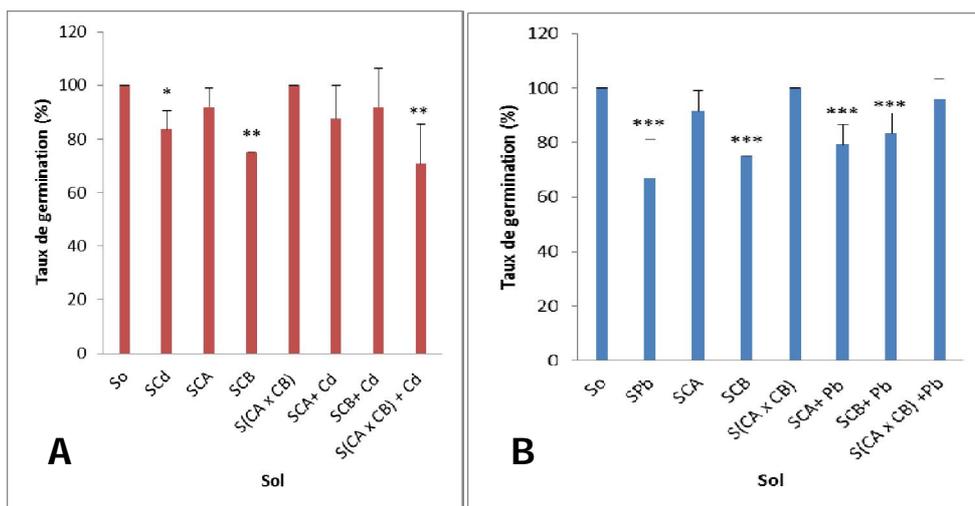


Figure 11. Effet de la Co-inoculation avec des (PGPR) sur le taux de germination de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées (A: en présence de cadmium, B : en présence de plomb).

✓ L'effet PGPR sur le nombre des feuilles

L'analyse de la variance (**Tableau 05**) montre qu'il y a un effet très hautement significative ($p < 0,001$) sur le nombre des feuilles de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées en présence de cadmium.

Tableau 05. Analyse de la variance de nombre des feuilles de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées en présence de cadmium.

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
	7	22,667	3,238	7,771	0,000

L'analyse du Test de Kruskal-Wallis (**Tableau 06**) montre qu'il y a na pas un effet significatif ($p > 0,05$) sur le nombre des feuilles de plante de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées en présence de plomb.

Résultat et discussion

Tableau 06. Analyse du Test de Kruskal-Wallis nombre des feuilles de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées (en présence de plomb).

K (Valeur observée)	12,767
K (Valeur critiques)	14,067
DDL	7
p-value (bilatérale)	0,078
Alpha	0,05

L'analyse statistique (**Figure 12A**) montre que la différence de nombre des feuilles est très hautement significative dans le sol S (CA*CB) + Cd arrive à $5.66\% \pm 0.5$ et hautement significative dans le sol SCB + Cd et SCA+Cd arrive à $5\% \pm 0$, et dans le cas de plomb (**Figure12**) il ya une augmentation non significative par rapport au témoin $3\% \pm 1$.

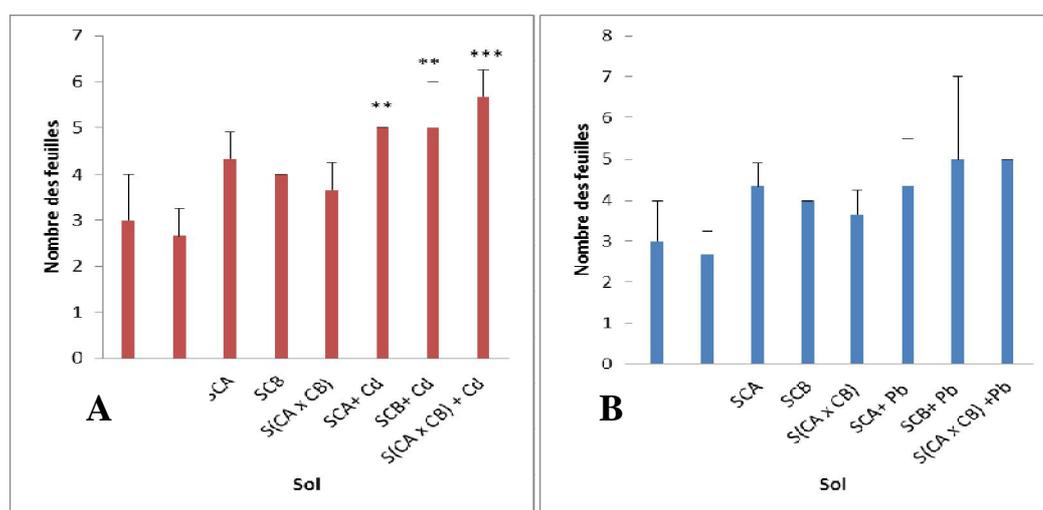


Figure 12. Effet de la Co-inoculation avec des (PGPR) sur le nombre des feuilles de *Triticum durum* cultivé dans des conditions contrôlées (A: en présence de cadmium, B : en présence de plomb).

✓ L'effet PGPR sur le nombre des racines.

L'analyse de Test de Kruskal-Wallis (**Tableau 07**) montre qu'il y a na pas un effet significative ($p > 0.05$) sur le nombre des racines de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées en présence de cadmium et un effet significative ($p < 0.05$) en présence de plomb.

Résultat et discussion

Tableau 07. Analyse du Test de Kruskal-Wallis du nombre des racines de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées en présence.

	A: en présence de cd	B: en présence de Pb
K (Valeur observe)	12,710	14,354
K (Valeur critique)	14,067	14,067
DDL	7	7
p-value (bilatérale)	0,079	0,045
Alpha	0,05	

Les résultats présentés sur la (**Figure 13**) a montrent une augmentation du nombre des racines sous l'influence des différents traitements appliqués, notamment dans le sol SCB arrive à 11 ± 2 , par rapport au groupe témoin. 6.33 ± 0.57 , dans le sol S (CA*CB) +Cd soit une augmentation de 7.33 ± 0.57 (différence significative) et un effet hautement significative dans le sol SCB atteignant 11 ± 2 .

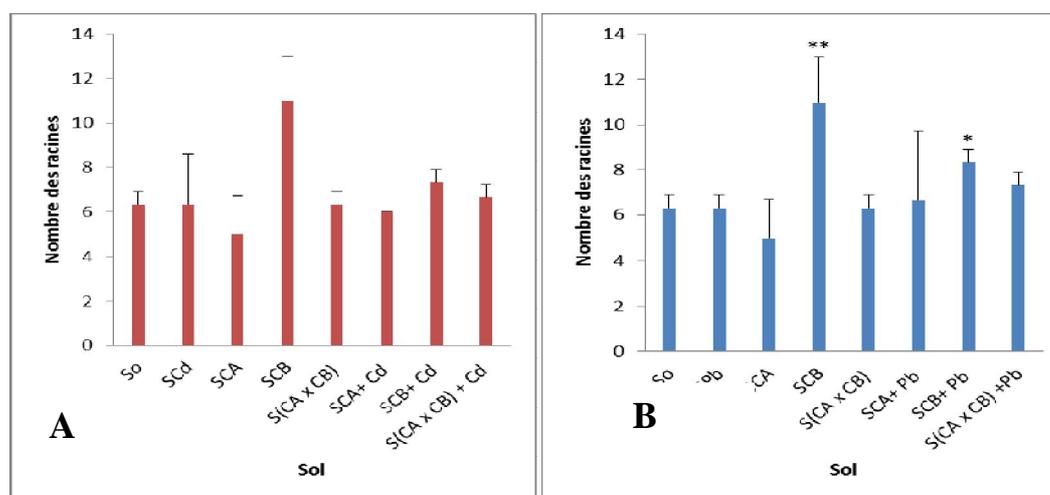


Figure 13. Effet de la Co-inoculation avec des (PGPR) sur le nombre des racines des plantes de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées (**A: en présence de cadmium, B : en présence de plomb**)

Résultat et discussion

✓ L'effet PGPR sur la longueur de la partie aérienne

L'analyse de Test de Kruskal-Wallis (**Tableau 08**) montre qu'il Ya un effet hautement significative ($p \leq 0,01$) sur la longueur de la partie aérienne de plante de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées en présence de cadmium et il ya na pas un effet significative ($p > 0,05$) en présence de Plomb.

Tableau 08. Analyse du Test de Kruskal-Wallis de la longueur de la partie aérienne de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées.

	En présence de cd	en présence de Pb
K (Valeur observe)	18,518	13,822
K (Valeur critique)	14,067	14,067
DDL	7	7
p-value (bilatérale)	0,010	0,054
Alpha	0,05	0,05

L'analyse de ces résultats révèle que la longueur de la partie aérienne des plantes dans le sol SCB diffère de façon significative arrive à $29.23 \text{ cm} \pm 2.54$ de celle enregistrée chez le plante témoins $18.98 \text{ cm} \pm 4.81$. bien qu'enregistrement une augmentation très hautement significative chez les plantes dans le sol SCA+Pb, SCB + Pb, S (CA*CB) +Pb, cette augmentation atteignent($35,56 \text{ cm} \pm 0.56$.31), ($43 \text{ cm} \pm 2.08$.32), (06 ± 1.58) respectivement. Dans le sol SCA, S (CA*CB) .Ilya un effet hautement significative atteignant ($30,66 \text{ cm} \pm 1.66$). ($30,23 \text{ cm} \pm 2.29$) respectivement (**Figure14A**). Pour le cas de plomb Ilya une augmentation non significative(**Figure 14B**).

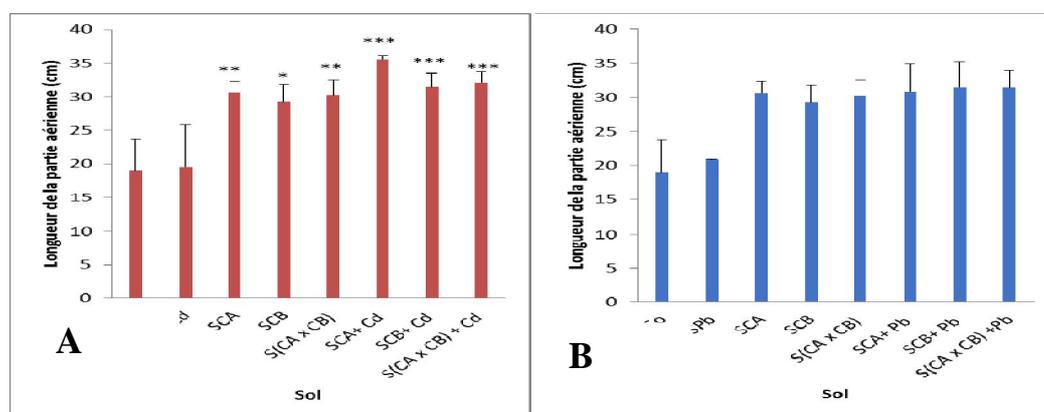


Figure14. Effet de la Co-inoculation avec de (PGPR) sur la longueur de la partie aérienne de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées (A: en présence de cadmium, B : en présence de plomb).

Résultat et discussion

✓ L'effet PGPR sur la longueur de la partie racinaire

L'analyse de la variance (**Tableau 09**) montre qu'il ya un effet non significative ($p > 0,05$) sur la longueur de la partie racinaire de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées en présence de cadmium et un effet significative ($p < 0,05$) en présence de Plomb.

Tableau 09. Analyse de variance de la longueur de la partie racinaire de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées.

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
En présence de cd	7	71,756	10,251	2,647	0,051
En présence de Pb	7		14,777	3,747	0,014

Les résultats présentés dans la (**Figure15**) montrent que la longueur de la partie racinaire diminue remarquablement sous l'effet des différents traitements appliqués (différence non significative) le sol S(CA*CB), (SA*CB)+Pb, ont montré la longueur de la partie racinaire la plus élevée (16.16cm \pm 0.90) et (10.63 \pm 2.58) alors que Les autres sol SCA+Pb et SCB ont montré la longueur de la partie racinaire allant de (10.20cm \pm 2.21)et (11.80cm \pm 0.45) .comparativement au témoin (14.66cm \pm 2.08).

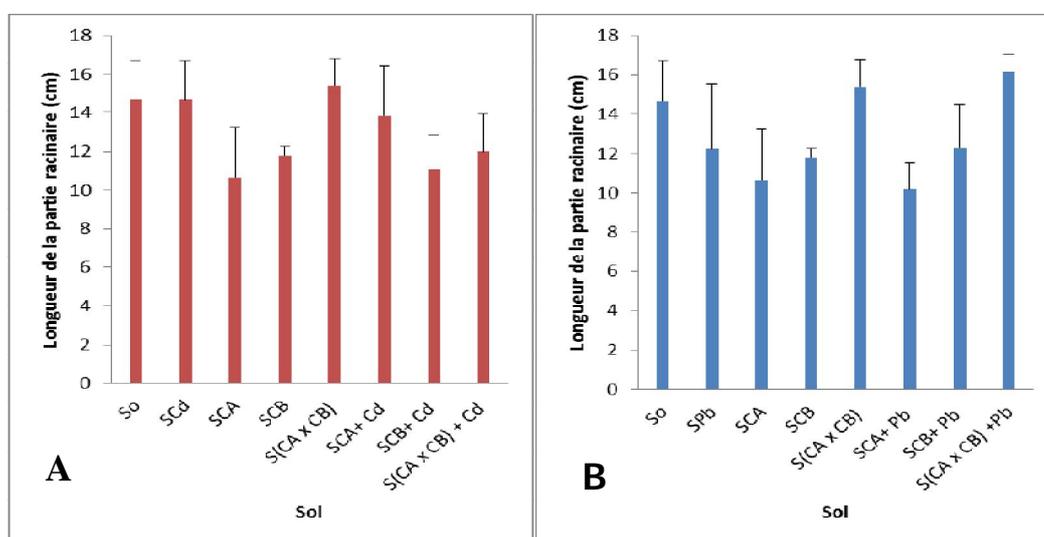


Figure15. Effet de la Co-inoculation avec de (PGPR) sur la longueur de la partie racinaire de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées (**A: en présence de cadmium, B : en présence de plomb**)

Résultat et discussion

✓ L'effet PGPR sur la surface foliaire

L'analyse de la variance (**Tableau 10**) montre qu'il ya un effet très hautement significative ($p < 0,001$) sur la surface foliaire de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées en présence de cadmium. Et un effet hautement significative ($p < 0,01$) en présence de Plomb.

Tableau 10. Analyse de variance de la surface foliaire de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées.

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
En présence de cd	7	197,731	28,247	8,802	0,000
En présence de Pb	7	117,562	16,795	5,323	0,003

La surface foliaire des plantes témoin est $6,22\text{cm}^2 \pm 1$ dans le sol SCA+Cd et S (CA*CB) + Cd cette surface augmentée progressivement atteignant ($11,98\text{ cm}^2 \pm 2.43$), ($11,85\text{cm}^2 \pm 2.65$). Cette différence notée hautement significative, dans le sol S (CA*CB) + Cd la surface foliaire s'augmente arrive à ($15,04\text{cm}^2 \pm 0.60$), cette augmentation est très hautement significative et dans le sol SCACB, SCA+Pb, S (CA*CB) +Pb légèrement augmentée arrive à ($10,52\text{cm}^2 \pm 0.64$), ($10.64\text{cm}^2 \pm 1.38$) ($11.16\text{cm}^2 \pm 0.60$) cette augmentation est significative (**Figure 16**).

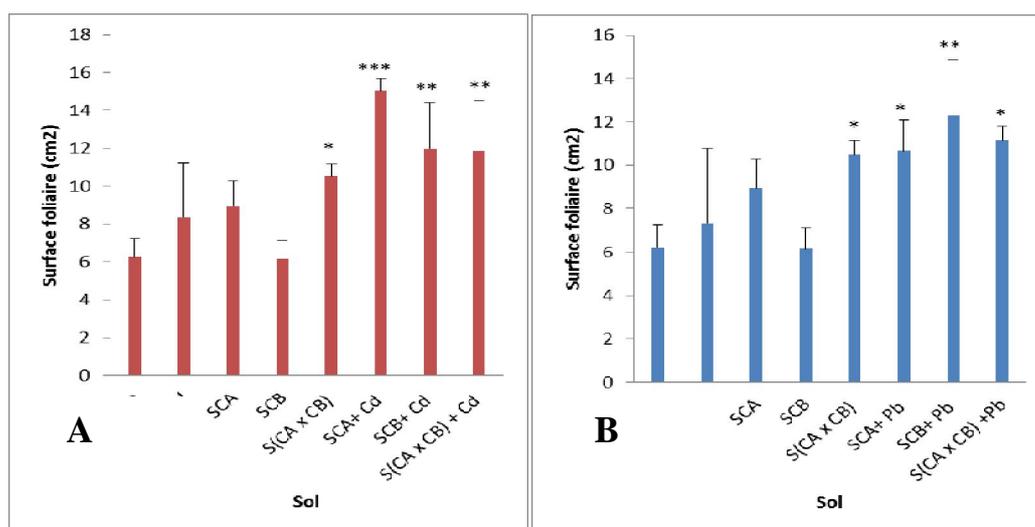


Figure 16. Effet de la Co-inoculation avec des (PGPR) sur la surface foliaire de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées (**A**: en présence de cadmium **B** : en présence de plomb)

Résultat et discussion

✓ L'effet PGPR sur la teneur relative en eau

L'analyse de la variance (**Tableau 11**) montre qu'il y a un effet très hautement significative ($p < 0,001$) sur la teneur relative en eau de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées en présence de cadmium et en présence de Plomb.

Tableau 11. Analyse de variance de la teneur relative en eau des *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées.

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
En présence de cd	7	3248,425	464,061	8,037	0,000
En présence de Pb	7	2813,259	401,894	7,882	0,000

La teneur relative en eau des feuilles des plantes témoin (**Figure 17**) est ($48.50\% \pm 5.69$), cette teneur s'augmente pour atteindre ($74.33\% \pm 10.05$), ($76.50\% \pm 8.33$) ($73.10\% \pm 1.90$) respectivement pour le sol SCA, SCB+Cd, SCA+Pb, cette augmentation est hautement significative. et significative dans le sol S(SA*CB)+Pb arrive à ($70.21\% \pm 7.15$) la différence de la TRE des feuilles est très hautement significative dans le sol S(CA*CB)+Cd, SCA, SCB+Pb atteindre ($79,11\% \pm 3.75$), ($76.50\% \pm 8.33$), ($86.36\% \pm 8.7$) respectivement.

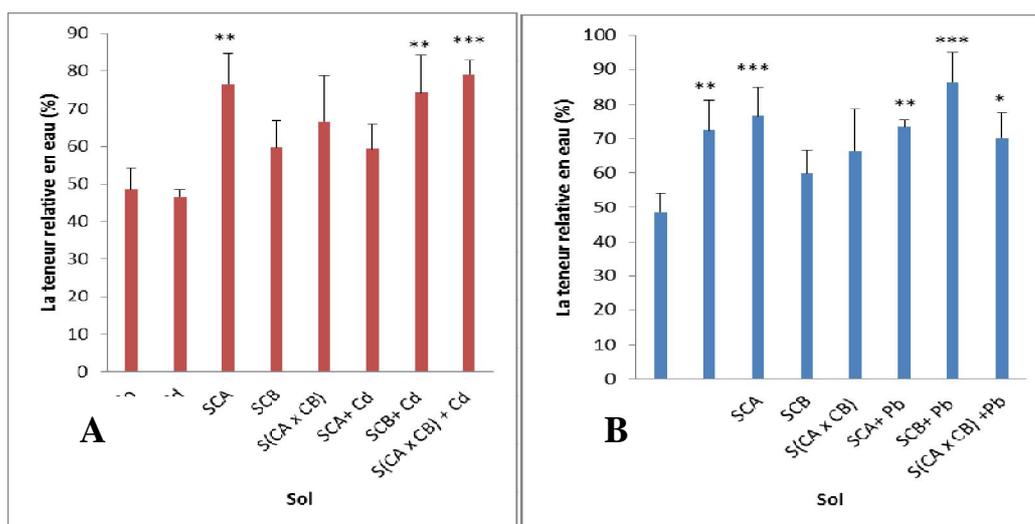


Figure 17. Effet de la Co-inoculation avec de (PGPR) sur la teneur relative en eau de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées (**A**: en présence de cadmium, **B**: en présence de plomb).

Résultat et discussion

✓ L'effet de PGPR sur la teneur relative en chlorophylle

L'analyse de Test de Kruskal-Wallis (**Tableau 12**) montre qu'il y a un effet significative ($P < 0,05$) sur la teneur relative en chlorophylle de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées en présence de cadmium et un effet hautement significative ($p < 0,01$) en présence de Plomb

Tableau 12. Analyse du test de Kruskal-Wallis de teneur relative en chlorophylle de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées

	En présence de cd	En présence de Pb
K (Valeur observée)	15,860	18,736
K (Valeur critique)	14,067	14,067
DDL	7	7
p-value (bilatérale)	0,026	0,009
Alpha	0,05	0,009

Les résultats illustrés par la (Figure 18) montrent que la teneur en chlorophylles totales passe de $2,32\text{CCI} \pm 0,93$ chez les plantes témoins à $(6,48\text{CCI} \pm 1,29)$, $(6,48\text{CCI} \pm 1,29)$, $(5,48\text{CCI} \pm 2,13)$ chez les plantes dans sol SCA, SCA+CD, S(CA*CB) + Pb, soient des pourcentages d'augmentation très hautement significative de (64% .58%, 86%), et hautement significative dans le sol SCB+ Pb, S(CA*CB) Tandis que $(4,20\text{CCI} \pm 0,7,4)$, $(7,0\text{CCI} \pm 1,99)$ la différence devient significative dans le sol S(CA*CB)+Cd et SCA*CB arrive à $(4,70\text{CCI} \pm 1,99)$, $(4,70\text{CCI} \pm 1,99)$.

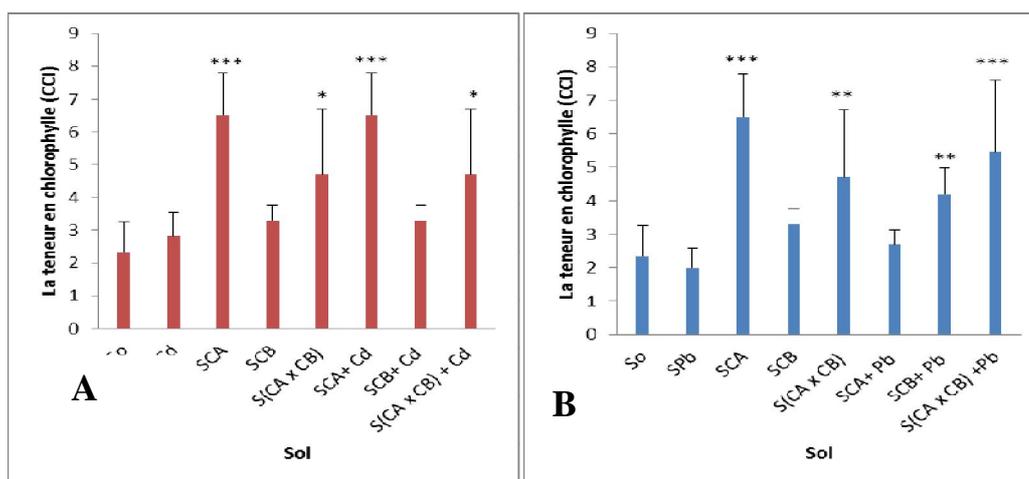


Figure 18. Effet de la Co-inoculation avec de (PGPR) sur la teneur en chlorophylle de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées (**A: en présence de cadmium, B : en présence de plomb**).

Résultat et discussion

✓ L'effet PGPR sur le poids frais

L'analyse de variance a deux facteur de classification présente dans le (**Tableau13**) montre qu'il y a un effet très hautement significative ($p \leq 0,001$) sur le poids frais de l'organe de *Triticum durum* et aussi le sol inoculé en présence de cadmium et plomb et l'interaction sol*organe en présence de cadmium et un effet non significative ($P > 0,05$) sur l'interaction sol*organe en présence de plomb

Tableau13. Analyse de variance à deux facteurs de classification présente le poids frais *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées

	Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
En présence de Cd	Sol	7	0,607	0,087	12,437	< 0,0001
	Orange	1	7,420	7,420	1063,643	< 0,0001
	Sol*Orange	7	0,541	0,077	11,088	< 0,0001
En présence de Pb	Sol	7	0,800	0,114	4,784	0,001
	Orange	1	4,768	4,768	199,555	< 0,0001
	Sol*Orange	7	0,374	0,053	2,237	0,057

Au niveau des feuilles, Le pois frais des plantes témoin est de $0,53g \pm 0,93$, dans le sol SCB, SCA+Cd, SCB+Cd, S(CA*CB) + Cd atteignant $(0,90g \pm 0,1)$, $(1,27g \pm 0,1)$, $(1,04g \pm 0,07)$, $(1,06, g \pm 0,13)$ respectivement, La différence notée est très hautement significative cette poids augmente significativement atteignant $(1g \pm 0,2)$, $(1,03g \pm 0,4)$, $(0,80g \pm 0,13)$, $(0,82g \pm 0,11)$ dans le sol S(CA*CB) + Pb , SCB+Pb, SCd, SCA

Au niveau des racines. Pour le poids frais des racines, Ilya une augmentation non significative pour les différents traitements par rapport au témoin $(0,062g \pm 0)$ (**Figure 19**)

Résultat et discussion

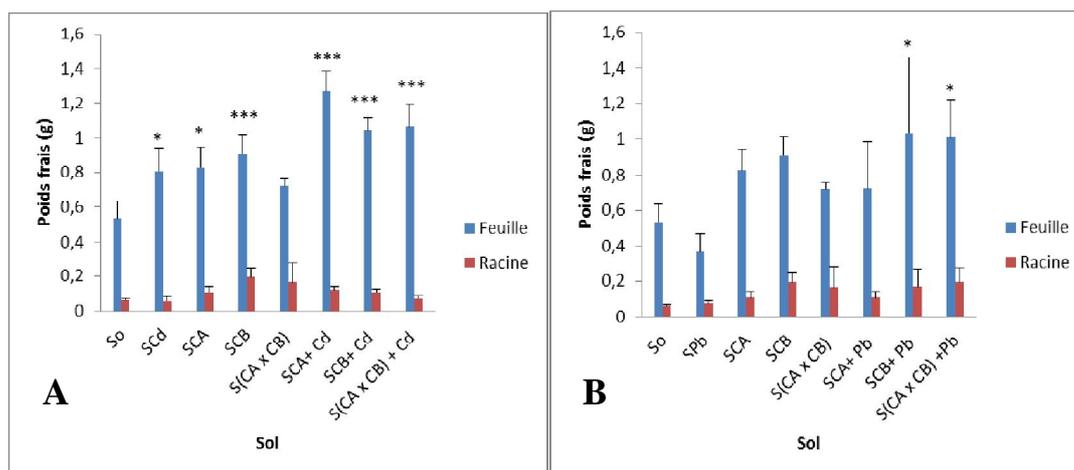


Figure 19. Effet de la Co-inoculation avec de (PGPR) sur le poids frais de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées (**A: en présence de cadmium, B : en présence de plomb**).

✓ L'effet de PGPR sur le Poids sec

L'analyse de variance a deux facteurs de classification présente (**Tableau14**) montre qu'il y a un effet très hautement significative ($p \leq 0,001$) sur le poids sec de l'organe de *Triticum durum* et le sol inoculé en présence de cadmium et en présence de plomb et pour l'interaction sol*organe en présence de plomb et un effet significative ($P \leq 0,05$) sur l'interaction sol*organe en présence de cadmium, qu'il y a un effet très hautement significative ($p \leq 0,001$) sur l'interaction sol* organe en présence de cadmium.

Tableau 14. Analyse de variance à deux facteurs de classification présente le poids sec de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées.

	Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
En présence de Cd	Q1	7	0,014	0,002	4,912	0,001
	Q2	1	0,063	0,063	156,361	< 0,0001
	Q1*Q2	7	0,008	0,001	2,848	0,020
En présence de Pb	Q1	7	0,017	0,002	8,885	< 0,0001
	Q2	1	0,113	0,113	418,012	< 0,0001
	Q1*Q2	7	0,024	0,003	12,491	< 0,0001

Au niveau des feuille le pois sec des plantes témoin dans le sol S0 est de ($0,086g \pm 0,01$), cette poids sec augmenté légèrement dans le sol SCd, SCA+Cd, SCB+Cd, S(CA*CB) + Cd, S(CA*CB) + Pb atteignant ($0,13g \pm 0,01$), ($0,18g \pm 0,01$), ($0,14g \pm 0,04$), ($0,15 \pm 0,01$), ($0,14g \pm 0,02$) respectivement, La différence notée est très hautement significative et hautement significative dans le sol SCB+Pb atteignant ($0,13g \pm 0,05$)

Résultat et discussion

Au niveau des racines, le poids frais augmente pour les différents traitements sous un effet non significative par rapport au témoin ($0,016g \pm 0,01$) dans le sol SCB ont montré la longueur de la partie aérienne la plus élevée $0,04g \pm 0$, Alor que dans le sol S (CA*CB) +Cd, allène a ($0,15g \pm 0,01$) (**Figure20**).

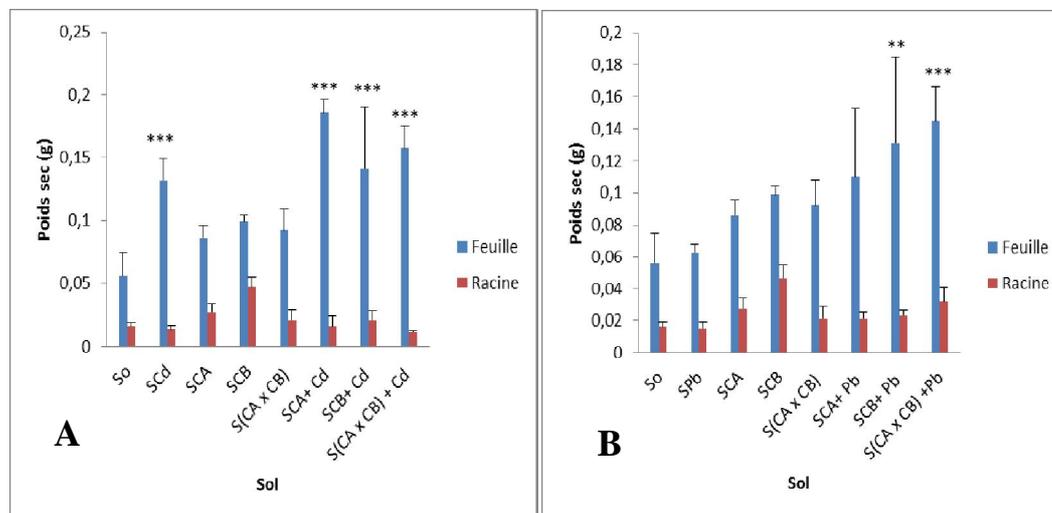


Figure 20. Effet de la Co-inoculation avec de (PGPR) sur le poids sec de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées (**A: en présence de cadmium, B : en présence de plomb**).

✓ L'effet PGPR sur la biomasse végétale

L'analyse de variance a deux facteur de classification présente (**Tableau 15**) montre qu'il y a un effet très hautement significative ($p < 0,001$) sur la biomasse de l'organe de *Triticum durum* en présence de cadmium et plomb, et un effet significative pour le sol inoculé ($P \leq 0,05$) et l'interaction sol*organe ($P \leq 0,05$) en présence de cadmium et plomb.

Tableau15. Analyse de la variance à deux facteurs de classification la biomasse de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées.

	Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
En présence de Cd	Q1	7	140,900	20,129	0,949	0,484
	Q2	1	744,111	744,111	35,076	< 0,0001
	Q1*Q2	7	301,138	43,020	2,028	0,082
En présence de Pb	Q1	7	232,911	33,273	1,392	0,243
	Q2	1	1139,954	1139,954	47,674	< 0,0001
	Q1*Q2	7	223,070	31,867	1,333	0,267

Résultat et discussion

Au niveau des racines, les résultats présentés dans la (Figures21) montrent que la biomasse végétale des racines diminue légèrement remarquable sous l'effet des différents traitements appliqués (différence non significative) arrive à $(12.95\% \pm 2)$ dans sol S (CA*CB), contre le sol SCd, SCA augmenté l'égerment à $(26,16\% \pm 9)$. $(58\ 20\% \pm 4)$ respectivement .par rapport au témoin $(25\% \pm 2.5)$.mais cette augmentation non significative.

Au niveau des feuilles, la biomasse s'abaisse progressivement pour les différents traitements sous un effet non significative par rapport au témoin $(13,61\% \pm 2.52)$, dans le sol SCd et SPb il ya une augmentation non significative arrive à $(16.73\% \pm 3.94)$ et $(18.03\% \pm 4.32)$.

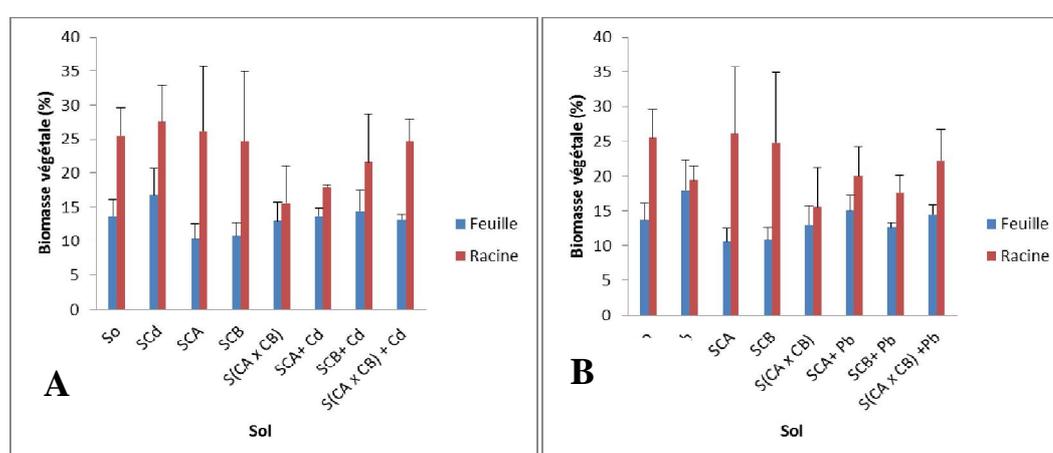


Figure 21. Effet de la Co-inoculation avec des (PGPR) sur la biomasse des plantes de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées (A: en présence de cadmium, B : en présence de plomb).

2. Les paramètres biochimiques

✓ L'effet de PGPR sur la teneur en sucre soluble

L'analyse de variance a deux facteur de classification présente (Tableau16) montre qu'il y a un effet très hautement significative ($p \leq 0,001$) sur la teneur en sucre soluble de l'organe de *Triticum durum* et de le sol inoculé ($p = 0.0001$) et l'interaction sol*organe ($P \leq 0,001$) en présence de cadmium et plomb.

Résultat et discussion

Tableau 16. Analyse de variance à deux facteurs de classification présente la teneur en sucre soluble de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées.

	Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F
En présence de Cd	Q1	7	189,107	27,015	8,258
	Q2	1	65,267	65,267	19,950
	Q1*Q2	7	213,418	30,488	9,319
En Présence de Pb	Q1	7	388,452	55,493	19,886
	Q2	1	74,341	74,341	26,640
	Q1*Q2	7	333,036	47,577	17,049

Au niveau des feuilles les résultats illustrés par la (**Figure 22**) montre que la teneur en sucre soluble des feuilles, augment atteignant 12.95mg/g MF. Cette augmentation est très hautement significative dans le sol S(CA*CB),et dans le sol SCd, SCA, SCB, SCB+Cd, SPb, S(CA*CB)+Pb diminue l'égerment arrive à (2.31mg/g MF \pm 0.4) , (2.77mg/g MF \pm 0.8) (1.54mg/g MF \pm 0.2), (2.55mg/g MF \pm 0.4),(1.13mg/g MF \pm 0.08), (2.80mg/g M \pm 0.5) respectivement, comparativement au témoin (3.89l mg/g MF) .

Au niveau des racines la teneur en sucre soluble augmente significativement passant de (10.54mg/g MF \pm 2.42) chez la plante témoins dans le sol S0 à (10,55mg/g MF) dans le sol SCA+Cd ,cette augmentation est suivie par une forte augmentation très hautement significative de la teneur en sucre soluble(16,65mg/g MF \pm 2.3) par rapport au témoin (4.71mg/g MF \pm 1.43) suivie par un diminution non significative dans le sol SCd, SCA, SPb arrive a (3.88 mg/g MF \pm 1.16),(4.21mg/g MF \pm 1.5),(2.73mg/g MF \pm 0,08)

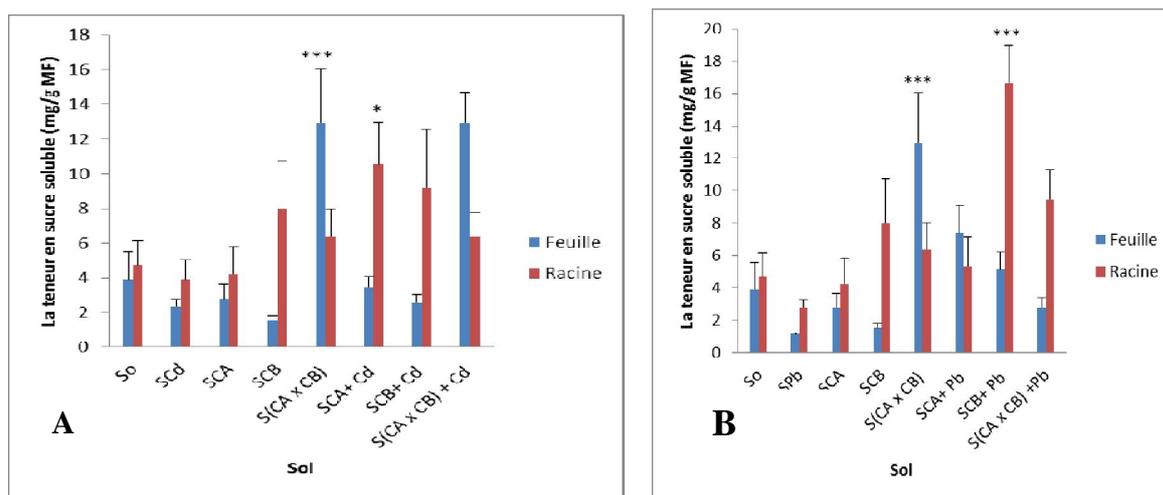


Figure 22. Effet de la Co-inoculation avec des (PGPR) sur la teneur en sucre soluble des *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées (**A: en présence de cadmium, B : en présence de plomb**).

Résultat et discussion

✓ L'effet PGPR sur la teneur en protéines soluble

L'analyse de variance a deux facteurs de classification présente (**Tableau 17**) montre qu'il y a un effet très hautement significative ($p \leq 0,001$) sur la teneur en protéines de l'organe de *Triticum durum* et de sol inoculé ($P \leq 0,001$) et sur l'interaction sol*organe ($P \leq 0,001$) en présence de plomb et sur l'organe en présence de cadmium, et un effet non significative ($P > 0,05$) en présence de cadmium.

Tableau 17. Analyse de la variance à deux facteurs de classification la teneur en protéines soluble de plantes *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées.

	Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
En présence de Cd	Q1	7	23,257	3,322	1,516	0,197
	Q2	1	605,086	605,086	276,113	< 0,0001
	Q1*Q2	7	23,001	3,286	1,499	0,203
En présence de Pb	Q1	7	126,426	18,061	15,298	< 0,0001
	Q2	1	367,012	367,012	310,861	< 0,0001
	Q1*Q2	7	112,124	16,018	13,567	< 0,0001

Au niveau des feuilles La teneur en protéines soluble mesuré chez *Triticum durum* en présence à différentes traitements est présenté dans la (**Figure 23**).

D'après les résultats obtenus la teneur en protéine foliaire augmente remarquablement sous l'effet des différents traitements, Cette augmentation est significative dans le sol SCB attendre à (11,20mg/g MF \pm 2,48), et suivie par une forte diminution très hautement significative arrive à (0,060mg/g MF \pm 0) dans le sol S(CA*CB)+Pb et un diminution non significative dans le sol SCA, SCB+Pb, arrive a (7,15mg/g MF \pm 0,5) et (7.64mg/g MF \pm 1.51) par rapport aux témoins de (7,88mg/g MF \pm 2).

Au niveau des racine, les résultats montrent aussi un augmentation légère de la teneur en protéines soluble des racines sous l'effet des différents traitements applique sauf les plante dans le sol SCB+Cd, S(CA*CB)+Cd, SPb, SCA+Pb diminue arrive à (0,89mg/g MF \pm 0,12) (0,59mg/g MF \pm 0,1) (0,14mg/g MF \pm 0,5), (1,27mg/g MF \pm 0) respectivement, par rapport au témoin (1,83 mg/g MF \pm 2).

Résultat et discussion

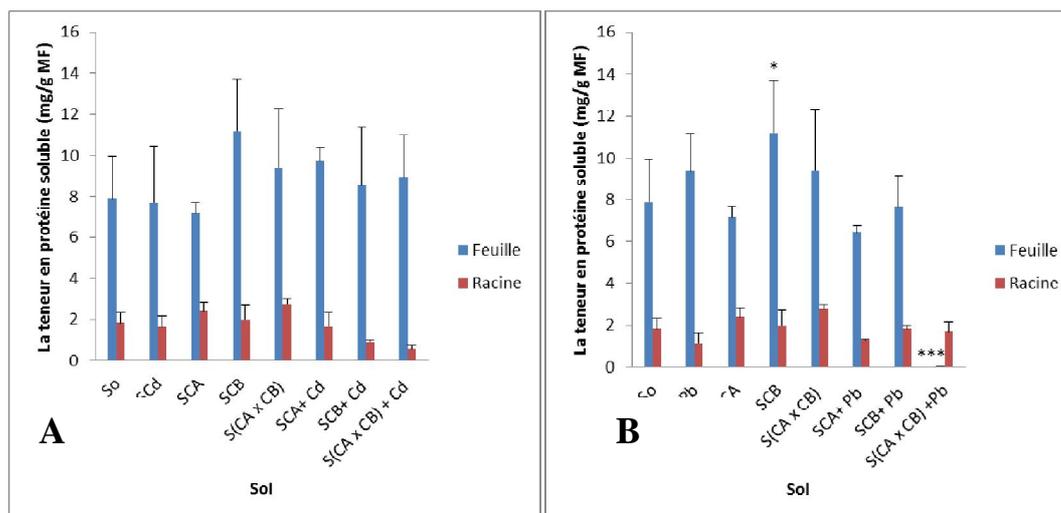


Figure 23. Effet de la Co-inoculation avec des (PGPR) sur la teneur en protéine soluble des plantes de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées (**A: en présence de cadmium**, **B : en présence de plomb**).

✓ L'effet de PGPR sur la teneur en phénols totaux

L'analyse de variance à deux facteurs de classification (**Tableau 18**) montre qu'il y a un effet très hautement significative ($p < 0,001$) sur la teneur en phénols totaux de l'organe de *Triticum durum* en présence de cadmium et plomb et aussi sur le sol inoculé en présence de cadmium ($P \leq 0,001$) et pour l'interaction sol*organe en présence de plomb, et un effet significatif pour l'interaction sol*organe ($p \leq 0,05$) en présence de cadmium et pour le sol inoculé ($P \leq 0,05$) en présence de plomb.

Tableau 18. Analyse de la variance à deux facteurs de classification présente la teneur en phénols de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées.

	Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
En présence de Cd	Q1	7	6,219	0,888	5,312	0,000
	Q2	1	177,573	177,573	1061,823	< 0,0001
	Q1*Q2	7	4,581	0,654	3,913	0,003
En présence de Pb	Q1	7	6,274	0,896	4,222	0,002
	Q2	1	156,536	156,536	737,487	< 0,0001
	Q1*Q2	7	7,270	1,039	4,893	0,001

Résultat et discussion

La teneur en phénol totales des feuilles mesuré chez *Triticum durum* en présence à différentes traitements est présenté dans la (**Figure 24**).

Au niveau des feuilles d 'après les résultats obtenus la teneur en phénols foliaire augmente remarquablement sous l'effet des différentes traitements ,Cette augmentation est significative dans le sol S(CA*CB)+Cd, SCA+Pb attendre à (4,35mg /g MF \pm 0.06) et (3,91mg/g MF \pm 0.8) respectivement, suivie par un augmentation hautement significative arrive à (4,70mg /g MF \pm 0.70), dans le sol S (CA*CB) ,et un effet très hautement significative dans le sol SCA attendre à (5,46mg/g MF \pm 1.4) comparativement au témoin (3,11mg/g MF \pm 0.3).

Au niveau des racines, les résultats montrent aussi une augmentation très légère de la teneur en phénols racinaires sous les différents traitements applique, cette augmentation non significative et arrive à (0, 25mg/g MF0.02) de témoin.

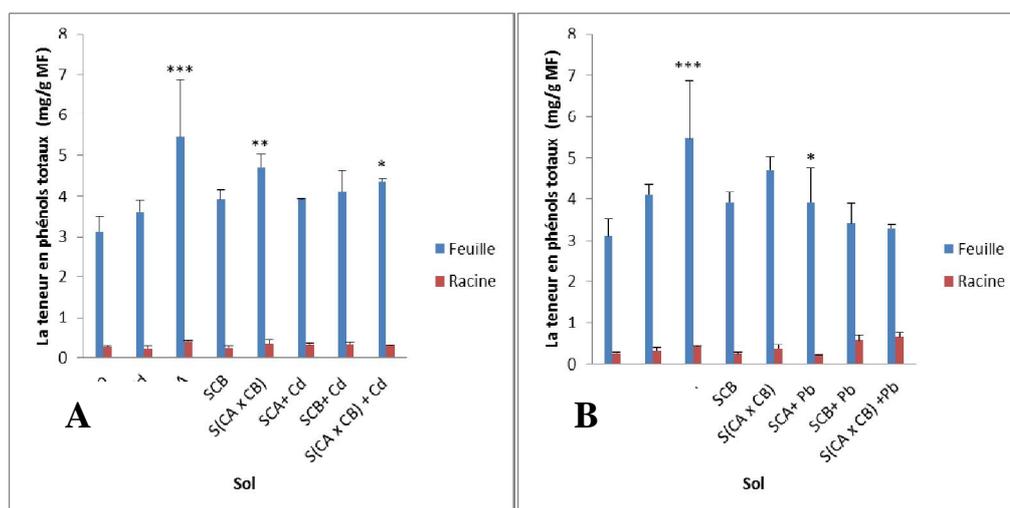


Figure24.Effet de la Co-inoculation avec des (PGPR) sur la teneur en phénol totaux de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées (**A: en présence de cadmium, B : en présence de plomb**).

✓ L'effet PGPR sur la teneur en flavonoïdes totaux

L'analyse de variance a deux facteur de classification (**Tableau19**) montre qu'il ya un effet significative ($p \leq 0,05$) sur la teneur en flavonoïdes totaux de l'organe de *Triticum durum* en présence de cadmium et hautement significative ($P \leq 0.01$) en présence de plomb et un effet très hautement significative ($P \leq 0,001$) pour le sol inoculé et l'interaction sol *organe en présence de cadmium et plomb

Résultat et discussion

Tableau19. Analyse de la variance à deux facteurs de classification présente la teneur en flavonoïdes totaux de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées.

	Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
En présence de cd	Q1	7	5,168	0,738	127,287	< 0,0001
	Q2	1	0,040	0,040	6,840	0,013
	Q1*Q2	7	1,363	0,195	33,579	< 0,0001
En présence de Pb	Q1	7	4,857	0,694	142,615	< 0,0001
	Q2	1	0,043	0,043	8,776	0,006
	Q1*Q2	7	0,576	0,082	16,898	< 0,0001

Au niveau des feuilles d'après les résultats obtenus la teneur en flavonoïde foliaire augmente remarquablement sous l'effet des différents traitements, Cette diminution est non significative dans le sol S (CA*CB) attendre à (1.40mg /g MF \pm 0.09) et très hautement significative dans les autres traitements.

Au niveau des racines , les résultats montrent aussi une diminution très hautement significative par rapport au témoin (1,44mg/g MF \pm 0,05), sauf le sol SCB+Cd, S(CA*CB)+Cd, S(CA*CB)+Pb attendre a (1.07mg/g MF \pm 0.09), (1.02mg/g MF \pm 0.14), (0.91mg/g MF \pm 0.03)(**Figure 25**).

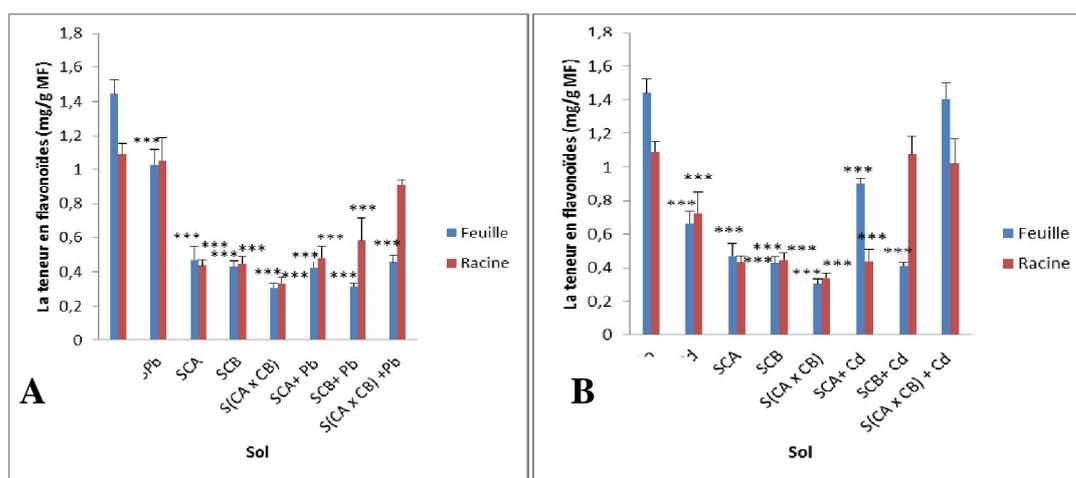


Figure25. Effet de la Co-inoculation avec des (PGPR) sur la teneur en flavonoïdes de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées (A: en présence de cadmium, B : en présence de plomb).

Discussion

Le présent travail est une contribution à l'étude de l'effet des bactéries isolées de la rhizosphère du *Stipa tenacissima* sur la croissance de *Triticum durum* à la présence des métaux lourds (cadmium et plomb). Les différents paramètres relatifs à la croissance et à la physiologie et la biochimie des plantes de ont été ainsi mesurés.

L'exposition des plantes aux métaux lourds peut entraîner de nombreux troubles biochimiques. Ces troubles peuvent être considérées comme une réponse générale associée à la toxicité des métaux lourds (**Kopyra et al, 2006**).

Nos résultats des paramètres morphologiques montrent que les rhizobactéries à un effet positif potentiel sur la croissance, par comparaison à les plantes traités sans les isolats.

De nombreuses études ont montré que l'inoculation des graines par PGPR augmente les paramètres de croissance (hauteur de la plante, longueur des racines, poids frais et secs racinaires et foliaires, la surface foliaires et la biomasse végétale) sous l'effet de la stresse métallique.

L'inoculation des graines de blé par PGPR sous le stress a amélioré la hauteur des plantules, la longueur de la racine, le rendement des graines, le taux de chlorophylle et le rapport K^+ / Na^+ (**Nadeem et al. 2007, 2009 ; Zahir et al. 2009**).

Le rôle de PGPR dans la production de substances favorisant la croissance et la résistance des plantes doit être également pris en considération, ces isolats capables de produire des teneurs en AIA remarquables. Cette auxine stimule principalement la croissance racinaire (Salisbury, 1994) permettant à la plante de puiser les nutriments nécessaires à partir du sol, améliorant par-là les capacités de nutrition et la croissance végétale (**Gutierrez Manero et al. 1996; Abdel-Hameed, 2004**). Les PGPR fixent l'azote moléculaire et possèdent des capacités considérables de solubilisation des phosphates. Ces rhizobactéries améliorent indirectement la croissance des végétaux par leurs effets antagonistes sur la microflore phytopathogène en transformant les métabolites toxiques

L'acide indole acétique (AIA) est l'un des auxines les plus physiologiquement actives, c'est un type de phytohormone connue (Malhotra et Srivastava, 2008). Il fonctionne comme un signal important dans la régulation du développement des plantes (**Ryu et Patten, 2008**)

Résultat et discussion

Les rhizobactéries sont capables de synthétiser une enzyme l'ACC désaminase. **(Shaharouna et al, 2006)** ont rapporté une corrélation positive significative entre l'activité de l'ACC désaminase et l'élongation des racines du maïs en raison de l'inoculation par des bactéries productrices d'EPS. Selon de nombreux auteurs, les PGPR possédant cette enzyme ont un avantage sélectif sur les autres bactéries durant les stress biotiques **(Wang et al. 2000)** et abiotiques **(Glick et al. 1994a; Mayak et al. 2004)**.

Plusieurs études mettent en évidence l'effet bénéfique et très attrayant des quelque rhizobactéries comme inoculant potentiels dans l'agriculture car ils produisent des spores très résistantes qui peuvent survivre pendant de longues périodes dans le sol (Nelson, 2004).

L'application de PGPR sur des graines ou des racines provoque une modification de la composition de la rhizosphère qui conduit à augmenter la croissance et le rendement de différentes cultures **(Li et Alexander 1988; Vessey et Buss, 2002)**.

Au niveau physiologique une exposition au plomb entraîne de nombreuses perturbations dans les parties aériennes, en particulier l'appareil **photosynthétique** **(Seregin et Ivanov, 2001; Sharma et Dubey, 2005)**. Nos résultats aussi montrent une diminution importante de la teneur en chlorophylle des graines exposées en Pb par rapport aux témoins et les plantes traité par PGPR.

De ce fait plusieurs travaux **(Souahi, 2017; Nadjah, 2015 ; Aoumeur, 2012 ; Belarbi, 2018)** montrent que le plomb a une influence sur la réduction de la teneur en chlorophylliens. Le plomb peut agir directement sur le transport des électrons et des enzymes du cycle de Calvin et indirectement induit une diminution de la teneur en chlorophylle **(Chatterjee, 2000)**.

Par l'exposition aux MT, les surfaces foliaires sont réduites et du coup l'accumulation des pigments photosynthétiques est faible **(Patra et al. 2004)**. En générale, la photosynthèse diminue **(Seregin et Ivanov, 2000)** et également le rendement photosynthétique peut chuter de plus de 50% **(Bazzaz et al. 1975)**. Cette diminution est due à l'altération de l'appareil photosynthétique, qui est aussi capables d'altérer la structure et la composition des membranes des thylakoïdes **(Lidons et al. 1993)**. En revanche, le plomb peut entrainer des changements de la composition lipidique membranaire et perturbe en particulier les flux de la chaîne photosynthétique de transport des électrons **(Pourrut, 2008)**, conduisant ainsi à l'inhibition de la synthèse de la

Résultat et discussion

chlorophylle (**Seregin et Ivanov, 2000**). Le contenu en chlorophylles est amélioré à la présence des PGPR, surtout la souche A en cas de présence le Cd et l'association de A+B an cas de présence le Pb, Ces résultats sont rapportés par de nombreux auteurs (**Krieg et Holt, 1984; Nadeem et al. 2006**).

Les résultats obtenus pour la teneur en protéines totales solubles foliaires montrent une corrélation positive avec les PGPR à la présence de cadmium, la teneur en protéine augmenté dans les plantes traité avec le plomb par rapport à le témoin, donc les PGPR n'a pas un effet à la présence du plomb.

L'accumulation des sels de plomb dans les plantes peut augmenter la teneur en protéines totales, ce qui fait partie de la stratégie moléculaire de la tolérance au stress (**Mishra et al. 2006**). Cette accumulation protéique, pourrait être la conséquence d'induction des gènes codant pour la biosynthèse, de protéines de défense contre ce stress métallique, parmi ces protéines, nous trouvons ceux qui sont riches en proline, l'acide aminé le plus important et le plus accumulé en cas de stress, avec notamment des protéines pouvant avoir un rôle de protection tel que les protéines Latte Embryogénèses Abondant (LEA) chez *Triplex halimus*(**Mouffak, 2008**).

Plusieurs auteurs ont signalé que les stress environnementaux peuvent provoquer une diminution des protéines totales (**Rai et al. 1983 ; Kumar et Singh, 1991**).

La réduction des protéines à cause des métaux lourds peut être expliqué par des réactions de protéolyse et libération d'acides aminées (**Berlett et Stadtman, 1997 ; Siedlecka et Krupa, 2002 ; Hsu et Kao, 2003 ; Pena et al. 2006 ; Sharma et Dietz, 2006**). D'autres auteurs comme (**Shraddha Singh et al. 2004**) ont trouvé une accumulation nette des protéines dans les racines et les feuilles de tomate, proportionnelle à la concentration du métal étudié. En revanche et d'une manière générale, (**Stalt et al., 2003**) ont indiqué que l'exposition des plantes à différentes concentrations de cadmium a tendance à stimuler la synthèse des protéines particulièrement, les phytochélatines dont le rôle est la détoxification.

L'interaction de la Co-inoculation en cas de présence de plomb diminue la teneur en protéines de façon très hautement significatif et le raison est inconnue jusqu'à maintenant

Nos résultats montrent que la teneur en sucre soluble diminue quand les plantes traités par métaux lourds, et augmente de façon très hautement significative et irrégulière dans les feuilles et les racines des plantes inoculé par les PGPRs,

Résultat et discussion

Le processus de concentration des sucres solubles dans les tissus foliaires des plantes stressées est une importante caractéristique d'adaptation des plantes au stress métallique, surtout pour les espèces monocotylédones y compris l'orge (**Bohnert et al. 1995 ; Bagheri et Sadeghipour, 2009**). C'est une composante importante de l'ajustement osmotique observée chez l'orge et de nombreuses espèces cultivées.

Les sucres solubles peuvent jouer un rôle dans la protection des chlorophylles et des caroténoïdes contre l'agressivité du stress métallique (**Azouz et al, 2011**). Ceci est prouvé par la corrélation significative entre la teneur en sucre et le taux des différents pigments chlorophylliens.

Concernant les teneurs en phénols totaux, nous avons remarqué une légère augmentation dans les feuilles de *Triticum durum* sous stress métallique de Pb et Cd par rapport au témoin

Nous avons observé que l'inoculation par PGPR et le stress métallique augmente la teneur en phénols dans les racines par rapport au témoin

Ces résultats sont concordants avec ceux de **Sgherri et al. (2007)**, où il a observé une augmentation des poly-phénols sous l'effet du stress métalliques chez *Vicia faba*, (Neggaz et Reguieg yssaad, 2018) chez *Raphanus sativus* stressée par le plomb, (**Rastgoo et al. 2011**) chez *Aeluropus* sous l'effet des métaux lourds (Pb, Co, Cd, Ag). Les composés phénoliques interviennent dans de nombreux mécanismes pour permettre à la plante de s'adapter à son milieu (**Macheix et al, 2005**).

L'accumulation de polyphénols au niveau des plantes exposées directement aux différents stress est expliquée par la stimulation de la production de la polyphénol-oxydase qui est une enzyme clé voie métabolique conduisant à la formation des polyphénols (**Levent-Tuna et al. 2008**).

En effet, des études ont montré que la présence des métaux lourds, et notamment de Cu et Pb, dans le sol avait pour conséquence une augmentation de la production de composés phénoliques (**Kovacik et Klejdus, 2008 ; Pawlak-Sprada et al. 2011**). L'augmentation des composés phénoliques en présence de Pb a déjà été démontrée (**Hamid et al. 2010**).

L'accumulation importante des polyphénols dans la plante stressée aux métaux lourds (plomb et cadmium) est une réponse au stress métallique contrairement à la plante non

Résultat et discussion

stressée ou le taux des polyphénols est faible, car selon (Macheix et al. 2005), l'accumulation des polyphénols pourrait avoir un rôle essentiel dans l'équilibre et l'adaptation de la plante. Les polyphénols sont capables de prévenir la peroxydation des lipides membranaires et de capter les radicaux hydroxyles, superoxyde et peroxydes (Anderson et al. 1996 ; Hu et al. 2005). La suppression de la formation des ERO par inhibition de quelques enzymes ou par chélation des ions métalliques, impliqués dans leur production, la protection des systèmes de défense antioxydants de l'organisme (Boudiaf, 2006).

Cette accumulation est plus importante dans les feuilles que dans les racines de la plante, à ce propos plusieurs auteurs (Abdel et al, 2006 ; Jonnala ,2010 ; Chaib et al.2015), ont montré la richesse des feuilles des céréales en polyphénols lesquels possèdent grand pouvoir antioxydant.

Nous avons observé que l'inoculation par PGPR et le stress métallique augmente la teneur en phénols par rapport au témoin.

Quant à la teneur en flavonoïdes et selon nos résultats, le stress métallique des plantes de blé dur par le Pb et Cd et les PGPR a un effet négatif sur les feuilles et les racines de cette plante, ils ont provoqué une diminution de façon très hautement significatif, Ces résultats sont pas en accord avec ceux obtenu par Bendkhil et Denden (2012), qui ont travaillé sur la teneur en anthocyanines (un groupe des flavonoides) chez le *gombo* : qui montrent que les anthocyanines augmentent sous l'effet du stress abiotique, et par les études de Sgherri et al. (2007), qui ont constaté une forte teneur en flavonoides au niveau des plantules de *Vicia faba* soumises à un stress aux métaux lourds, comparés au témoin. Morris (1995), montrent que les flavonoïdes sont de bons chélateurs de métaux lourds.

L'interaction de l'association des rhizobactéries à la présence de Cd et Pb n'a pas diminué beaucoup le contenu en flavonoïde.

les composés phénoliques et plus particulièrement les flavonoïdes sont reconnus comme des substances potentiellement antioxydantes ayant la capacité de piéger les espèces radicalaires et les formes réactives de l'oxygène (Javanovic et al, 1994).

La plupart des stress liés à l'environnement, produisent dans la plante un choc oxydatif qui va se traduire par la production de radicaux libres et de formes activées de l'oxygène (Parent et al., 2008), telles que le peroxyde d'oxygène (H₂O₂), les radicaux super oxydes (O₂⁻) et hydroxyle (OH), sont produites au cours des processus cellulaires

Résultat et discussion

aérobies et de façon plus accrue suite aux stress abiotiques (**Foyer et Noctor, 2000 ; Hernández et al, 2000 ; Appel et Hirt, 2004 ; Tausz et al., 2004 ; Logan, 2005 ; Brosché et al., 2010**). La production excessive de ces composés provoque des dégâts oxydatifs, et ils deviennent toxiques pour la cellule (**Mahajan et al. 2008**). Ces molécules actives dégradent les lipides membranaires et sont responsables de dégâts irréversibles dans la plante (Parent et al. 2008). Le radical hydroxyle, par exemple, risque d'endommager les structures chlorophylliennes, protéiques, nucléiques et lipidiques, et par conséquent entraver le métabolisme cellulaire, la physiologie de la plante et finalement la croissance et le rendement (**Frankel, 1984 ; Imlay et Linn, 1986**). Par conséquent, la plante doit constamment déployer ses mécanismes de défense pour pallier ces dommages. De ce fait, et afin d'éliminer ces formes actives d'oxygène, les plantes possèdent des antioxydants, tels que les composés phénoliques et les flavonoïdes (**Ashraf, 2008**).

Nos résultats confirment le fait que la croissance de plusieurs organes peut être inégalement affectée. En effet, un consensus existe sur le fait que chez les plantes soumises au stress, les racines sont souvent les organes dont la croissance est la moins affectée, par rapport aux parties aériennes, végétatives et reproductrices (**Saab et al, 1990**). Celles-ci (les racines) poussent plus afin de pénétrer plus profondément dans les sols secs, salins ou compactés (**Munns et Cramer, 1996**).

Nos résultats ont montré que le traitement des graines de blé par l'association des deux souches (A : bactéries isolées des racines de *Stipa tenacissima*, B : bactéries isolées du sol de *Stipa tenacissima*) montrent plutôt un effet positif sur quelques paramètres de croissance par rapport à la mono-inoculation, et le contraire pour quelques paramètres, la mono-inoculation mieux, ce résultat est en accord avec ceux obtenus par plusieurs chercheurs.

Le traitement des graines de blé par l'association des deux souches montrent plutôt un effet négatif sur quelques paramètres par rapport à la mono-inoculation. De nombreux auteurs ont suggéré que les effets de la Co-inoculation sur les plantes dépendent de la particularité des combinaisons utilisées (**Azcon et al. 1993; Barea et al. 1998**).

Les interactions peuvent être très compatibles entraînant des effets positifs (**Vivas et al. 2006**) ou moins compatibles ayant pour conséquence des effets neutres (**Edwards et al. 1998; Russo et al, 2005**), ou incompatibles et donnant un effet néfaste (**Ravnskov et al. 1999**).

Conclusion

Conclusion

Conclusion

Ces dernières années, l'utilisation d'outils biologiques comme les PGPR a fait l'objet d'une attention accrue en tant que moyen pratique d'atténuer les contraintes du sol sur la croissance des plantes. La pertinence de l'utilisation des inoculant individuellement ainsi que dans les consortiums réside dans leur capacité à améliorer le rendement de la biomasse en augmentant la tolérance au stress, le recyclage des nutriments, l'absorption des nutriments et la synthèse des hormones de croissance, des vitamines et des antibiotiques, ainsi que l'amélioration des conditions du sol. Les résultats obtenu montre l'impotence agronomique et écologique de la PGPR sur la croissance des plantes, à partir de l'association avec leur partenaires microbiens, de meilleures connaissances des mécanismes d'interaction plantes-microorganismes permettent de favoriser des populations et déjà présentes dans la rhizosphère et qui sont bénéfiques pour les plante, donc ses isolats, peuvent donc être plus en profondeur étudiées et valorisées.

Références bibliographique

Référence :

A

- ❖ **ANOUA, B., Jaillard, B., RUIZ, J., Bénét, J. C., et Cousin, B. 1997.** Couplage entre transfert de matière et réactions chimiques dans un sol. Partie 2: Application à la modélisation des transferts de matière dans la rhizosphère. *Entropie*, 33(207).
- ❖ **Abnatura RD. (2013).** Les Rhizobactéries PGPR. Bulletin Technique. Avril 2013 Issue<http://www.abnatura.com/ESW/Files/abnatura_bulletin. (Accessed 21.04.18)
- ❖ **Ameur H. (2014).** Effet d'osmoprotecteurs naturels sur la restauration de croissance de stréptomycètes et de plantes d'intérêt agricole sur sol salé ou aride .thèse de doctorat microbiologies université Ferhat abbas Sétif.120p
- ❖ **Abdel-Hameed, A.M., S.H. Sarhan ET H.Z. Abdel-Salam (2004).** Evaluation of some organic acid as foliar application on growth, yield and some nutrient contents of wheat. *J. Agric. Sci. Mansoura Univ.*, 20: 2476-2481.
- ❖ **Azzouz, F. 2011.** Effet de l'interaction plomb-salinité sur les réponses physiologiques et biochimiques d'une halophyte (*Atriplex halimus L.*) et d'une glycophyte (*Vicia faba L.*). Mémoire de magistère. Université Senia Oran Algérie. 65 p.

B

- ❖ **Bakker, P.A.H.M., R. vanPeeret B. Schippers.** 1991. Suppression of soil-borne plant pathogens by fluorescent pseudo-monads: mechanisms and prospects. Pages 217- 230 in A. R. B. Beemster, G. J. Bollen, M. Gerlagh, M. A. Ruissen, B. Schippers ET A. Tempel (réds.), *biotic interactions and soilborne diseases*. Elsevier, New York.
- ❖ **Barea JM, Azcón R, Azcón-Aguilar C. (2005).** Interactions between mycorrhizal fungi and bacteria to improve plant nutrient cycling and soil structure. In: Buscot F, Varma A, editors. *microorganisms in Soils: Roles in Genesis and Functions*. Berlin, Heidelberg: Springer-verlag; p 195–212.
- ❖ **Baker, A.J.M. (2006).** Enhanced phytoextraction of Pb and the other metals from artificially contaminated soils through the combined application of EDTA and EDDS. *Chemosphere*, 63, 1773-1784.
- ❖ **Bernard R.** 2006. *L'eau et la vie. (Éd). Dauphin. Paris : 13- 59 p.*
- ❖ **Barles, S., Breyse, D., Guillerme, A. et Laeyval, C. (1999).** Le Sol Urbain. Collection VILLES, Economica, Paris. 278p
Bardgett, R.D., Bowman, W.D., Kaufmann, R. & Schmidt, S.K. Linking aboveground and belowground communities: a temporal approach. *Trends in Ecology and Evolution*, 20.

❖ **Barea, J. M., G. Andrade, V. V. Bianciotto, D. Dowling, S. Lohrke, P. Bonfante, F. O'Gara et C. Azcon-Aguilar (1998).** Impact on arbuscular mycorrhiza formation of *Pseudomonas* strains used as inoculants for biocontrol of soil-borne fungal plant pathogens. *Appl. Environ. Microbiol.* 64:2304-2307.

❖ **Barles, S., Breysse, D., Guillerme, A., et Laeyval, C (1999).** Le sol urbain. Collection VILLES, Economica, Paris. 278p

❖ **Bazzaz, F.A., Carlson, R.W., ET Rolfe, G.L. 1975.**Inhibition of Corn and Sunflower Photosynthesis by Lead. *Physiologia Plantarum*, Vol. 34 (4): 326-329.

Berlett, B.S., ET Stadtman, E.R. 1997. Protein oxidation in aging, disease and oxidative stress. *Am. Soc. Biochem. Biol. Mol.* 272: 20313-20316.

❖ **Belarbi. 2018.** Etude des paramètres morphologiques et physiologiques de résistance à la sécheresse chez la fève *Vicia faba* L

C

❖ **Corbaz R. (1990).** Principe de phytopathologie et de lutte contre les maladies des plantes. *Presse polytechniques et universitaires romandes.*

❖ **Cattelan, A.J., Hartel P.G., et Fuhrmann J.J. (1999).** Screening for plant growth promoting rhizobacteria to promote early soybean growth. *Soil Sci. Soc. Am. J* 63(6): 1670-1680

D

❖ **De Carne, C.Ch. (2010).** Agriculture biologique, une approche scientifique. Edition : France agricole. Productions végétales et grandes cultures, 434 p. ISBN : 978-2-85557- 211-6

E

❖ **Edwards, SG. JPW. Young ET AH. Fitter (1998).**Interaction between *Pseudomonas fluorescens* biocontrol agents and *Glomus mossae*, an arbuscular mycorrhizal fungus, within the rhizosphere. *FEMS Microbiol. Lett.* 166:297–303.

F

❖ **FAO. (2020).** *Perspectives alimentaires. Analyse des marchés mondiales.*

G

❖ **Giri B, Giang PH, Kumari R, Prasad R. (2005).**Microbial diversity in soils. In: Buscot F, varma A, editors. *Microorganisms in Soils: Roles in Genesis and Functions.* Heidelberg,germany: Springer-Verlag;.p 195–212.

❖ **Gobat, J.M., Aragno, M., Matthey, W. (1998).**Le sol vivant – Base de pédologie Biologie des sols. Presses polytechniques et universitaires romandes. Collection gérer l'environnement, p 14.

❖ **Govind, P, S, Singh, A, N, Kumar, (2015).** Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): current and future prospects for development of sustainable agriculture. *J Microb Biochem.technol*, p. 096-102

- ❖ **Gadd, J.M. (2000).** Phytoremediation of toxic metals: using plants to clean up the environment. Raskin.I and Ensley.B.D. John Wiley & Sons, Inc, New York, 304.
- ❖ **Glick , B.R., C.B. Jacobson, M.M.K. Schwarze et J.J. Pasternak (1994a)** .1-Aminocyclopropane-1- carboxylic acid de aminase mutants of the plant growth promoting rhizobacterium *Pseudomonas putida* GR12-2 do not stimulate canola root elongation. *Can. J. Microbiol.* 40:911–915.
- ❖ **Glick, B.R., C.B. Jacobson, M.M.K. Schwarze ET J.J. Pasternak (1994b).** Does the enzyme 1-aminocyclopropane- lcarboaylate deaminase play a role in plant growth promotion by *Pseudomonas putida* GR12–2 In: Ryder MH, Stephens PM, Bowen GD (eds) Improving plant productivity with rhizosphere bacteria. CSIRO, Adelaide, pp 150–152.
- ❖ **Glick, B.R., C.L. Patten., G. Holguin, et D.M. Penrose (1995).** Biochemical and genetic mechanisms used by plant growth promoting bacteria. Imperial College Press, London.
- ❖ **Glick., B.R., D.M. Penrose et L. Jiping (1998).**A model for the lowering plant ethylene concentrations by plant growth promoting bacteria. *J. Theor. Biol.* 190:63–68.
- ❖ **Glick, B.R., Z. Cheng, J. Czarny, et J. Duan (2007).**Promotion of plant growth by ACC-deaminase producing soil bacteria.*Eur. J. Plant Pathol.* 119:329–339.
- ❖ **Gutiérrez Mañero, F.J., N. Acero , J.A. Lucas et A. Probanza (1996).**The influence of native rhizobacteria on European alder [*Alnus glutinosa* (L.)Gaertn.]growth. II. Characterization of growth promoting and growth inhibiting strains. *Plant Soil*, 182: 67–74.

H

- ❖ **Schroth MN, Hildenbrand DC ,1964** . Influence of plant exudates on rootinfectingfungi
- ❖ **Hopkins WG. (2003).** physiologie végétale. Traduction de la 2 edition américaine par SERGE R .Ed de Boeck.pp. 309-362.
- ❖ **Haas, D; Défago, G. (2005).**Biological control of soil-borne pathogens by fluorescentpseudomonads.*Natra. Rev. Microb.* 1129.
- ❖ **Harman G. E. and Shores M. (2007).**The Mechanisms and Applications of Symbiotic Opportunistic Plant Symbionts.P.131-155.*In* Vurro M. and Gressel J. (eds.), Novel Biotechnologies for Biocontrol Agent Enhancement and Managemen
- ❖ **Hirsch, A.M., Bauer, W.D., Bird, D.M., Cullimore, J., Tyler, B. and Yoder, J.I. (2003).**molecular signals and receptors: controlling rhizosphere interactions between plants and other organisms. *Ecol.* **84**: 858-868
- ❖ **Hernández, J.A., E. Olmos, F.J. Corpas, F. Sevilla et L.A. del Río (1995).**Salt-induced oxidative stress in chloroplast of pea plants. *Plant Sci.*, 105: 151–167.
- ❖ **Hsu, Y.T et Kao, C.H. 2003.**Changes in protein and amino acid contents in two cultivars of rice seedlings with different apparent tolerance to cadmium. *Plant Growth Regul.*40: 147-155.

I

- ❖ **Ivanova, E.G., N.V. Doronina et Y.A. Trotsenko (2001).** Aerobic methylobacteria are capable of synthesizing auxins. *Microbiol.*, 70: 392–397

K

- ❖ **Kloepper J.W. et M.N. Schrot (1978)** Plant growth promoting rhizobacteria and plant. **Kloepper, J.W. et Beauchamp, C.J. (1992).** A review of issues related to measuring colonization of plant roots by bacteria. *Can. J. Microbiol* 38(12):1219-1232.
- ❖ **Kobayashi DY, Crouch JA.(2009).** Bacterial/fungal interactions: from pathogens to mutualistic endosymbionts. *Annu Rev Phytopathol*;47:63–82.
- ❖ **Kaioua, A et Grairi, I.(2015).** Solubilisation du phosphate, production de sidérophores et activité antifongique de souches d'actinomycètes et du genre *Pseudomonas* isolées des sol rhizosphériques. Identification de souches représentatives. *Microbiologie Générale et biologie moléculaire des Micro-organismes, UFM Constantine I.* 52p.
- ❖ **Kim J, D.C. (1994).** Rees Nitrogenase and biological nitrogen fixation *Biochemistry,*
- ❖ **khan, M S., Zaidi, A., Wani, P. A.(2009).** role phosphate solubilizing microorganisms in sustainable agriculture- a review. *in: agronomy for sustainable development*, 27(1), 29-43
- ❖ **Khan, M.S., Zaidi, A., Ahemad, M., Oves, M., Wani, P.A.(2010).** plant growth promotion by phosphate solubilizing fungi-current perspective .*Archives of Agronomy and soil science*, 56(1), 73-98.
- ❖ **Kuffner M, Puschenreiter M, Wieshammer G, Gorfer M, Sessitsch A .(2008).** Rhizosphere bacteria affect growth and metal uptake of heavy metal accumulating willows. *Plant Soil* 304: 35- 44.
- ❖ **Kumar P, Dubey RC .(2012).** Plant Growth Promoting Rhizobacteria for Biocontrol of phytopathogens and Yield Enhancement of *Phaseolus vulgaris*. *J Curr Pers Appl Microbiol* 1: 6;38.
- ❖ **Kirdi, B., Zermane, N., 2010.** Rôle des PGPR dans la stimulation de la croissance végétale et la lutte contre les phanérogame parasites : *Orobanche crenata* Forsk. et *Cuscuta campestris* Yuncker / —Role of PGPR in plant growth promotion and control of the parasitic weeds: *Orobanche crenata* Forsk. and *Cuscuta campestris* Yuncker
- ❖ **Kumar, P.K., et Singh, R.A. 1991.** Germination and metabolism in susceptible and tolerant bean genotypes under moisture stress. *Indian J. Plant Physiol.* 34: 267.

L

- ❖ **Clemenceau, 1992.** Effets écologiques de rhizobactéries sur les plantes : exemple des *Pseudomonas* spp fluorescents. *Agronomie, EDP Sciences.*
- ❖ **Lepinay C.,** Etude des interactions plantes-microbes et microbes-microbes au sein de la rhizosphère, sous un aspect coûts-bénéfices, dans un contexte de variation environnementale, Université de Bourgogne, 2013, 263p

- ❖ **Loué, A. (1993).** Oligo-éléments en agriculture. Ed. Nathan (ed), 45-177
- ❖ **Li, DM. et M. Alexander (1988).** Co-inoculation with antibiotic producing bacteria to increase colonization and nodulation by rhizobia. *Plant Soil* 108:211–219.

M

- ❖ **Malek F ,2015.** interaction microbienne cours assure aux Master II microbiologie et Magistère Maitrise de la qualaté et du développement microbien. Université de Tlemcen.
 - ❖ **Munees ,A, Mulugeta ,K. (2014) .** Mechanisms and applications of plant growth promoting rhizobacteria: Current perspective, *Journal of King Saud University – Science*, January volume 26, Issue 1, Page 1–20.
 - ❖ **Martínez-Viveros 1, O., M.A. Jorquera, D.E. Crowley, G. Gajardo and M.L. Mora.(2010).** Mechanisms and practical considerations Involved in plant growth promotion byrhizobacteria. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 10: 293 – 319
- Mayak, S., T. Tirosh et B.R. Glick (2004).** Plant growth-promoting bacteria confer resistance in tomato plants to salt stress. *Plant Physiol. Biochem.*, 42: 565-572.
- ❖ **Mouffak, AA. 2008.** Etude de la variabilité de la proline sous stress salin chez *Vigna radiata* L. Mémoire de magister. Univ Es-Senia. Oran.
 - ❖ **Mishra, S., Srivastava, S., Tripathi, RD., Govindarajan, R., Kuriakose, SV., et Prasad, MNV. 2006.** "Phytochelatin synthesis and response of antioxidants during cadmium stress in *Bacopa monnieri* L[lozenge]. *Plant Physiology and Biochemistry.* P. 44: 25-37.
 - ❖ **Munns, R. (2002).** Comparative physiology of salt and water stress. *Plant Cell. Environ.*, 25: 239-250.
 - ❖ **Munns, R (2005).** Genes and salt tolerance: bringing them together. *New Phytologist.*, 167: 645–663.
 - ❖ **Munns, R. et A. Termaat (1986).** Whole-plant responses to salinity. *Aust. J. Plant Physiol.* 13:143–160.
 - ❖ **Neilands, J.B.(1995).** Siderophores structure and function of microbial iron transport compounds. *J. Biol. Chem.* 270, 26723–26726.
 - ❖ **Nadeem, S.M., Z.A. Zahir, M. Naveed, M. Arshad et S.M. Shahzad (2006).** Variation in growth and ion uptake of maize due to inoculation with plant growth promoting rhizobacteria under salt stress. *Soil Environ.*, 25(2): 78-84.
 - ❖ **Nadjeh, I. 2015 .** Changements physiologiques chez des plantes (Blé dur *Triticum durum* Desf.) exposées à une pollution par un métal lourd (plomb). Thèse de doctorat 3emcycle. Biologie Végétale et Environnement, Université Badji Mokhtar – Annaba. P.1.
 - ❖ **Nelson, L.M. (2004).** Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR): Prospects for new inoculants. *Online Crop Management*, 10.1094/CM-2004-0301-05-RV.
 - ❖ **Neilands, J.B.(1995).** Siderophores structure and function of microbial iron transport compounds. *J. Biol. Chem.* 270, 26723–26726.

P

- ❖ **Plassard C., Robin A., Le Cadre E., Marsden C., Trap J.4, Herrmann L., WaithaisongK., Lesueur D., Blanchart E., Chapuis-Lardy L., Hinsinger P.(2015).**Améliorer la biodisponibilité du phosphore : comment valoriser les compétences des plantes et les mécanismes biologiques du sol. Innovations Agronomiques INRA , 43 ,115-138P
- ❖ **Philips.D.A and S.M. Tsai.(1992).**flavonoids as plant signals to rhizosphere microbes.Mycorrhiza1: 55-58P
- Patten CL, Glick BR (2002)** Role of *Pseudomonas putida* indoleacetic acid in development of the host plant root system. Appl Environ Microbiol 68:3795–3801..
- ❖ **Parmar P, Sindhu SS .(2013).** Potassium Solubilization by Rhizosphere Bacteria: Influence of Nutritional and Environmental Conditions. J Microbiol Res 3: 25-31.
- Piano, S; Neyrotti, V; Migheli, Q; Gullino, M.L. (1997).**Biocontrol capability of *Metschnikowia pulcherrima* against *Botrytis* postharvest rot of apple.Postharvest Biol.Technol. 11(3) :131-140
- ❖ **Patra, M., Bhowmick, N., Bandopadhyay, B., Sharma, A. 2004.** Comparison of mercury, lead and arsenic with respect to genotoxic effects on plant systems and the development of genetic tolerance. Environmental and Experimental Botany. P. 52: 199-223.
- ❖ **Pourrut, B. 2008.** Implication du stress oxydatif dans la toxicité du plomb sur une plante modèle *Vicia faba*. Thèse de Doctotrat, Univ de Toulouse. 177P
- ❖ **Prabha, K. Padmavathiamma and Loretta, Y. Li. (2007).** Phytoremediation Technology: Hyper-accumulation Metals in Plants. Water Air Soil Pollut. 184, 105–126.

R

- ❖ **Rogers J.R., Bennett, P.C. and Choi, W. (1998).**Feldspars as a source of nutrients for microorganisms. American Mineralogy, 83, 1532-1540.
- ❖ **Reyes, M.E.Q; Rohrbach, K.G; Paull, R.E. (2004).**Microbial antagonists control postharvest black rot of pineapple fruit. Postharvest Biol. Technol. 33(2):193-203
- ❖ **Rai, V.K., Singh, G., Thakur, P.S., et Banyal, S. 1983.** Protein and amino-acid relationship during water stress in relation to drought resistance. Plant Physiol. Biochem., (Suppl.). 10:161.
- ❖ **Ravnskov, S., J. Larsen, PA. Olsson et I. Jakobsen (1999).**Effects of various organic compounds on growth and phosphorus uptake of an arbuscular mycorrhizal fungus.New Phytol. 141:517–524.
- ❖ **Russo, A., C. Felici, A. Toffanin, M. Goetz, C. Collados, J. Barea et al. (2005),** Effect of *Azospirillum* inoculants on arbuscular mycorrhiza establishment in wheat and maize plants, Biol. Fert. Soils, 41: 301–309.
- ❖ **Ryu, R. et C.L. Patten. 2008.** Aromatic amino acid-dependent expression of indole-3-pyruvate decarboxylase is regulated by 4 TyrR in *Enterobacter cloacae* UW5. Am. Soc. Microbiol., 19: 1-35.

S

- ❖ **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.
- ❖ **Schroth MN, Hildenbrand DC ,1964 .** Influence of plant exudates on root-infecting fungi.
- ❖ **Salma Taktek. (2015).** Dissolution biologique des phosphates : Interaction bactéries mycorhizes. Thèse de doctorat. université LAVAL Québec Canada.
- ❖ **Salamone J.D, Correa M, Mingote S.M, Weber S.M. Beyond the reward hypothesis: alternative functions of nucleus accumbens dopamine. Current Opinion in Pharmacology. 2005;5:34–41.**
- ❖ **Syed Shameer, T. N. V. K. V Prasad. (2017).** Plant growth promoting rhizobacteria for sustainable agricultural practices with special reference to biotic and abiotic stresses
- ❖ **Singh, O.V., Labana, S., Pandey, G., Budhiraja, R., and Jain, R.K. (2003).** Phytoremediation: an overview of metallic ion decontamination from soil. Appl. Microbiol. Biotechnol. 61, 405-412
- ❖ **Sandhu, G.S., Kline, B.C., Stockman, L., Roberts, G.D. (1995).** Molecular probes for the diagnosis of fungal infections. J Clin Microbiol 33, 2913-2919
- ❖ **Seregin, IV et Ivanov, VB. 2001.** Physiological Aspects of Cadmium and Lead Toxic Effects on Higher Plants. Russian Journal of Plant Physiology. 48 : 523-544.
- ❖ **Shaharoon, B., M. Arshad et Z.A. Zahir (2006).** Effect of plant growth promoting rhizobacteria containing ACC-deaminase on maize (*Zea mays* L.) growth under axenic conditions and on nodulation in mung bean (*Vigna radiata* L.). Lett. in Appl. Microbiol. 42: 155-159.
- ❖ **Sharma, P et Dubey, RS. 2005.** Lead toxicity in plants. Brazilian Journal of Plant Physiology. 17: 35-52.
- ❖ **Sharma, S et Dietz, K. 2006.** The significance of amino acids and amino-derived molecules in plant responses and adaptation to heavy metal stress. J. Exp. Bot. 57: 711-726.
- ❖ **Shraddha, S., Sarita, S., Rohit, S., Kavita, P., Kavita, B., 2004.** Translocation of metals and its effects in the tomato plants grown on various amendments of tannery waste: evidence for involvement of antioxidants. Chemosphere. 57: 91-99.
- ❖ **Siedlecka, A., et Krupa, Z. 2002.** Functions of enzymes in heavy metal treated plants. In: Physiology and Biochemistry of Metal Toxicity and Tolerance in Plants. Prasad M.N.V. et Strzalka K. (Eds), Kluwer Academic Publishers, Netherlands. pp. 303-324.
- ❖ **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.

- ❖ **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.
- ❖ **Souahi H, Chebout A, Akrouit K, Massaoud N, Gacem R (2021).**Physiological responses to lead exposure in wheat, barley and oat. Environmental challenge 4: 100079.
- ❖ **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.
- ❖ **Stalt, J.P., Sneller, E.C., Bryngelson, T., Bryngelsson, T., Lundborg, T., Schat, H. 2003.**Phytochelatin and cadmium accumulation in wheat.Environmental and Experimental Botany.49: 21- 28.
- ❖ **Salisbury, F.B. (1994).**The role of plant hormones. Marcel Dekker, (ed.). New York, USA

T

- ❖ **Trevors, J. T. & VanElsas, J. D. (1997).** Microbial Interactions in soil. In: VanElsas J.D., Trevors J.T. & Wellington E.M.H. (eds) Modern soil microbiology. Marcel Dekker New York. 215-243.
- ❖ **Torsvik, V., and Øvraås, L. (2002).** Microbial diversity and function in soil: from genes to ecosystems. Curr. Opin. Microbiol. 5, 240-245

V

- ❖ **Valencia, L. G. H. (2008).** Etudes des bases moléculaires de l'agrégation des sols par des exo polysaccharides bactériens, Université Joseph Fourier Grenoble 1, 196:22-23.
- ❖ **Van Loon, L.C. (2007).** Plant responses to plant growth-promoting rhizobacteria. Eur. J. Plant Pathol. 119: 243-254..
- ❖ **Vessey, J.K. et T.J. Buss (2002).** Bacillus cereus UW85 inoculation effects on growth, nodulation, and N accumulation in grain legumes. Controlled-environment studies. Can. J. Plant Sci. 2: 282–290.
- ❖ **Vivas, A., B. Biro, E. Campos, J. M. Barea et R. Azcón (2003).** Symbiotic efficiency of autochthonous arbuscular mycorrhizal fungus (*G. mossae*) and *Brevibacillus* sp. Isolated from cadmium polluted soil under increasing cadmium levels. Environ. Pollut., 126: 179-189.
- ❖ **Vivas, A., A. Marulanda, J.M. Ruiz-Lozano, J.M. Barea et R. Azcon (2003).**Influence of a *Bacillus* sp. on physiological activities of two arbuscular mycorrhizal fungi and on plant response to PEG-induced drought stress. Mycorrhiza 13: 249-256.
- ❖ **Venturi and Christoph Keel.(2016).** Signaling in the Rhizosphere. Special Issue: Unravelling the Secrets of the Rhizosphere.187-189P.

W

- ❖ **Wardle, D.A., and Giller.K.E. (1996).** the quest for a contemporary ecological dimension to soil biology. *Soil Biol. Biochem.* 28, 1549–1554
- ❖ **Wen, B., Hu, X., Liu, Y., Wang, W., Feng, M.U., Shan, X. (2004).**The role of earthworms (*Eisenia fetida*) in influencing bioavailability of heavy metals in soils. *Biol. Fert. Soils* 40, 181–187

Z

- ❖ **Zahir, A.Z., U. Ghani, M. Naveed, S.M. Nadeem et H.N. Asghar (2009).**Comparative effectiveness of *Pseudomonas* and *Serratia* sp. containing ACC-deaminase for improving growth and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) under salt-stressed conditions.*Arch. Microbiol.*, 191:415-42