



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



Université Larbi Tébessi –Tébessa-  
Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la vie

**Département** : Etres vivants

## MÉMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de MASTER

Filière: Biotechnologie

Option : Biotechnologie Végétal

Effet de la rhizoremédiation sur les propriétés morpho-physiologiques  
de *Triticum durum* cultivés dans un sol contaminé

ALLOUCHE Asma

ALLOUCHE Aya

Devant le jury

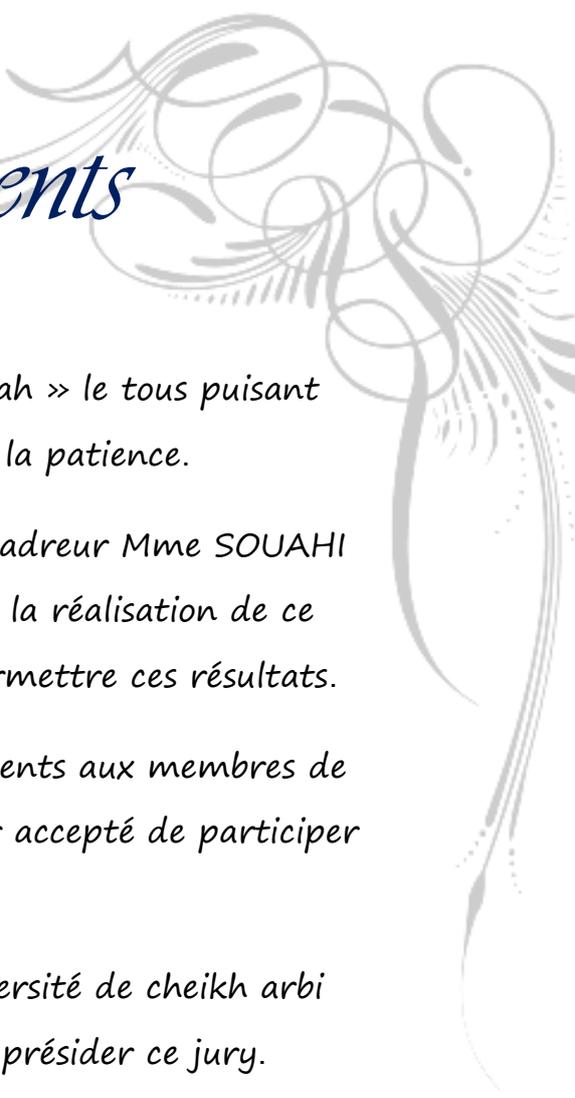
Dr.. BOUDJABI Sonia	M.C.A.	Université de Tébessa	Président
Dr. DEKAK Ahmed	M.C.A .	Université de Tébessa	Examinatrice
Dr . SOUABI Hana .	M.C.A	Université de Tébessa	Rapporteur

*Date de soutenance* 12/06/2022

*Année Universitaire*

2021–2022

# Remerciements



*Avant tout, nous tenons à remercier « Allah » le tous puissant dieu, pour nous avoir donné la force et la patience.*

*Notre profond remerciement à nos cher encadreur Mme SOUABI HANA de nous avoir suivre régulièrement pour la réalisation de ce travail et de tout ce qu'ils ont fait pour nous permettre ces résultats.*

*Nous expirons également nos vifs remerciements aux membres de jury d'avoir porté intérêt à notre étude et d'avoir accepté de participer à cette soutenance.*

*Monsieur DEKAK AHMED (Docteur – université de cheikh arbi tebessi Tébessa) qui nous a fait l'honneur de présider ce jury.*

*Madame BOUDJABI SONIA (Docteur –université de cheikh arbi tebessi Tébessa) qui a bien voulu examiner ce travail.*

*Nous souhaiterons également remercier nos professeurs de la faculté des sciences des êtres vivant pendant les cinq années précédentes.*

*Nos remerciements vont également à la Mademoiselle khaoula Akrouf (doctorante au sein du laboratoire de biologie végétale) pour nous avoir aidée dans la réalisation de ce travail.*

*Un remerciement à toutes et à tous qui, de loin ou de près, ont*

**MERCI...**



# *Dédicace*



*En première lieu je remercie Allah le tout puissant de m'avoir  
donné la volonté, la santé et le courage pour réaliser ce travail.*

*Je dédie cet humble mémoire avec grand amour, sincérité et*

*Fierté*

*A mes parents, source de tendresse et bonheur.*

*A mes chers frères BILLAL, IMAD, SALAH.*

*A mes chères sœurs d'amour FATEN, NOUR, HIBA, ET KHADIJA*

*A tous ma famille, proche ou éloignée*

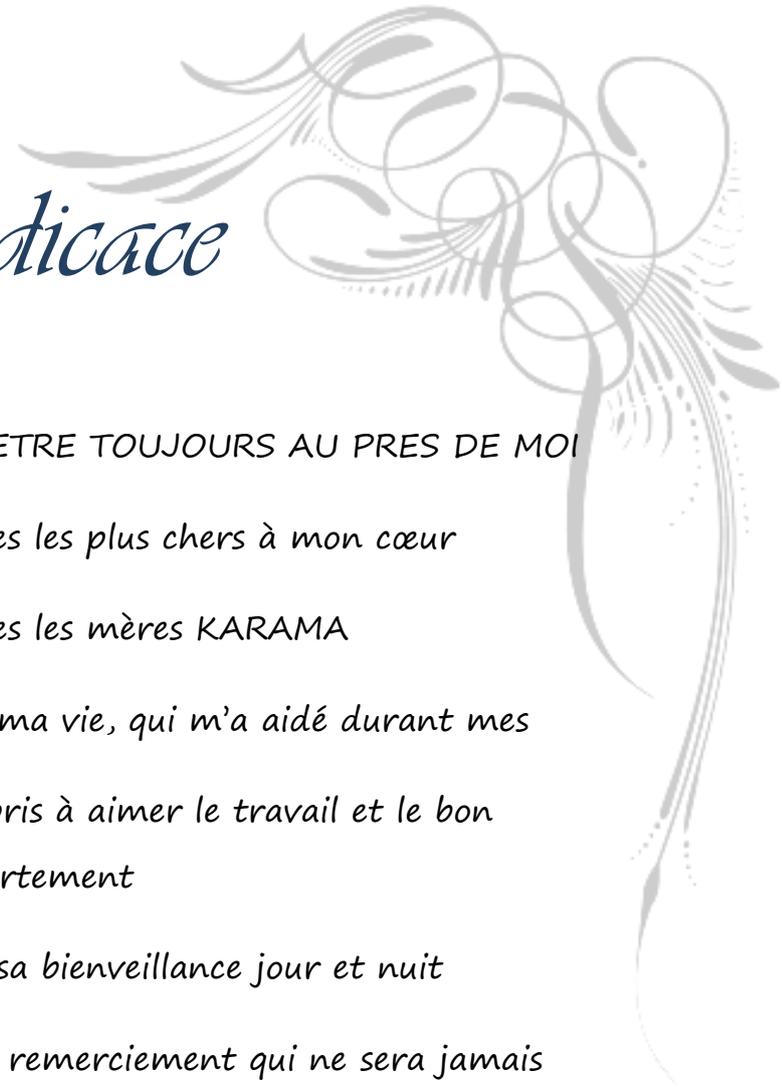
*Enfin je dédie à tous mes amis que je n'ai pas cités et à tous ceux  
qui me connaissent*

*A tous ce que j'aime*

AYA



# *Dédicace*



DIEU TOUT PUISSANT MERCI D'ETRE TOUJOURS AU PRES DE MOI

*Je dédie ce projet aux êtres les plus chers à mon cœur*

*La meilleur de toutes les mères KARAMA*

*Qui m'a soutenu durant toute ma vie, qui m'a aidé durant mes  
années d'études, qui m'a appris à aimer le travail et le bon  
comportement*

*pour son amour infini et sa bienveillance jour et nuit*

*Je souhaite prouver mon grand remerciement qui ne sera jamais  
suffisant à elle que j'espère la rendre fière par ce travail*

*Mon très cher père KHOUDIR*

*Pour être le bon exemple de père par son soutien, ses encouragements*

*Et aides dès mes premiers pas d'études jusqu'à ce jour*

*Mes frères SALAH BILAL IMAD*

*Mes chères sœurs KHADIJA, NOUR, AYA, OUMAIMA*

*Tous mes chers amis RAHMA, SARA, HIBA. OUMAIMA*

*A tous ce que j'aime*

*ASMA*



## Résumé

La pollution du sol par les métaux lourds est l'une des problèmes majeurs qui touche l'environnement, elle menace l'écosystème et la diversité biologique. Les micro-organismes notamment les bactéries ont élaboré plusieurs mécanismes de résistance aux métaux lourds exploités dans la bioremediation. Dans ce contexte, nous avons étudié l'effet de trois inocula bactériens sur les paramètres morphologiques et biochimiques du blé dur (*Triticum durum*). L'association plante-bactéries a été cultivée sous une serre contrôlée pendant une période de 30 jours, sous l'influence de solution métallique à base de plomb (800ppm) et de cadmium (12 ppm) puis arrosée avec l'eau distillé stérile.

Ce travail nous a permis de constater une augmentation dans le taux de germination, le nombre de feuille, le nombre de racine, le poids frais, la surface foliaire, la teneur en protéine totale, la teneur en sucre soluble, la teneur en phénols totaux et aussi en malondialdéhyde.

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

**Mots clés: Pollution du sol, blé dur, inoculum, bioremediation, Cadmium, Plomb**

## **Abstract**

Soil pollution by heavy metals is one of the major problems affecting the environment, it threatens the ecosystem and biological diversity. Microorganisms, especially bacteria, have developed several mechanisms of resistance to heavy metals, which are used in bioremediation. In this context, we studied the effect of three bacterial inocula on morphological and biochemical parameters of durum wheat (*Triticum durum*). The plant-bacteria association was cultivated in a controlled greenhouse for a period of 30 days, under the influence of metallic solution based on lead (800ppm) and cadmium (12 ppm) and then watered with sterile distilled water.

This work allowed us to observe an increase in the germination rate, the number of leaves, the number of roots, the fresh weight, the leaf surface, the total protein content, the soluble sugar content, the total phenol content and also the malondialdehyde content.

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.

**Key words: Soil pollution, durum wheat, inoculum, bioremediation, Cadmium, Lead**

## ملخص

يعد تلوث التربة بالمعادن الثقيلة إحدى المشكلات الرئيسية التي تلوث البيئة، و يرجع ذلك أساسا إلى الأنشطة الصناعية و الزراعية، هذا التلوث الكيميائي يهدد النظام البيئي و التنوع البيولوجي؛ لذا طورت الكائنات الحية الدقيقة و لاسيما البكتيريا عدة آليات لمقاومته حيث استغلت هذه الاخيرة في المعالجة الحيوية ، إذ تعتبر هذه التقنيات أسلوبا مستداما للحفاظ على التوازن البيئي و صحة الكائنات الحية.

في هذا السياق قمنا بدراسة تأثير نوعين من المجموعات البكتيري على نبات القمح الصلب من خلال الظواهر المرفولوجية و بيوكيميائية، تم زراعة النبات و معالجته بمجموعات البكتيرية السابقة في وجود العنصرين (Cd=12ppm) و (Pb=800ppm) و ذلك لمدة 30 يوما مع السقي بالماء المقطر المعقم.

حيث أظهرت النتائج زيادة في كل من معدل الانبات، عدد الأوراق و مساحة سطحها ، عدد الجذور، الوزن، البروتين الكلي، السكريات، البوليفينول بالإضافة إلى المالونديالدهيد. وفي الاخير يمكننا القول يمكننا القول ان المعالجة البيولوجية لها دور في إنقاص من الإجهاد المعدني على النبات و التقليل من نسبة التلوث بالمعادن الثقيلة في التربة.

**كلمات مفتاحية : تلوث التربة، القمح الصلب ، Pb, Cd, المعالجة الحيوية ، التلقيح البكتيري**

	page
<b>Remerciement</b>	
<b>Dédicace</b>	
<b>Résumé</b>	
<b>Abstract</b>	
<b>ملخص</b>	
<b>Liste des tableaux</b>	
<b>Listes des figures</b>	
<b>Liste des abréviations</b>	
<b>INTRODUCTION</b>	<b>1</b>
<b>Partie théorique</b>	
<b>Chapitre I : Le blé dur</b>	<b>4</b>
<b>1. Classification du blé dur</b>	
<b>2. Origine et historique</b>	<b>4</b>
<b>3. Cycle biologique</b>	<b>5</b>
<b>3.1. Période végétative</b>	<b>6</b>
<b>3.1.1. Germination-levée-tallage</b>	<b>6</b>
<b>3.1.2. Période reproductrice</b>	<b>6</b>
<b>3.1.3. L'épiaison-floraison</b>	<b>7</b>
<b>3.1.4. Remplissage et maturation du grain</b>	<b>7</b>
<b>4. Production du blé dans le monde et en Algérie</b>	<b>9</b>
<b>4.1. Dans le monde</b>	<b>9</b>
<b>4.2. En Algérie</b>	<b>10</b>
<b>5. Caractéristiques morphologiques</b>	<b>11</b>
<b>5.1. Les racines</b>	<b>11</b>
<b>5.2. Les Feuilles</b>	<b>11</b>
<b>5.3. La tige</b>	<b>12</b>
<b>5.4. L'appareil reproducteur</b>	<b>12</b>
<b>6. Les exigences du blé</b>	<b>13</b>
<b>6.1. Exigences édaphique</b>	<b>13</b>
<b>6.2. Exigences climatiques</b>	<b>13</b>

## Tables des matières

---

6.2.1. La température	13
6.2.2. L'eau	14
6.2.3. La Lumière	14
6.2.4. la fertilisation	14
7. Composition chimique du blé dur	14
7.1. Les éléments principaux	14
7.1.1. Les glucides	14
7.1.2. Les protéines	15
7.1.3. Les lipides	15
7.2 Les éléments secondaires	15
7.2.1. Les pigments et les vitamines	15
7.2.2. Les enzymes	16
7.2.3. Les minéraux	16
7.2.4. L'eau	16
8. Adaptation de blé dur	17
Chapitre II : La pollution du sol par les métaux lourds	18
1. L'importance du sol	18
1.1. Sol et microorganismes	19
1.2. Bactérie du sol	19
1.2.1. Les Rhizobactéries Promotrices de la Croissance des Plantes	19
1.2.2. Mécanismes d'action des PGPR	20
2. La pollution du sol	21
3. Métaux lourds	22
3.1. Les sources des ETM	22
3.1.1. Les sources naturelles	22
3.1.2. Les sources anthropiques	23
3.2. Le Plomb	24
3.2.1. La pollution par le plomb	24
3.2. 2. Les sources du plomb	24
3.2. 3. Le plomb dans le sol	25
3.2. 4. L'effet du plomb sur la plante	25

## Tables des matières

---

3.3. Le cadmium	26
3.3.1. Définition	26
3.3.2. Les sources du cadmium	26
3.3.3. Formes du cadmium dans le sol	26
3.3.4. L'effet du cadmium sur la plante	27
3.4. Spéciation, mobilité et biodisponibilité des ETM dans le sol	27
Chapitre III. La bioremédiation	30
1. Définition de la bioremédiation	30
2. Les techniques de la bioremédiation	31
2.1. Bioremédiation <i>in situ</i>	31
2.1.1. Bioremédiation intrinsèque	32
2.1.2. Bioventing	32
2.1.3. Biosparging	32
2.1.4. Bio augmentation	32
2.1.5. Bio stimulation	33
2.2. Bioremédiation ex situ	34
2.2.1. Bioréacteurs à boues	34
2.2.2. Biopiles de sol	34
2.2.3. Compostage	35
2.2.4. Landfarming	35
<b>Partie 02 : Partie expérimentale</b>	
<b>Matériel et méthodes</b>	
1. L'isolement des bactéries de la rhizosphère de <i>Peganum harmala</i>	36
1.1. Description de la plante	36
1.2. Position systématique	37
1.3. Présentation de la zone de prélèvement	37
1.4. Prélèvement des échantillons du sol et des racines	38
2. Préparation des milieux et mise en culture	38
2.1. Analyse microbiologique	38
2.1.1. La purification des bactéries	38
2.1.2. Isolement des souches pures	39
2.1.3. Aspect macroscopique	40

## Tables des matières

---

2.1.4. Stockage et préservation	40
2.1.5. Évaluation de l'efficacité des microorganismes isolés comme de potentiels PGPR	40
2.1.5.1. Préparation des souches	04
2.1.5.2. Détermination des caractères biochimiques	40
2.1.5.3. Test de toxicité	41
3. Matériel végétal	43
4. La stérilisation	44
5. Traitement du sol	45
6. Méthode et mesure effectuée	47
6.1. Les paramètres morphologiques	47
6.1.1. Taux de germination	47
6.1.2. Poids frais des parties aérienne et racinaire de la plante	48
6.1.3. Poids sec des parties aérienne et racinaire de la plante	48
6.1.4. Elongation des parties aérienne et racinaire de la plante	48
6.1.5. Nombre des feuilles et des racines	48
6.1.6. La surface foliaire	48
6.2. Les paramètres biochimiques	49
6.2.1. Teneur en chlorophylle	49
6.2.2. Analyse des lipoperoxydes membranaires	49
6.2.3. Dosage des sucres solubles totaux	50
6.2.4. Dosage de protéines totales	50
6.2.5. Teneur relative en eau (RWC)	50
6.2.6. Les Composés phénoliques	51
6.2.6.1. Dosage des flavonoïdes	51
6.2.6.2. Dosage des polyphénols	51
6.3. Analyses physico-chimiques des sols	52

### Chapitre 02: Résultats et discussion

## Tables des matières

---

<b>1. Résultat</b>	<b>54</b>
<b>1.1. Effet de la co inoculation par la PGPR sur le taux de germination chez <i>Triticum durum</i></b>	<b>54</b>
<b>1.2 Effet de la co inoculation par la PGPR sur le nombre de feuilles chez <i>Triticum durum</i></b>	<b>55</b>
<b>1.3 Effet de la co inoculation par la PGPR sur le nombre des racines chez <i>Triticum durum</i></b>	<b>57</b>
<b>1.4 Effet de la co inoculation par la PGPR sur la longueur de la partie racinaire chez <i>Triticum durum</i></b>	<b>59</b>
<b>1.5 Effet de la co inoculation par la PGPR sur la longueur de la partie aérienne chez <i>Triticum durum</i></b>	<b>60</b>
<b>1.6 Effet de la co inoculation par la PGPR sur le poids frais la chez <i>Triticum durum</i></b>	<b>62</b>
<b>1.7 Effet de la co inoculation par la PGPR sur le poids sec la chez <i>Triticum durum</i></b>	<b>63</b>
<b>1.8 Effet de la co inoculation par la PGPR sur la surface foliaire chez <i>Triticum durum</i></b>	<b>65</b>
<b>1.9 Effet de la co inoculation par la PGPR sur la teneur relative en eau (TRE) chez <i>Triticum durum</i></b>	<b>66</b>
<b>1.10 Effet de la co inoculation par la PGPR sur la teneur en chlorophylle chez <i>Triticum durum</i></b>	<b>68</b>
<b>1.11 Effet de la co inoculation par la PGPR sur la teneur en protéines solubles chez <i>Triticum durum</i></b>	<b>69</b>
<b>1.12 Effet de la co inoculation par la PGPR sur la teneur en sucre solubles chez <i>Triticum durum</i></b>	<b>71</b>
<b>1.13 Effet de la co inoculation par la PGPR sur la teneur en malondialdihyde chez <i>Triticum durum</i></b>	<b>73</b>
<b>1.14 Effet de la co inoculation par la PGPR sur la teneur en phénols totaux chez <i>Triticum durum</i></b>	<b>75</b>
<b>1.15 Effet de la co inoculation par la PGPR sur la teneur en flavonoïdes chez <i>Triticum durum</i></b>	<b>77</b>
<b>1.16 Effet de la co inoculation par la PGPR sur les propriétés</b>	<b>79</b>

# Tables des matières

---

**physicochimiques du sol**

**2. Discussion** 85

**CONCLUSION** 98

**Références bibliographie**

# Liste des Tableaux

---

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1 :</b> Classification du blé	04
<b>Tableau 2:</b> stades de développement des céréales.	08
<b>Tableau 3.</b> Production (106 tonnes) mondiale de blé dur	10
<b>Tableau 4 :</b> Bilan de blé dur en Algérie de 2010/11 à 2019/20	11
<b>Tableau 5:</b> Rapport du flux lié à l'activité humaine et le flux naturel des métaux lourds	23
<b>Tableau 6 :</b> Sources industrielles et agricoles des métaux présents dans l'environnement	24
<b>Tableau 7 :</b> Quelques travaux de recherche sur la biostimulation	33
<b>Tableau 8 :</b> Différentes techniques de bioremediation	35
<b>Tableau 9 :</b> Composition du milieu d'ensemencement	40
<b>Tableau 10 :</b> Test de toxicité	42
<b>Tableau 11 :</b> Les principales caractéristiques de variété Ain lahma.	44
<b>Tableau 12:</b> Analyse de la variance de taux germination de <i>Triticum durum</i> stressé par le cadmium.	54
<b>Tableau 13:</b> Test de kruskal-wallis de taux germination de <i>Triticum durum</i> stressé par le plomb.	54
<b>Tableau 14:</b> Test de kruskal-wallis de nombre feuilles de <i>Triticum durum</i> stressé par le plomb	56
<b>Tableau 15:</b> Test de kruskal-wallis de nombre feuilles de <i>Triticum durum</i> stressé par le cadmium	56
<b>Tableau 16:</b> Analyse de la variance de nombre des racines de <i>Triticum durum</i> stressé par le cadmium	58
<b>Tableau 17:</b> Test de kruskal-wallis de nombre des racines de <i>Triticum durum</i> stressé par le plomb	58
<b>Tableau 18:</b> Analyse de la variance de la longueur de la partie racinaire de <i>Triticum durum</i> stressé par le cadmium	59
<b>Tableau 19:</b> test de kruskal-wallis de la longueur de la partie racinaire de <i>Triticum durum</i> stressé par le plomb	60
<b>Tableau 20:</b> Test de kruskal-wallis de la longueur de la partie aérienne de <i>Triticum durum</i> stressé par le cadmium	61

## Liste des Tableaux

---

<b>Tableau 21:</b> Test de kruskal-wallis de la longueur de la partie aérienne de <i>Triticum durum</i> stressé par le plomb	61
<b>Tableau 22:</b> Analyse type II du poids frais de <i>Triticum durum</i> stressé par le cadmium	62
<b>Tableau 23 :</b> Analyse type II du poids frais de <i>Triticum durum</i> stressé par le plomb	62
<b>Tableau 24:</b> Analyse type II du poids sec de <i>Triticum durum</i> stressé par le cadmium	63
<b>Tableau 25:</b> Analyse type II du poids sec de <i>Triticum durum</i> stressé par le plomb	64
<b>Tableau 26:</b> Test de kruskal-wallis de la surface foliaire de <i>Triticum durum</i> stressé par le cadmium	65
<b>Tableau 27:</b> Analyse de la variance de la surface foliaire de <i>Triticum durum</i> stressé par le plomb	65
<b>Tableau 28 :</b> Test de kruskal-wallis de la teneur relative en eau de <i>Triticum durum</i> stressé par le cadmium	66
<b>Tableau 29:</b> Test de kruskal-wallis de la teneur relative en eau de <i>Triticum durum</i> stressé par le plomb	66
<b>Tableau 30:</b> Analyse de la variance de la teneur en chlorophylle de <i>Triticum durum</i> stressé par le cadmium	68
<b>Tableau 31:</b> Test de kruskal-wallis de la teneur en chlorophylle de <i>Triticum durum</i> stressé par le plomb	68
<b>Tableau 32:</b> Analyse type II de la teneur en protéines solubles de <i>Triticum durum</i> stressé par le cadmium	70
<b>Tableau 33:</b> Analyse type II de la teneur en protéines solubles de <i>Triticum durum</i> stressé par le plomb	70
<b>Tableau 34:</b> Analyse type II de la teneur en sucre solubles de <i>Triticum durum</i> stressé par le plomb	72
<b>Tableau 35:</b> Analyse type II de la teneur en sucre solubles de <i>Triticum durum</i> stressé par le cadmium	72
<b>Tableau 36:</b> Analyse type II de la teneur en malondialdihyde de <i>Triticum durum</i> stressé par le plomb	74
<b>Tableau 37:</b> Analyse type II de la teneur en malondialdihyde de <i>Triticum durum</i> stressé par le cadmium	74
<b>Tableau 38:</b> Analyse type II de la teneur en phénols totaux de <i>Triticum durum</i> stressé par le plomb	76
<b>Tableau 39:</b> Analyse type II de la teneur en phénols totaux de <i>Triticum durum</i> stressé par le	76

## Liste des Tableaux

---

cadmium

<b>Tableau 40:</b> Analyse type II de la teneur en flavonoïdes de <i>Triticum durum</i> stressé par le cadmium	78
<b>Tableau 41:</b> Analyse type II de la teneur en flavonoïdes de <i>Triticum durum</i> stressé par le plomb	78
<b>Tableau 42:</b> Résultats des analyses physico-chimiques du sol	80
<b>Tableau 43:</b> Analyse de la variance de PH d <i>Triticum durum</i> stressé par Cadmium	81
<b>Tableau 44:</b> Analyse de la variance de PH d <i>Triticum durum</i> stressé par plomb	81
<b>Tableau 45:</b> Analyse de la variance de conductivité d <i>Triticum durum</i> stressé par Cadmium.	82
<b>Tableau 46:</b> Analyse de la variance de conductivité électrique d <i>Triticum durum</i> stressé par plomb.	82
<b>Tableau 47.</b> Récapitulatif des données les plus marquantes obtenues au cours de cette étude, concernant l' effet de co-inoculation par PGPR sur la croissance de <i>Triticum durum</i> , au présence de métaux lourds : Pb (800ppm) ; Cd (12ppm)	83

# Liste des figures

---

## Liste des figures

<b>Figure 1.</b> Représentation schématique de l'évolution historique des espèces du blé ( <i>Triticum</i> and <i>Aegilops</i> )	05
<b>Figure 2 :</b> Le cycle de développement de blé	09
<b>Figure 3 :</b> Description schématique d'une graminée	13
<b>Figure 4:</b> Anatomie schématique du grain du blé	17
<b>Figure 5 :</b> Promotion de la croissance des plantes par les PGPR	20
<b>Figure 6:</b> Classification périodique des éléments	22
<b>Figure 7 :</b> Bioremédiation naturelle et bioremédiation assistée par l'homme	31
<b>Figure 8:</b> Bioremediation in situ	32
<b>Figure 9 :</b> Bioremédiation ex situ	34
<b>Figure 10.</b> <i>Peganum harmala</i>	36
<b>Figure 11.</b> Carte de situation des sites de prélèvement des échantillons	37
<b>Figure 12.</b> Prélèvements des échantillons du sol de la rhizosphère et des racines.	38
<b>Figure 13 :</b> Les séries de dilutions	39
<b>Figure 14 :</b> Composition du milieu d'ensemencement	40
<b>Figure 15 :</b> Essai de germination	43
<b>Figure 16 :</b> Stérilisation du substrat	45
<b>Figure 17 :</b> Stérilisation des pots	45
<b>Figure 18 :</b> Application de stress métallique	45
<b>Figure 19 :</b> Semis des grains	46
<b>Figure 20 :</b> Les pots traités par les consortiums.	46
<b>Figure 21 :</b> L'irrigation des plantes.	47
<b>Figure 22 :</b> Prélèvement des échantillons du blé	48
<b>Figure 23 :</b> Chlorophylle-mètre minolta SPAD 502	49
<b>Figure 24 :</b> Analyses physico-chimique du sol	53
<b>Figure 25:</b> Effet de la co-inoculation avec des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR) sur le taux de germination des plantes de <i>Triticum durum</i> cultivées dans des conditions contrôlées (A: en présence de cadmium, B : en présence de plomb)	55
<b>Figure 26:</b> Effet de la co-inoculation avec des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR) sur le nombre des feuilles des plantes de <i>Triticum</i>	57

## Liste des figures

---

*durum* cultivées dans des conditions contrôlées (B: en présence de cadmium, A : en présence de plomb).

**Figure 27:** Effet de la co-inoculation avec des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR) sur le nombre de racine des plantes de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées (A: en présence de cadmium, B : en présence de plomb) 59

**Figure 28 :** Effet de la co-inoculation avec des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR) sur la longueur de la partie racinaire des plantes de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées (A: en présence de cadmium, B : en présence de plomb). 60

**Figure 29 :** Effet de la co-inoculation avec des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR) sur la longueur de la partie aérienne des plantes de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées (A: en présence de cadmium, B : en présence de plomb) 61

**Figure 30 :** Effet de la co-inoculation avec des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR) sur le poids frais des plantes de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées (A: en présence de cadmium, B : en présence de plomb). 63

**Figure 31 :** Effet de la co-inoculation avec des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR) sur le poids sec des plantes de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées (A: en présence de cadmium, B : en présence de plomb). 64

**Figure 32 :** Effet de la co-inoculation avec des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR) sur la surface foliaire de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées (A: en présence de cadmium, B : en présence de plomb). 66

**Figure 33:** Effet de la co-inoculation avec des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR) sur la teneur relative en eau des plantes de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées (A: en présence de cadmium, B : en présence de plomb). 67

**Figure 34 :** Effet de la co-inoculation avec des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR) sur la teneur en chlorophylle des plantes de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées (A: en présence de cadmium, B : en 69

## Liste des figures

---

présence de plomb).

**Figure 35:** Effet de la co-inoculation avec des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (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). 71

**Figure 36 :** Effet de la co-inoculation avec des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR) sur la teneur en sucre soluble des plantes de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées (A: en présence de cadmium, B : en présence de plomb). 73

**Figure 37:** Effet de la co-inoculation avec des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR) sur le MDA des plantes de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées (A: en présence de cadmium, B : en présence de plomb). 75

**Figure 38:** Effet de la co-inoculation avec des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR) sur la teneur en flavonoïde des plantes de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées (A: en présence de cadmium, B : en présence de plomb). 77

**Figure 39:** Effet de la co-inoculation avec des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR) sur la teneur en flavonoïde des plantes de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées (A: en présence de cadmium, B : en présence de plomb). 79

## Liste d'abréviation

<b>PGPR</b>	Plant Growth-Promoting Rhizobacteria
<b>ABA</b>	Acide absicique
<b>CO2</b>	Le dioxyde de carbone
<b>Cd</b>	Le cadmium
<b>Pb</b>	Le plomb
<b>MT</b>	Métaux lourds
<b>ETM</b>	Élément trace métallique
<b>MDA</b>	malondialdehyde
<b>TCA</b>	acide trichloracétique
<b>TBA</b>	Acide biliaire
<b>TRE</b>	Teneur relative en eau
<b>PH</b>	potentiel hydrogène
<b>CE</b>	Conductivité
<b>ML</b>	millilitre
<b>MIN</b>	Minute
<b>G</b>	Gramme
<b>HGCL</b>	Chlorure de mercure
<b>AIA</b>	Acide indole acétique
<b>PPM</b>	Partie par million
<b>OAIC</b>	Office algérien interprofessionnel des céréales
<b>V</b>	volume
<b>CA</b>	Consortium A
<b>CB</b>	Consortium B
<b>C A.B.</b>	Consortium A.B
<b>CM</b>	Centimetre
<b>PGPR</b>	Plant Growth-Promoting Rhizobacteria
<b>So</b>	Sol+Eau distillé
<b>S<sub>Cd</sub></b>	Sol + Cadmium (12 ppm)
<b>S<sub>CA</sub></b>	Sol + Consortium A (bactéries isolées des racines de <i>Peganum harmala</i> )
<b>SCB</b>	Sol + Consortium B (bactéries isolées du sol de <i>Peganum harmala</i> )
<b>S (CA x CB)</b>	Sol + Consortium A + Consortium B

## Liste d'abréviation

---

<b>SCA+ Cd</b>	Sol + Consortium A + Cd
<b>SCB+ Cd</b>	Sol + Consortium B + Cd
<b>S (CA x CB) + Cd</b>	Sol + Consortium A + Consortium B + Cd
<b>SPb</b>	Sol + Plomb (800 ppm)
<b>SCA+ Pb</b>	Sol + Consortium A + Pb
<b>SCB+ Pb</b>	Sol + Consortium B + Pb
<b>S (CA x CB) +Pb</b>	Sol + Consortium A + Consortium B + Pb

# **Introduction**

## Introduction

La pollution de l'environnement par les métaux lourds est l'un des problèmes croissant dans le monde (**Elkhawaga., 2011**), elle est un problème environnemental sérieux, car plus de 12% à 25% des terres agricoles sont déjà polluées par les métaux lourds dans le monde (**Brian, 2013**). Cette contamination dégrade la fertilité des sols et limite la productivité des plantes .

En outre, les métaux lourds peuvent être transmis à la chaîne alimentaire avec un potentiel important d'altération à la santé humaine, en raison de leur forte toxicité et de leur persistance car ils ne peuvent pas être dégradés ou transformés en formes moins dangereuses (**Etesami., 2018; Järup., 2003**).

À la différence des polluants organiques, de nombreux chercheurs se sont intéressés à l'impact du plomb et cadmium sur les végétaux ; ces polluant affecte le métabolisme de la plante (**Fargašová., 2001 ; Sharma et Dubey., 2005**), inhibe l'élongation racinaire (**Peng et al., 2005**) et peut causer des dommages membranaires (**Seregin et Ivanov., 2001 ; Sharma et Dubey, 2005**), perturbe ainsi les structures membranaires et pariétales, modifie le statut hydrique, perturbe l'absorption et/ou la translocation des éléments minéraux essentiels (calcium, manganèse, zinc, fer, etc.) ou encore réduit la photosynthèse (**Sharma et Dubey, 2005**). Il présente également une forte affinité pour les protéines qui possèdent des groupements thiols ou des cofacteurs métalliques (métallo-enzymes) (**Pourrut, 2008**), ces derniers ne peuvent pas être biodégradés et donc persistent dans l'environnement pendant de longues périodes (**Wade et al., 1993**). Ces métaux naturellement présent à très faible concentration dans les tissus vivants, Présentent une forte écotoxicité et pourraient être impliqués dans de nombreuses pathologies (atteintes du système nerveux central, du foie, des reins, mais aussi cancers et malformations embryonnaires) (**Abrahams., 2002 ; Adriano., 2001**).

De plus ils sont continuellement rajoutés dans les sols par diverses activités: en agriculture par l'application de boues d'épuration ou dans l'industrie métallurgique, L'accumulation des métaux lourds dans l'environnement peut se répercuter sur la santé des êtres vivant (**Wang et al., 2003**). La toxicité des métaux lourds est intimement liée à leurs propriétés oxydo-réductrices et à la production d'espèces réactives de l'oxygène (ROS), tels que l'anion superoxyde ou le radical hydroxyle, les phospholipides membranaires et

## Introduction

---

les acides aminés (**Remon., 2006**). Bien que les plantes possèdent de nombreux systèmes de détoxification pour limiter l'interaction de ces ions avec les molécules biologiques, ces derniers induisent tout un éventail d'effets délétères pour les organismes (**Seregin et Ivanov., 2001 ; Sharma et Dubey., 2005**). En conditions stressantes, les plantes peuvent réagir en mettant en œuvre des mécanismes, entre autres, physiologiques (**Tafforeau, 2002 ; Parida et Das, 2005 ; Martinez et al., 2007**) et biochimiques (**Brugnoli et Lauteri, 1991 ; Attia., 2007**).

Donc la dépollution est nécessaire, mais les techniques classiques ne sont pas efficaces, en dépit de leurs couts qui sont très couteux. A cette effet, le recours aux pratiques biotechnologiques de bioremédiation, nouvellement développées et adoptées, peut participer, même à titre partiel, dans l'atténuation des méfaits de la pollution chimique.

La bioremédiation est une technique qui utilise les organismes vivants pour la dépollution des sites contaminés, cette technique de remédiation des sols pollués est basée sur la capacité de certaines bactéries (PGPR) d'extraire les polluants pour assainir les sols contaminés . Les bactéries interviennent dans de nombreux processus géochimiques, telles que la précipitation, la dissolution, la sorption ou l'accumulation d'éléments en traces métalliques, ce qui déjà facilité leur utilisation dans ce domaine. Les bactéries présentent naturellement des aptitudes leur permettant de mobiliser, d'immobiliser et / ou de transformer les métaux par des mécanismes spécifiques.

En revanche, de nombreuses études ont été menées pour évaluer l'impact du partenariat entre les céréales et PGPR sur l'efficacité de la phytoremédiation (**Chiboub et al., 2017; Gómez- Sagasti et Marino., 2015; Saadani et al., 2016**). Les PGPR peuvent fixer l'azote atmosphérique et le fournir aux plantes, produire des phytohormones, y compris les auxines (AIA) et des cytokinines qui améliorent la croissance des plantes, solubilisent les phosphates rendant le phosphore facilement disponible aux plantes et synthétisent les sidérophores qui peuvent solubiliser et séquestrer le fer du sol et le fournir aux plantes (**Etesami., 2018**). Ces bactéries sont aussi capables d'améliorer les mécanismes de défense contre les agents pathogènes et la toxicité, d'améliorer la fertilité du sol et d'extraire ou de stabiliser les métaux simultanément (**Mishra et al., 2017**). De plus, l'inoculation avec les PGPR peut atténuer la toxicité des métaux lourds et augmenter de manière significative leur absorption par les plantes (**Chen et al., 2010**). En effet, de

# Introduction

---

nombreuses bactéries du sol tolèrent les métaux lourds et jouent un rôle important dans la disponibilité des métaux en modifiant le pH du sol (Ma *et al.*, 2011; Ma *et al.*, 2016).

L'objectif principal de ce travail consiste à étudier l'effet de la co inoculation par les PGPR sur les propriétés morpho-physiologique et biochimiques du blé dur (*Triticum durum*) dans un sol contaminé par le cadmium à 12 ppm et le plomb à 800 ppm.

Notre travail comporte deux grandes parties :

Une partie théorique qui est composée de trois chapitres :

- Le premier chapitre: le blé dur
- Le deuxième chapitre: la pollution du sol par les métaux lourds
- Le troisième chapitre: la bioremédiation

Une partie expérimentale qui est subdivisée en deux chapitres

- Le premier présente le matériel et les méthodes utilisés dans notre travail .
- Le deuxième chapitre consiste en la présentation des résultats obtenus, ainsi que leur discussion.

Enfin ce travail se termine par une conclusion générale et quelques perspectives

# **Partie 01**

## **Synthèse bibliographique**

# Chapitre 01

## Blé dur

*(Triticum durum)*

### Chapitre 01.classification du blé dur

Le blé appartient à la famille des graminées (Gramineae = Poaceae), qui comprend plus 10000 espèces différentes (Mac key., 2005). Plusieurs espèces de ploïdie différentes sont regroupées dans le genre *Triticum* qui est un exemple classique d'allo polyplôïdie, dont les génomes homéologues dérivent de l'hybridation inter espèces appartenant à la même famille (Levy et feldman., 2002). Le Blé dur (*T. turgidum ssp. durum* Desf.) est un allo tétraploïde ( $2n = 28$ , AABB) qui a pour origine l'hybridation suivie d'un doublement chromosomique entre *Triticum Urtu* (génome AA) et une espèce voisine, *Aegilops speltoides* (génome BB) (Huang et a l., 2002).

L'allo polyplôïdie se caractérise par un appariement bivalent et une transmission dioïque. En effet, selon Mac Key (2005), l'appariement à la méiose se produit entre les chromosomes véritablement homologues et très rarement entre les homoéologues. L'appariement bivalent est déterminé principalement par un gène suppresseur majeur, Ph1, situé sur le chromosome 5BL (Kimber et Sears., 1987). Les blés tétraploïdes forment deux groupes, le groupe de l'amidonnier (*Triticum turgidum ssp. Dicoccoides*, génome AABB,  $2n = 28$ ) et le groupe *Timopheevi* ( $2n = 28$ , AAGG), dont la culture est actuellement limitée à l'Arménie et la Transcaucasie (Bozzini., 1988).

**Tableau 1** : Classification du blé (Anguek A. et Zellagui M., 2012)

<b>Etage de classification</b>	<b>Nom</b>
Sous-règne	<i>Cormophyte</i>
Embranchement	<i>Spermaphytes</i>
Sous- embranchement	<i>Angiospermes</i>
Classe	<i>Monocots</i>
Ordre	<i>Commeliniflorales</i>
Sous- ordre	<i>Poales</i>
Famille	<i>Poacées</i>
Genre	<i>Triticum</i>

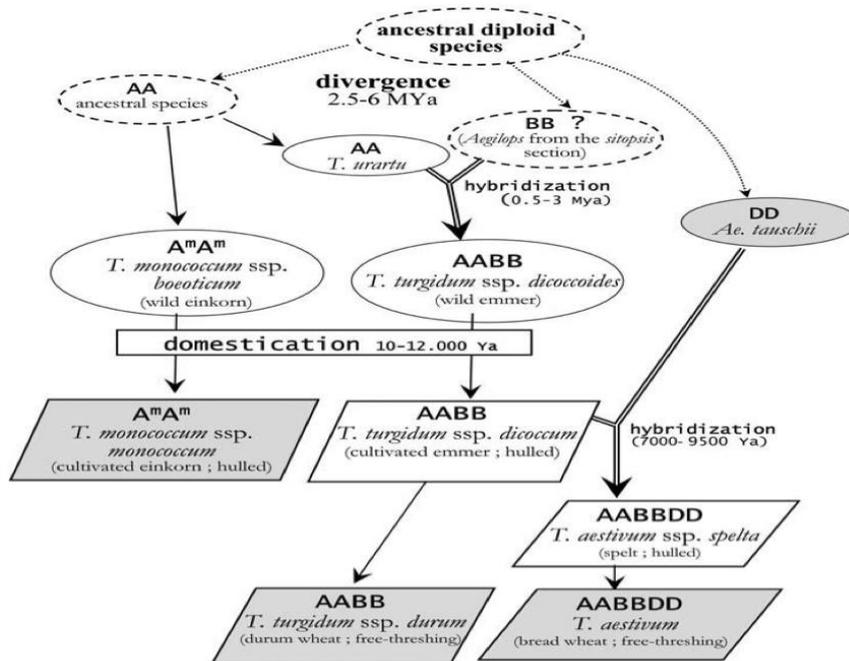
### 2.Origine et historique

Le terme de blé vient probablement du gaulois *Blato* (à l'origine du vieux français *blaie*, *blee*, *blai*, *blaver*, d'où le verbe *emblaver*, qui signifie *ensemencer en blé*) et

désigne les grains qui on se broyant, fournissent de la farine pour la préparation des crêpes ou du pain (**Mahfoud et Lasbahani, 2015**).

La saga du blé accompagne celle de l'homme et de l'agriculture, sa culture précède l'histoire et caractérise l'agriculture néolithique, née en Europe il y a 8000 ans. La plus ancienne culture semble être le blé dur dans le croissant fertile de la Mésopotamie (**Feillet, 2000**).

Le blé tendre est apparu entre 5000 et 6000 ans avant Jésus-Christ dans le croissant fertile puis s'est dispersé à partir de la Grèce en Europe (**Doussinault et al., 1992**). C'est à partir de cette zone que les blés ont été diffusés vers l'Afrique, l'Asie et l'Europe. La route la plus ancienne de diffusion des céréales vers les pays du Maghreb fut à partir de la péninsule Italienne et de la Sicile (**Bonjean, 2001 in Boulal et al., 2007**).



**Figure 1.** Représentation schématique de l'évolution historique des espèces du blé (Triticum and Aegilops) (**Chantret et al., 2005**)

### 3. Cycle biologique

Afin de caractériser le cycle de développement du blé, différentes échelles de notation ont été développées, portant soit sur des changements d'aspect externe, soit sur les modifications d'aspect interne des organes reproducteurs.

→ L'échelle de Jonard et Koller, (1950), utilisée pour reconnaître les stades par des changements d'aspect externe (Levée - Montaison).

→ L'échelle de Zadoks et al. (1974), utilisée pour reconnaître les stades par des modifications d'aspect interne (différentiation de l'épi : stade épi 1 cm), (**Gate., 1995**).

### **3.1. Période végétative**

Elle se caractérise par un développement strictement herbacé et s'étend du semis jusqu'à fin tallage.

#### **3.1.1. Germination-levée-tallage**

La germination de la graine se caractérise par l'émergence du coléorhize donnant naissance à des racines séminales et de coléoptile, ce dernier protège la sortie de la première feuille fonctionnelle. La levée se fait réellement dès la sortie des feuilles à la surface du sol. Au sein d'un peuplement, la levée est atteinte lorsque la majorité des lignes de semis sont visibles (**Gate, 1995**). Durant la phase semis-levée, l'alimentation de la plante dépend uniquement de son système racinaire primaire et des réserves de la graine.

Les principaux facteurs édaphiques qui interviennent dans la réalisation de cette phase sont, la chaleur, l'aération et l'humidité (**Eliard., 1979**). Les caractéristiques propres à la graine comme la faculté germinative et la quantité de réserves (taille des graines) jouent aussi un rôle déterminant. En effet, les plus grosses graines lèvent les premières et donnent des plantules plus vigoureuses (**Granger., 1979 in Masle., 1980**) et la composition des réserves (teneur en protéines) agit favorablement sur la vitesse de la germination-levée (**Lowe et al., 1972, in Evans et al., 1975**).

#### **3.1.2. Période reproductrice a- Montaison – gonflement**

La montaison débute à la fin du tallage, elle est caractérisée par l'allongement des entre-nœuds et la différenciation des pièces florales. A cette phase, un certain nombre de talles herbacées commencé à régresser alors que, d'autres se trouvent couronnées par des épis. Pendant cette phase de croissance active, les besoins en éléments nutritifs notamment en azote sont accrus (**Clement – Grancourt et Prats., 1971**). La montaison s'achève à la fin de l'émission de la dernière feuille et les manifestations du gonflement que provoquent les épis dans la gaine.

### 3.1.3. L'épiaison-floraison

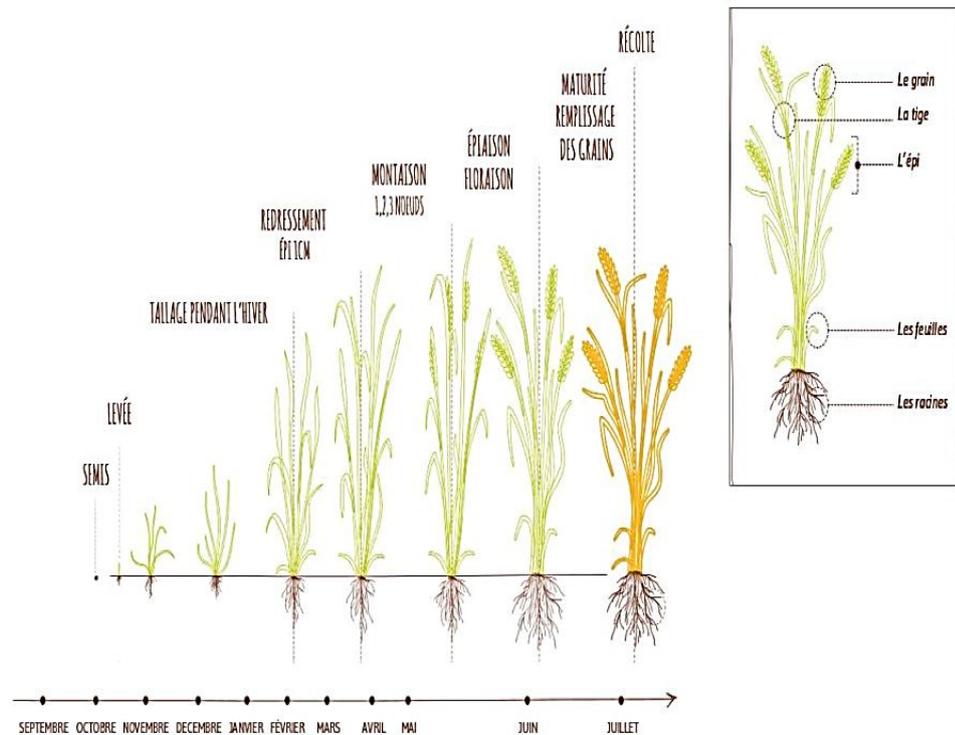
Elle est marquée par la méiose pollinique, l'éclatement de la gaine avec l'émergence de l'épi, c'est au cours de cette phase que s'achève la formation des organes floraux (l'anthèse) et s'effectue la fécondation. Cette phase est atteinte quand 50 % des épis sont à moitié sortis de la gaine de la dernière feuille (**Gate., 1995**). Elle correspond au maximum de la croissance de la plante qui aura élaboré les trois quarts de la matière sèche totale et dépend étroitement de la nutrition minérale et de la transpiration qui influencent le nombre final de grains par épi (**Masle., 1980**).

### 3.1.4. Remplissage et maturation du grain

Cette phase marque la modification du fonctionnement de la plante qui sera alors orientée vers le remplissage des grains à partir de la biomasse produite. Au début, le grain s'organise, les cellules se multiplient. Les besoins des grains sont inférieurs à ce que fournissent les parties aériennes (plus de trois quart de la matière sèche sont stockés au niveau des tiges et des feuilles). Par la suite, les besoins augmentent et le poids des grains dans l'épi s'élève, alors que la matière sèche des parties aériennes diminue progressivement. Seulement 10 % à 15 % de l'amidon du grain peut provenir de réserves antérieures à la floraison (**Hoppenot et al., 1991 in Boulelouah, 2002**). A l'issue de cette phase, 40 à 50 % des réserves se sont accumulées dans le grain qui, bien qu'il ait atteint sa taille définitive, se trouve encore vert et mou, c'est le stade «grain laiteux». L'autre partie des réserves se trouve encore dans les tiges et les feuilles qui commencent à jaunir.

**Tableau 2:** stades de développement des céréales (Feekes., 1954) et de (Zadoks, 1974).

Stade	Feekes	Zadoks	Caractéristiques
<b>Levée</b>	1	7	Sortie de la coléoptile
		10	1ère feuille traversant la coléoptile
		11	1ère feuille étalée
		12	2ème feuille étalée
		13	3ème feuille étalée
<b>Début tallage</b>	2	21	Formation de la 1ère talle
<b>Plein tallage</b>	3	22	2 à 3 talles
<b>Fin tallage</b>	4	23	
		24	
		25	
<b>Epi à 1cm</b>	5	30	Sommet de l'épi distant à 1cm du plateau de tallage
<b>1- 2 nœuds</b>	6	31	1 nœud
	7	32	2 nœuds élongation de la tige
<b>Gonflement</b> <b>L'épi gonfle la gaine de la dernière feuille</b>	8	37	Apparition de la dernière feuille
	9	39	Ligule juste visible (méiose male)
	10	45	Gaine de la dernière feuille sortie
<b>Epiaison</b>	10-1	49-51	Gaine éclat
	10-2	53	¼ épiaisons
	10-3	55	½ épiaisons
	10-4	57	¾ épiaisons
	10-5	59	Tous les épis sortis
<b>Floraison</b>	10-5-1	61	Début floraison
	10-5-2	65	Demi floraison
	10-5-3	69	Floraison complète
<b>Formation du grain</b>	10-5-4	71	Grain formé
	11-1	75	Grain laiteux
	11-2	85	Grain pâteux
	11-3	91	Grain jaune Grain mure



**Figure 2 :** le cycle de développement de blé (Fritas.,2012)

### 4. Production du blé dans le monde et en Algérie

#### 4.1. Dans le monde

Les blés constituent la première ressource en alimentation humaine et la principale source de protéine. Ils fournissent également une ressource privilégiée pour l'alimentation animale et de multiples application industrielles (Bonjean et Picard., 1990).

Le blé dur représente environ 8% des superficies en blés dans le monde dont 70% sont localisées en conditions méditerranéennes (Monneveux., 2002). La Turquie, la Syrie, la Grèce, l'Italie, l'Espagne et les pays d'Afrique du Nord sont en effet parmi les principaux producteurs.

Le blé dur prend mondialement, la cinquième place après le blé tendre, le riz, le maïs et l'orge (Amokrane., 2001).

**Tableau 3.** Production (106 tonnes) mondiale de blé dur (FAO., 2007)

	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Algerie	0.56	1.19	2.04	0.46	1.50	0.90	0.49	1.22	0.95	1.81	1.82	1.00	1.00	1.30
Maroc	2.34	0.50	2.27	0.88	1.54	0.8	0.43	1.04	1.03	1.77	2.03	0.75	1.20	1.50
Tunisie	0.44	0.47	1.62	0.80	1.10	1.14	1.10	0.94	0.37	1.31	1.40	1.15	1.10	1.60
Syrie	1.95	2.35	2.45	1.90	2.60	1.00	1.10	2.40	2.30	2.30	2.10	2.10	2.10	2.70
Turkie	1.08	1.30	1.50	2.20	2.40	1.60	2.00	1.60	2.30	2.30	2.40	2.30	2.30	2.70
<b>UE</b>	<b>7.16</b>	<b>6.17</b>	<b>7.59</b>	<b>6.70</b>	<b>8.72</b>	<b>7.20</b>	<b>9.07</b>	<b>7.53</b>	<b>9.52</b>	<b>8.34</b>	<b>11.8</b>	<b>7.33</b>	<b>7.66</b>	<b>8.30</b>
Inde	1.70	1.90	1.80	1.80	1.00	1.00	1.00	1.20	1.40	1.80	1.20	1.20	1.20	1.10
Mexique	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.20	1.20	1.20	0.48	1.20
<b>USA</b>	<b>2.63</b>	<b>2.78</b>	<b>3.16</b>	<b>2.39</b>	<b>3.76</b>	<b>2.70</b>	<b>2.99</b>	<b>2.27</b>	<b>2.18</b>	<b>2.63</b>	<b>2.45</b>	<b>2.56</b>	<b>2.30</b>	<b>2.60</b>
<b>Canada</b>	<b>4.64</b>	<b>4.65</b>	<b>4.63</b>	<b>4.35</b>	<b>6.04</b>	<b>4.34</b>	<b>5.71</b>	<b>2.99</b>	<b>3.88</b>	<b>4.28</b>	<b>4.96</b>	<b>4.75</b>	<b>4.80</b>	<b>4.60</b>
Argentine	0.10	0.10	0.19	0.29	0.16	0.18	0.19	0.14	0.10	0.15	0.18	0.16	0.16	0.40
Australie	0.06	0.20	0.26	0.28	0.40	0.40	0.40	0.40	0.10	0.45	0.40	0.40	0.40	0.70
Russie	1.80	1.00	1.30	2.00	0.50	1.00	1.00	1.30	1.50	1.20	1.00	1.20	1.20	1.70
kazakhstan	0.70	0.50	0.50	0.50	0.30	0.40	0.10	0.05	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	3.00
<b>Monde</b>	<b>26.2</b>	<b>24.2</b>	<b>30.4</b>	<b>25.7</b>	<b>31.1</b>	<b>23.8</b>	<b>26.7</b>	<b>24.2</b>	<b>26.8</b>	<b>28.6</b>	<b>33.0</b>	<b>26.2</b>	<b>26.0</b>	<b>33.2</b>

### 4.2. En Algérie

En Algérie, les produits céréaliers occupent une place stratégique dans le système alimentaire et dans l'économie nationale (Djermoun, 2009). Le blé dur (*Triticum turgidum* L. var. durum) est la première céréale cultivée en Algérie, en termes de superficies et de production, occupant la moitié d'une superficie de 3 millions hectares, destinés à la céréaliculture (Haddad et al., 2016). Sur les hautes plaines orientales algériennes, la culture pluviale du blé dur représente, avec l'orge et l'élevage ovin, l'essentiel de l'activité agricole. La production de blé dur est consommée par l'homme, le plus souvent directement sur le site de l'exploitation, et les résidus du blé sont utilisés par l'élevage (Mekhlouf et al., 2006). La production de blé en Algérie en 2018 est : 3981219 tonnes (FAO stat., 2018).

**Tableau 04** : Bilan de blé dur en Algérie de 2010/11 à 2019/20 (CIC, 2020).

Jun/mai en millions de t	2010/11	2011/12	2012/13	2013/14	2014/15	2015/16	2016/17	2017/18	2018/19	2019/20*
<b>Ressources</b>										
Stocks débuts	0,6	0,7	0,9	1,2	0,9	0,3	0,2	0,3	0,3	0,6
Production	2,2	2,5	3,0	2,5	1,3	2,2	1,9	2,1	3,2	3,2
Importations	1,3	1,8	1,6	1,5	1,7	1,7	1,9	1,5	1,5	1,1
<b>Disponibilités totales</b>	<b>4,1</b>	<b>5,0</b>	<b>5,2</b>	<b>5,2</b>	<b>4,0</b>	<b>4,2</b>	<b>4,1</b>	<b>3,9</b>	<b>4,9</b>	<b>4,9</b>
<b>Utilisations</b>										
Consommation humaine	3,3	3,8	4,0	4,0	3,5	3,8	3,7	3,5	4,3	4,1
Consommation industrielle	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alimentation animale	-	0,1	T	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Semences	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Autres	T	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
<b>Consommation totale</b>	<b>3,5</b>	<b>4,1</b>	<b>4,3</b>	<b>4,3</b>	<b>3,8</b>	<b>3,8</b>	<b>3,7</b>	<b>3,5</b>	<b>4,3</b>	<b>4,4</b>
Exportations	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Stocks finaux</b>	<b>0,7</b>	<b>0,9</b>	<b>1,2</b>	<b>0,9</b>	<b>0,3</b>	<b>0,2</b>	<b>0,3</b>	<b>0,3</b>	<b>0,6</b>	<b>0,5</b>

## 5. Caractéristiques morphologiques

### 5.1. Les racines

#### Deux sortes de racines

1/ Les racines primaires : ou séminales issues de la semence qui se développent au moment de la germination : la racine qui débouche le paire de racines qui va sortir en même temps ; et la 2e paire racinaire. Ces racines qui sont constitués que de tissus primaires vont nourrir la plantule jusqu'au stade tallage.

2/Un système racinaire fasciculé : assez développé, (racines adventifs ou coronaires) ; qui sont produites par le développement de nouvelles talles Elles peuvent atteindre jusqu'à 1m5 (Soltner., 1999).

### 5.2. Les Feuilles

Engaine la tige puis s'allonge en un limbe étroit à nervures parallèles lancéolés, issues chaque une d'un nœud ; compte à la gaine est un cylindre qui permet d'attacher le limbe au nœud le plus bas son rôle est chlorophyllien et conservation d'eau et d'air et avant l'allongement des talles les gaines protégeant l'apex qui se trouve en cercle concentrique au plateau de tallage (Prats et al., 1998).

L'oreillette ou stipules sont des organes membranaires dépourvus de chlorophylle dot le rôle n'est pas encore bien déterminer (elles forment des joins empêchant particulièrement l'eau de pluie ou de rosé de s'infiltrer à l'intérieur de la gaine) ; la ligule est un organe membranaire qui se forme à l'adjonction entre le limbe et la gaine. (Prats et al., 1971).

Chez toutes les graminées la présence et la forme des oreillettes ou stipules et de la ligule, permet de déterminer l'espèce avant l'apparition de l'épi. (Soltner., 1990).

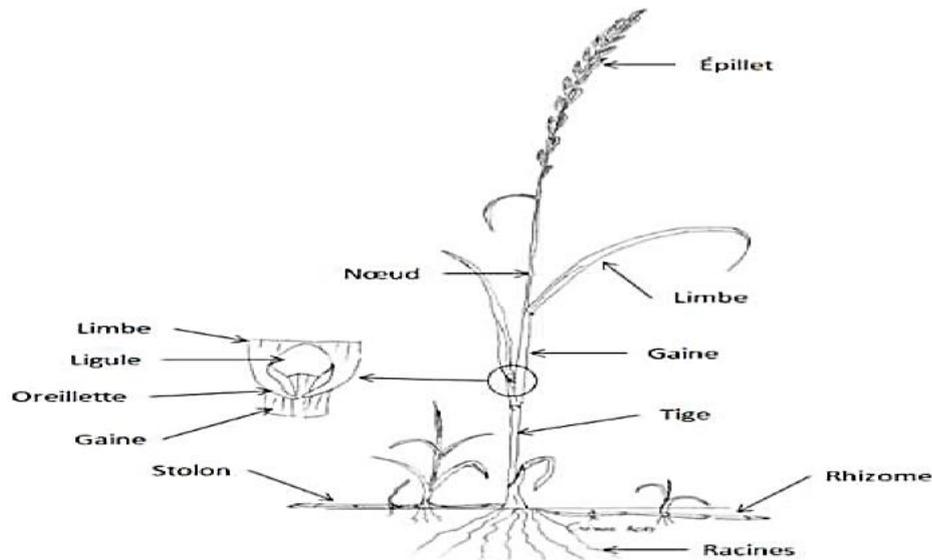
### 5.3. La tige

C'est un chaume, cylindrique, souvent creux par résorption de la moelle centrale mais chez le blé dur elle est pleine. Il se présente comme des tubes cannelés, avec de longs et nombreux faisceaux conducteurs de sève. Ces faisceaux sont régulièrement entrecroisés et renferment des fibres à parois épaisses, assurant la solidité de la structure. Les chaumes sont interrompus par des nœuds qui sont une succession de zones d'où émerge une longue feuille (Prats et al., 1998).

### 5.4. L'appareil reproducteur : L'épi de blé

L'inflorescence du blé dur est un épi muni d'un rachis portant des épillets séparés par de courts entre nœuds. Chaque épillet comporte deux glumes (bractées) renfermant de deux à cinq fleurs distiques sur une racole (Prats, 1966).

Un épillet regroupe de deux à cinq fleurs, et souvent trois fleurs à l'intérieur de deux glumes. Chaque fleur est dépourvue de pétales, et est entourée de deux glumelles (pièces écailleuses non colorées). Elle contient trois étamines qui ont la forme en x (pièces mâles), un ovaire surmonté de deux styles plumeux dichotomique (les pièces femelles). La fleur du blé est dite cléistogame (Prats., 1966). C'est-à-dire que, le plus souvent, le pollen est relâché avant que les étamines ne sortent de la fleur. Il s'attache alors aux stigmates, où peut se produire la fécondation.



**Figure 3** : Description schématique d'une graminée. (Sébastien, 2014)

### 6. Les exigences du blé

#### 6.1. Exigences édaphique

D'après (Soltner., 2000) ; le blé dur préfère les sols du type argilo-calcaire ou limoneux à limono-argileux à cause de son système racinaire fasciculées. Les sols qui conviennent le mieux au blé dur sont :

- 1- Les sols profonds (plus de 60cm de profondeur).
- 2- Les sols suffisamment riches en matières organiques et minérales.
- 3- Les sols bien drainés pour éviter tout développement de maladies.
- 4- Les sols capables de maintenir une réserve en eau suffisante pour assurer une bonne alimentation au moment de l'accumulation des réserves dans le grain.

#### 6.2. Exigences climatiques

##### 6.2.1. La température

La température à partir de laquelle un blé germe et pousse est de 0C°, cependant l'optimum se situe entre 20 et 22C°. Une température élevée est favorable au développement et à la croissance (Simon et al., 1989). (Baldy., 1992), (Mekhlouf et al., 2001).

### 6.2.2. L'eau

L'eau joue un rôle important dans la croissance de la plante (**Soltner., 1990**), la germination ne se réalise qu'à partir d'un degré d'imbibition d'eau de 30%. En effet, C'est durant la phase épi 1Cm à la floraison que les besoins en eau sont les plus importants. La période critique en eau se situe entre 20 jours avant l'épiaison jusqu'à 30 à 35 jours après la floraison (**Loue., 1982**). C'est pour ça que le semis est toujours recommande en culture pluviale.

### 6.2.3.la Lumière

La lumière est le facteur qui agit directement sur le bon fonctionnement de la photosynthèse et le comportement du blé. En effet, un bon tallage est garanti, si le blé est placé dans les conditions optimales d'éclairement (**Soltner., 1990**). Une certaine durée du jour (photopériodisme) est nécessaire pour la floraison et le développement des plantes.

### 6.2.4. Fertilisation

La fertilisation est raisonnée sur le principe de la restitution au sol des quantités d'éléments (N,P,K) fertilisants prélevés par les récoltes. Le blé à besoin de ces trois éléments essentiels et le rôle de chaque élément sur le plante de blé est le suivant (**Hacini., 2014**).

-L'azote (N) : C'est un facteur déterminant du rendement, Il permet la multiplication et l'élongation des feuilles et des tiges.

-Phosphore (P) C'est un facteur de croissance qui favorise le développement des racines en cours de végétation.

-Potassium (K) Il régule les fonctions vitales de la croissance végétale, Il est nécessaire à l'efficacité de la fumure azotée, Il permet une économie d'eau dans les tissus de la plante.

## 7.Composition chimique du blé dur

### 7.1. Les éléments principaux

#### 7.1.1. Les glucides

Les glucides sont présents sous la forme de sucre simple, mais surtout compose de

l'amidon et de substance énergétique par excellence facilement digestible, c'est le constituant majeur des céréales 60 à 65% du poids du blé (**Adrian., 1987**).

### 7.1.2. Les protéines

Ce sont des composés d'azote que l'on rencontre sous forme simple (acide amine) et sous forme plus complexe (protéine), on peut les classer d'après leur propriété de solubilité en:

1. Albumen soluble dans l'eau.
2. Globuline soluble dans les solutions saline diluée.
3. Prolamine soluble dans les solutions alcoolique.

4. Glutamine soluble dans les solutions diluées d'acides ou d'alcalis. Ainsi, la teneur en protéine des céréales varie suivant les espèces, elle est en moyenne de 12% pour le blé (**Niquet et Classeran., 1989**).

Par ailleurs, le blé contient un ensemble particulier des composés solubles dans l'alcool (gliadine) et soluble dans l'eau (glutamine) appelé gluten dont les propriétés sont de lever par fermentation (**Cruz et al., 1988**).

### 7.1.3. Les lipides

Les lipides sont des biomolécules pratiquement insolubles dans l'eau, solubles dans les solvants apolaires tels que chloroforme, le benzène ou l'éther (**Kessous., 1993**). Ils sont localisés surtout dans le germe et les enveloppes, la matière grasse qu'ils renferment est de 12,5% dans le germe, 5,6% dans les enveloppes, et 0,8 à 1% dans 1 albumen. Les lipides sont des constituants mineurs du blé, ils représentent de 2 à 3% du grain sec (**Adrian., 1987**). C'est pour cela que le germe est éliminé de la farine pour éviter le vieillissement qui sera accéléré à cause de l'évolution des lipides (**Grandvoinet et Prati., 1994**), les lipides des céréales sont riches en acides gras insaturés.

## 7.2 Les éléments secondaires

### 7.2.1. Les pigments et les vitamines

Ce sont des composés chimiques très complexes, concentrés surtout dans le péricarpe et

le germe à des teneurs très faibles. Ils sont parfois associés à des vitamines (pigment caroténoïde) (**Riquet et Lasseran., 1989**). Ainsi, les grains de blé contiennent

principalement trois vitamines, la vitamine B1, B2 et PP, les autres vitamines sont aussi présent mais avec une faible teneur (**Godon et Lasseran., 1989**).

### 7.2.2. Les enzymes

Ils sont présents en faible quantité dans le grain, les plus importants sont :Les protéases trouvées en quantité relativement faible, dont l'une d'elles coupe les chaînes polypeptidiques en leur milieu avec une production de molécules de masses encore élevée. L'autre agit pré de l'extrémité de chaînes et libéré les acides aminés libres et les peptides (**Potus et al., 1994**).

Les amylases sont des hydrolases capables de dégrader spécifiquement les liaisons glycosidiques de l'amidon (amylase et amylopectine) et de ses produits de dégradation (malt, dextrine) jusqu'au stade oligosaccharide qui vont être utilisées par les levures durant le processus de la fermentation panaiere (**Adrian et Pouffait., 1996**).

### 7.2.3 Les minéraux

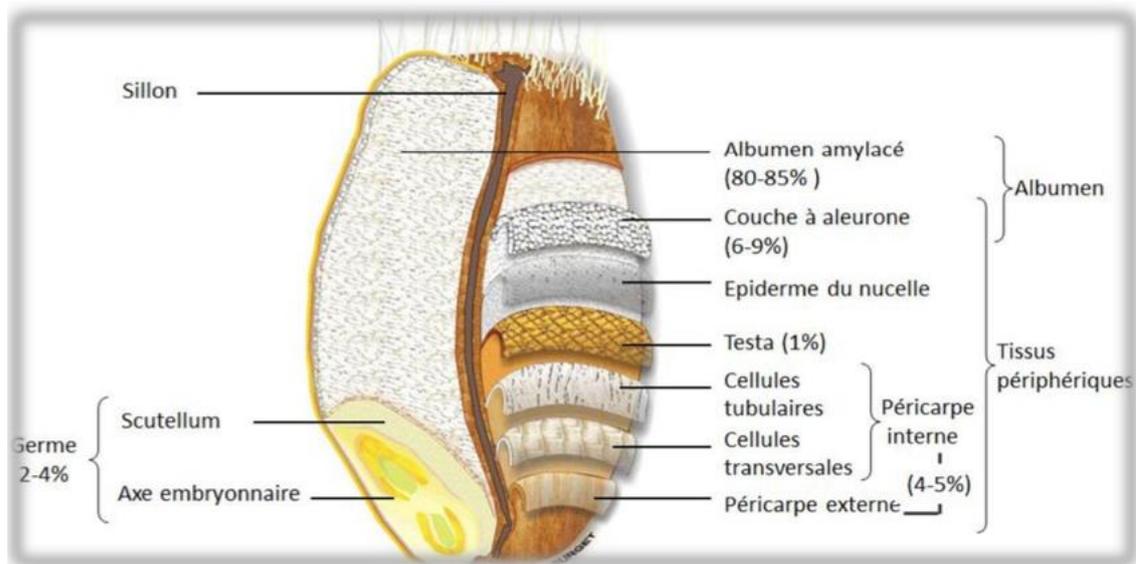
Ils sont présents dans le grain en faible quantité à raison de 2 à 3% de la matière fraîche du grain. Les principaux minéraux sont le potassium, le magnésium, le cuivre souvent associe à des sels (phosphate, chlorure ou sulfate) (**Godon et William., 1991**).

### 7.2.4 L'eau

L'eau dans le blé représente 8 à 9 % avec une valeur moyenne de 14% (**Godon, 1991**). Cette caractéristique de siccité des blés permet de faciliter les opérations de transport, de conservation et la possibilité de traitement par voie sèche. Du point de vue physique et chimique son action de solvant favorise les réactions enzymatiques et les attaques microbienne lorsque sa teneur dans le gain dépasse un certain seuil (**Niquet et Lasserai., 1989**).

L'eau est présente dans le grain sous des formes différentes (**Cruz et al., 1989**)

1. L'eau de dissolution dans les vacuoles des cellules ; c'est une eau que l'on qualifie «libre ».
2. L'eau d'inhibition associe aux colloïdes.
3. L'eau de constitution très fortement fixée à la molécule.



**Figure 4:** Anatomie schématique du grain de blé (Surget and barron., 2005)

### 8. Adaptation de blé dur

Le blé dur est bien adapté aux régions à climat relativement sec, où il fait chaud le jour et frais la nuit durant la période végétative, ce qui est typique des climats méditerranéens et tempérés. Les semences peuvent lever à aussi peu que 2 °C, même si la température optimale est de 15 °C (Bozzini, 1988). La plus grande partie du blé dur produit dans le monde est constituée de blé de printemps; toutefois, il existe des variétés de blé dur d'hiver (qui ont besoin de vernalisation pour amorcer la transition de la phase végétative à la phase reproductrice); ces variétés ont été évaluées en vue de la production dans le Sud des États Unis (Domnez., et al 2000)

# **Chapitre 02**

## **La pollution du sol**

### Chapitre II .la pollution du sol par les métaux lourds

#### 1. L'importance du sol

C'est une matrice complexe formée par des morceaux de roches, des grains de différentes tailles (sables, limons, argiles), des restes de plantes et d'animaux morts.

Les interstices entre ces éléments (pores) sont occupés par de l'eau et de l'air mais aussi par une multitude de micro-organismes qui y vivent (**Brian., 2013**).

Le sol est un milieu vivant qui recèle une incroyable diversité et densité d'organismes. Plus précisément, 25% de la diversité actuellement décrite sur terre serait hébergée dans le sol. Cependant, celle-ci est encore largement méconnue du grand public (**Brian., 2013**). Il remplit beaucoup de fonctions essentielles à la vie, et qui dépendent souvent les unes des autres :

- Le sol est une source de nutrition mondiale (**Bliffert et peraud., 2004**).
- Le sol est un filtre et un tampon qui permet d'avoir de l'eau potable et de réguler les inondations (**Umme et al., 2016**).
- Le sol participe aux cycles de l'azote (N), du phosphore (P) et du potassium (K), éléments nécessaires au développement des plantes et des cultures (**Umme et al., 2016**).
- Le sol est un lieu de vie, riche en espèces et en êtres vivants. Ainsi la biodiversité souterraine est supérieure à celle qui se trouve en surface (**Imtiaz et al., 2016**).
- Il est aussi le témoin de notre histoire (fouilles archéologiques)
- (**Vodyanitskii, 2016**).
- Le sol est une ressource limitée (**l'administration de l'environnement et de l'énergie., 2020**).

### 1.1. Sol et microorganismes

Le sol héberge une très forte diversité d'organismes vivants, notamment les microorganismes, (**Imtiaz et al., 2016**), notamment les eucaryotes (champignons, algues et protozoaires) et les procaryotes (bactéries et cyanobactéries).

Leur biodiversité est considérable ainsi que leur distribution qui est en fonction non seulement de la présence de substrats énergétiques (essentiellement des résidus végétaux) et d'éléments minéraux, mais aussi de nombreux facteurs physiques et chimiques caractérisant chaque sol, notamment la structure, l'aération, le pH, la température et la teneur en eau (**Ghoreishi et al., 2017**).

Les microorganismes du sol assurent des fonctions clés dans la circulation du flux d'énergie et de la matière dans l'environnement comme la biodégradation de la matière organique, la production de nutriments pour les plantes, la fixation de l'azote, la biodégradation des polluants, etc. (**Hien et al., 2010**).

En outre, il a été démontré que la structure du sol est non seulement influencée par les constituants minéraux du sol mais aussi par la présence de micro-organismes qui favorisent la formation d'agrégats et de pores (**Chesnokova et al., 2016**).

### 1.2. Bactérie du sol

Le sol est considéré comme l'un des environnements les plus complexes de la biosphère et à ce titre, il est un réservoir majeur de la diversité microbienne, il abrite une variété d'espèces bactérienne de forte densité de l'ordre de 10 000 à 100 000 espèces bactériennes par gramme de sol (**Akbar et Sultan., 2016**).

#### 1.2.1. Les Rhizobactéries Promotrices de la Croissance des Plantes

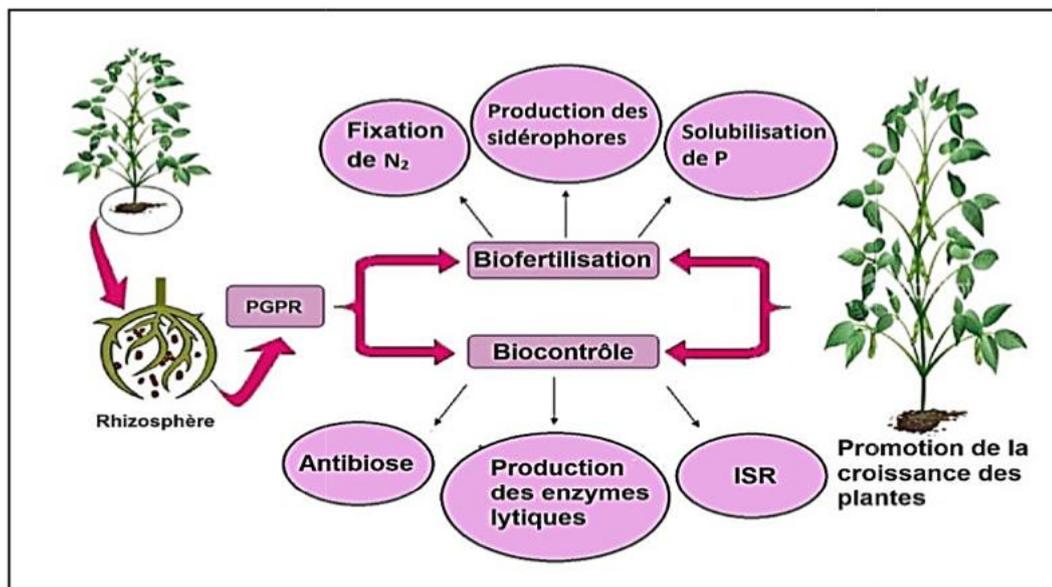
Les rhizobactéries Promotrices de la croissance des plantes sont communément connues sous le terme PGPR ; de l'anglais : *Plant Growth Promoting Rhizobacteria*. Ce groupe désigne l'ensemble des bactéries ayant un effet bénéfique sur la croissance et le développement des plantes (**Ramjagathesh., 2013**).

Le terme PGPR a été proposé pour la première fois par, Kloepper, en 1980. Ce dernier a utilisé des *Pseudomonas* fluorescents comme stimulateurs de croissance

capables de résister aux phytopathogènes. Ce terme s'est métamorphosé pour inclure toute rhizobactérie capable d'améliorer la croissance végétale. Parmi les rôles majeurs attribués à l'action des PGPR, la protection contre les pathogènes, l'augmentation l'absorption des nutriments, l'amélioration des fonctions racinaires, de la germination et de la production des graines sont les plus notables (Amir *et al.*, 2005 ; Kenneth *et al.*, 2019).

### 1.2.2. Mécanismes d'action des PGPR

Au-delà de leur capacité à améliorer la croissance des plantes dans des conditions non stressées, les PGPR sont capables d'établir des interactions symbiotiques et non symbiotiques avec des plantes dans des conditions de stress, participant à la bioremédiation des sols, à la réduction du stress et à la restauration de la croissance des plantes. De plus, leur capacité à fixer l'azote, à solubiliser les formes insolubles de nutriments et à produire d'autres métabolites tels que les sidérophores, les phytohormones, les antibiotiques et les enzymes hydrolytiques en font des alternatives écologiques pour éviter l'utilisation excessive de produits chimiques inappropriés et rentables en agriculture ( Rai *et al.*, 2018 ; Mazumdar *et al.*, 2019).



**Figure 5.** Promotion de la croissance des plantes par les PGPR (Cherif., 2014).

### 2. La pollution du sol

La pollution du sol est indiquée par des concentrations élevées de composés chimiques potentiellement dangereux (métaux lourds, hydrocarbures, solvants halogénés, etc.) pour l'environnement et la santé des êtres vivants (**Huamain et al., 1999**).

Les événements climatiques tels que les crues, les tornades fréquentes, les tempêtes et les vents de haute vitesse, les pluies de forte intensité, et la sécheresse sont parmi les causes naturelles de dégradation de la qualité des sols (**Fernández et al., 2018**).

L'origine anthropique de la dégradation du sol est due la plupart du temps aux diverses activités humaines (de l'agriculture aux industries) qui appauvrissent les sols en matières organiques, en éléments minéraux et en microorganismes, les transformant en sols pollués (**Qi et al., 2015**). A titre d'exemples, quelques sources anthropiques de la dégradation des sols :

- La déforestation et les incendies de forêts qui engendrent une perte de la couverture végétale et accélèrent l'érosion du sol (**Wenyou et al., 2018**)
- La sur-urbanisation de sols à vocation agricole : les surfaces bétonnées qui couvrent le sol empêchent l'eau de pénétrer dans la terre et sans eau, aucune vie ne peut se développer (**Shixue et al., 2018**)
- Les émissions intenses des rejets toxiques et polluants riches en métaux lourds par les industries et par la circulation automobile (**Pengyan et al., 2018**).
- Le dépôt et l'accumulation des boues de station d'épuration, des déchets industriels et ménagers sur les sols sous forme de décharges autorisées ou sauvages (**Pengyan et al., 2018**).

Un sol pollué présentant un risque pour la santé humaine, en effet de nombreuses substances chimiques (dont les métaux lourds) mesurées dans des sols pollués sont connues pour générer des effets gravissimes sur la santé. La contamination se fait alors soit par voie digestive (consommation d'eau polluée ou plantes et animaux contaminés), ou par voie respiratoire (inhalation de poussières des sols pollués rejetées dans l'atmosphère). Ces effets peuvent provoquer divers troubles, notamment neurologiques aigus et chroniques, hépato- rénaux, cardio-respiratoires, digestifs et cancérogènes, etc. (**Jun et al., 2018**).

### 3- Métaux lourds

On appelle en générale métaux lourds « Heavy métal » les éléments métalliques naturels, de densité supérieure à 5 g/cm<sup>3</sup> et tout métal ayant un numéro atomique élevé, en général supérieur à celui du sodium (z=11). Ils sont présents dans tous les compartiments, mais en général en quantités très faibles sous forme des traces (Fourest, 1993).

Figure 6: Classification périodique des éléments. (Fourest E, 1993).

Tableau périodique des éléments

Électronégativité (Pauling)  
Masse atomique

© 2016, Clovis Darrigan - Anima-Science / www.darrigan.net - www.anima-science.fr

#### 3.1. Les sources des ETM

Les métaux lourds sont toxiques à cause de leur : (Christophe M, 2020).

1 Non-dégradable et donc leur persistance dans les milieux.

2 Leur toxicité à faible concentration.

3 Leur tendance à s'accumuler dans les organismes vivants et à se concentrer le long des chaînes trophiques

##### 3.1.1. Les sources naturelles

Parmi les importantes sources naturelles, citons l'activité volcanique, l'altération des continents et les incendies de forêts. La contribution des volcans peut se présenter sous forme d'émissions volumineuses dues à une activité explosive, ou d'émissions continues de faible volume, résultant notamment de l'activité géothermique et du dégazage du magma

Le (tableau.5) montre le rapport entre le flux lié à l'activité humaine et le flux naturel (Gouzi et Ducos, 2008).

**Tableau 5:**Rapport du flux lié à l'activité humaine et le flux naturel des métaux lourds (Gouzi et Ducos., 2008).

Élément	Flux lié à l'homme / Flux naturel (%)
Cadmium	1,897
Mercur	27, 500
Chrome	1,610
Arsenic	2, 786
Plomb	34, 583

### 3.1.2. Les sources anthropiques :

Les métaux provenant d'apports anthropiques sont présents sous des formes chimiques assez réactives et entraînent de ce fait, des risques très supérieurs aux métaux d'origine naturelle qui sont le plus souvent immobilisés sous des formes relativement inertes augmentes (Mench et al., 2004).

Les sources anthropogènes sont les suivantes :

- 1 Activités pétrochimiques.
- 2 Utilisation de combustibles fossiles (centrales électriques au charbon, chaudières industrielles, fours à ciment...).
- 3 Transport (véhicules et moteurs routiers et non routiers, embarcations).
- 4 Incinération de déchets.
- 5 Produits (interrupteurs électriques, amalgames dentaires, éclairages fluorescents).
- 6 Déchets urbains (eaux usées, boues d'épuration, ordures ménagères), agricoles.

**Tableau 6 :** Sources industrielles et agricoles des métaux présents dans l'environnement (Okoye., et al 1 991).

Utilisations	Métaux
Batteries et autres appareils électriques	Cd, Hg, Pb, Zn, Mn, Ni,
Pigments et peintures	Ti, Cd, Hg, Pb, Zn, Mn, Sn, Cr, Al, As, Cu, Fe
Alliages et soudures	Cd, As, Pb, Zn, Mn, Sn, Ni, Cu
Biocides (pesticides, herbicides)	As, Hg, Pb, Cu, Sn, Zn, Mn
Agents de catalyse	Ni, Hg, Pb, Cu, Sn
Verre	As, Sn, Mn
Engrais	Cd, Hg, Pb, Al, As, Cr, Cu, Mn, Ni, Zn
Matières plastiques	Cd, Sn, Pb
Produits dentaires et cosmétiques	Sn, Hg
Textiles	Cr, Fe, Al
Raffineries	Ni, V, Pb, Fe, Mn, Zn
Carburants	Ni, Hg, Cu, Fe, Mn, Pb, Cd

### 3.2. Le Plomb

#### 3.2.1. La pollution par le plomb

Le plomb est présent naturellement dans l'environnement. Cependant, la plupart des concentrations en plomb que l'on trouve dans l'environnement sont le résultat des activités humaines (Okoye et al 1 991).

Généralement, les carburants représentent la source principale d'émission du plomb dans l'environnement. Mais, il existe d'autres ressources d'émissions telles que les procédés industriels et la combustion des déchets solides. L'exposition à long duré à des niveaux du plomb relativement bas ou l'exposition à court duré à des niveaux élevés peuvent affecter gravement la santé humaine (Zoller, 1984).

#### 3.2. 2. Les sources du plomb

Le plomb est un métal bleu grisâtre, il se trouve principalement dans les gisements primaires dans les roches éruptives et métamorphiques où il est présent essentiellement sous forme de sulfure (galène) (GESAMP, 1988). Il est redistribué via l'altération dans toutes les roches sous forme de carbonate (cérusite), de sulfate (anglésite) et peut se substituer au potassium dans les roches silicatées et les phosphates. Il s'agit cependant d'un métal dont les composés sont très peu hydrosolubles et de faible mobilité géochimique .

### 3.2. 3. Le plomb dans le sol

Dans les sols, la présence de plomb est naturelle (les teneurs naturelles des sols en plomb sont en moyenne de  $32 \text{ mg.kg}^{-1}$  (**Jaishankar et al., 2014**). Elle résulte également des retombées atmosphériques et des rejets industriels tels que les fonderies et la pétrochimie. Le plomb est lié aux phases solides du sol par adsorption, précipitation, formation de complexes ioniques ou chélates. Le plomb présente une forte réactivité vis à vis des oxydes de fer et de manganèse mais également vis à vis des phosphates et la matière organique. (Guha et al., 2017). La mobilité du plomb dans le sol est très faible, il a ainsi tendance à s'accumuler dans les horizons de surface et plus.

Précisément dans les horizons riches en matière organique et de surface et plus précisément dans les horizons riches en matière organique et spécialement pour des sols ayant au moins 5.

% de matière organique et un pH supérieur à 5 La formation de sulfure de plomb. (**Christophe., 2020**). Forme très insoluble, explique également l'accumulation du plomb en surface des sols. Les facteurs affectant la mobilité et la biodisponibilité du plomb dans les sols sont donc Le pH, en effet à pH acide ou neutre, les ions  $\text{Pb}^{2+}$  et  $\text{Pb}(\text{OH})^+$  prédominent dans la solution du sol ; quand le pH augmente, ces formes sont remplacées par  $\text{Pb}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Pb}(\text{OH})^{-3}$  et  $\text{Pb}(\text{OH})_4^{-2}$ .

### 3.2. 4. L'effet du plomb sur la plante

Le plomb peut causer des effets graves sur la sensation des métaux. L'accumulation du plomb peut réduire la concentration de chlorophylle, le fer, l'activité de la réaction de Hill, l'activité des catalases, tandis qu'augmente la concentration des produits phosphorés, l'activité des peroxydases, la phosphatase acide et les ribonucléases dans les feuilles du radis (**Gopal et Reizvi., 2008**). Un sommaire des changements physiologiques dans la réponse au Pb sont présentés selon (**Sharma et Dubey., 2005**).

\_ Absorption des nutriments : Altération dans l'absorption des cations ( $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $2+$   $2+$   $3+$  - Mn, Zn, Cu, Fe) et des anions ( $\text{NO}_3$ ) Régimes de l'eau :

-Diminution dans les composés maintenant la turgescence et la paroi cellulaire, le volume de cellules de garde, l'ouverture des stomates, le niveau de l'acide abscissique et la surface des feuilles.

\_ La photosynthèse des chloroplastes : Altération de la composition des lipides des membranes des thylakoïdes. •Diminution dans la synthèse de chlorophylle, Plast quinone, caroténoïdes, activité .

de l’NADP oxydoréductase, le transport des électrons et l’activité des enzymes de cycle de Calvin.

\_ Irrégularités des Mitotiques nucléaire : Augmentation dans les formes irrégulières, décomposition du matériel nucléaire, propriété collante des chromosomes, les ponts d’anaphase, c- mitose et la formation des micronucléus.

\_ La respiration des mitochondries : Diminution dans le transport des électrons, des protons et l’activité enzymatique du cycle de Krebs.

### **3.3. Le cadmium**

#### **3.3.1. Définition**

Le cadmium est un métal blanc argenté appartenant à la famille des métaux de transition, avec un numéro atomique de 48 et une masse atomique de 112,4 g/mol. Il n'est pas essentiel au développement des organismes animaux ou végétaux. En revanche, ses propriétés physiques et chimiques, proches de celles du zinc et du calcium, lui permettent de traverser les barrières biologiques et de s'accumuler dans les tissus (**Zorrig., 2010**).

#### **3.3.2 .Les sources du cadmium**

Le Cd est un métal lourd d’origine naturelle présent à des concentrations plus élevées en association avec les sols riches en Cd, y compris les schistes, les sédiments lacustres et les phosphorites. Cependant, plus de 90% du Cd dans l’environnement de surface est le résultat de l’industrie et de l’agriculture. Il est considéré comme un des éléments les plus toxiques dans l'environnement, avec un large éventail de toxicité d'organe et une longue demi-vie d'élimination (**Lane et al., 2015**).

#### **3.3.3. Formes du cadmium dans le sol**

En l’absence de ligands organiques les principales formes du cadmium présentes dans la solution du sol sont  $Cd^{2+}$ ,  $CdSO_4$ ,  $CdCO_3$ ,  $Cd Cl^+$  et  $CdHCO_3^+$  (**Sposito., 1989**). Cependant,  $Cd^{2+}$  peut former des complexes avec les principaux acides organiques

carboxyliques (acide citrique, oxalique, malique) susceptibles de se trouver dans les zones superficielles des sols cultivés. Ces associations modifient son comportement aux interfaces et peuvent faciliter, dans certaines conditions son entraînement avec la phase liquide. Dans les sols calcaires, la faible solubilité du carbonate de cadmium ( $\text{CdCO}_3$ ) limite fortement la concentration de l'ion libre ( $\text{Cd}^{2+}$ ) en solution du sol.

### 3.3.4. L'effet du cadmium sur la plante

Chez les plantes, le cadmium n'a aucune fonction biologique connue (**Pokorny et al., 2004**), et il est toxique à de faibles concentrations (**De la Rosa et al., 2004**). Les symptômes présente une plante cultivée en présence de cadmium sont l'inhibition de la croissance, la diminution de sa biomasse, la chlorose, la nécrose, la perturbation des flux d'eau, la déficience en phosphore et en azote, l'accélération de la sénescence L'apparition du retard dans le développement des jeunes pousses et des perturbations de la photosynthèse (**Cosio et al., 2005 ; Clemens., 2006**).

Le cadmium semble interférer avec la voie stéroïde ogénique ovarienne. De faibles concentrations de cadmium stimuleraient la biosynthèse ovarienne de progestérone alors que des concentrations élevées la bloqueraient (**Henson et Chedrese., 2004**). Plusieurs études ont montré une forte relation entre l'intoxication par le cadmium et des dommages osseux. Le cadmium est impliqué dans les occurrences de la maladie d'Itai-Itai qui présente comme symptômes la diminution de la minéralisation des os, des taux élevés d'ostéoporose et de douleurs osseuses (**Kazantzis., 1979**).

### 3.4. Spéciation, mobilité et biodisponibilité des ETM dans le sol

La teneur en élément métallique dans un sol ne peut être une indication suffisante pour évaluer sa mobilité, sa biodisponibilité et sa toxicité pour les organismes vivants (microorganismes, plantes, animaux, hommes) (**He et al., 2009a**). Plus que sa teneur, c'est la forme sous laquelle se trouve l'élément, i.e. la *spéciation*, qui est déterminante : en solution, sous forme ionique ou des complexes, colloïdale, ou sous forme solide, lié à des phases minérales et/ou organiques (**Singh et Kalamdhad., 2012**)

La spéciation peut être définie comme la distribution d'un élément donné ou d'un composé au sein de différentes formes (ou espèces) chimiques qui dans l'ensemble représentent la teneur totale de l'élément (**Cai et al., 2007**). Ces espèces sont différenciées

selon leur composition isotopique, leur structure électronique, leur état d'oxydation, et/ou leur structure moléculaire.

La forme chimique des métaux affecte leur biodisponibilité et leur capacité de transfert vers les écosystèmes, par exemple les métaux dissous sont plus disponibles pour les plantes et les organismes que les métaux fortement liés à des structures cristallines hormis dans le cas d'une altération du minéral (**Monterroso et al., 2013**).

Différents facteurs contrôlent la spéciation : le pH, la teneur en matière organique et sa nature, les teneurs en argile, en anions et cations, en oxydes de Fe, d'Al et de Mn, le potentiel rédox, la présence d'agents complexant (**Wu et al., 2010 ; Van den Brink et al., 2010 ; Zeng et al., 2011**). Ainsi, dans les sols acides en conditions oxydantes, les métaux sont plus mobiles et biodisponibles que dans les sols peu aérés, neutres ou alcalins (**Kabata-Pendias., 2004**).

Les éléments métalliques dans la phase liquide, en solution du sol, sont considérés comme les plus mobiles, biodisponibles et toxiques. La mobilité d'un élément est caractérisée par son aptitude à passer dans les compartiments du sol où il est de moins en moins énergiquement retenu, la phase liquide du sol représentant le compartiment ultime (**Juste.,1988 ; Liu et al., 2013**). Elle peut être étudiée au travers du changement de phase porteuse d'un élément (**Mcbride., 1994**). A l'échelle d'un solum, la mobilité d'un élément peut être évaluée en étudiant sa distribution verticale ou latérale.

L'élément métallique dans la solution du sol est considéré comme étant potentiellement disponible pour être prélevé par un organisme vivant donné (plante, microorganisme, etc.), autrement dit biodisponible (Juste *et al.*, 1995). La biodisponibilité est l'aptitude d'un élément à être transféré d'un compartiment quelconque du sol vers un organisme vivant (bactérie, végétal, mésofaune...) (**Juste., 1988**).

Selon (**Peijnenburg et al., 2007**), la biodisponibilité est un des outils permettant d'évaluer à la fois le danger et le risque d'une contamination. La phytodisponibilité peut être définie comme la quantité d'un métal donné susceptible d'être transférée dans la plante durant son développement. La quantité phytodisponible d'un élément dans un sol correspond aux ions capables de passer en solution et d'être absorbés par la plante. Trois processus successifs caractérisent la phytodisponibilité. Le premier, est le passage des éléments de la phase solide vers la solution du sol. Le deuxième processus concerne le

transport de l'élément par diffusion et/ou advection vers les surfaces racinaires. Enfin, le dernier processus consiste en l'absorption du métal par les cellules racinaires puis, en son transport et sa distribution à l'intérieur du végétal (**Morel., 1997 ; Clemens et al., 2002**). De manière simplifiée, la quantité totale d'un élément dans le sol peut être répartie en quatre pools. Les deux premiers correspondent aux ions qui sont immédiatement disponibles pour la plante. Il s'agit d'une part, des ions solubles présents dans la solution du sol et d'autre part, des ions faiblement adsorbés sur la phase solide du sol et échangeables avec la solution du sol. Le troisième pool rassemble les ions fortement liés à la phase solide, mais accessibles pour les racines des plantes du fait de leur passage dans la solution du sol pendant la période de croissance de la plante. La proportion de ce pool, appelé fraction phytodisponible, fluctue donc au cours du temps. Le dernier pool est constitué d'ions peu mobiles, supposés non disponibles pour la plante lors de sa croissance (**Morel., 1997**).

# Chapitre 03

## La Bioremédiation

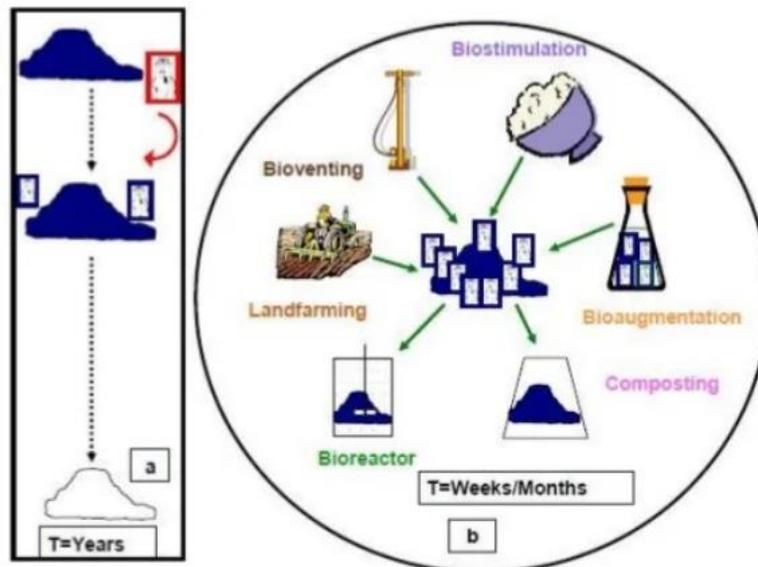
### Chapitre III. La Bioremédiation

Les métaux lourds, les hydrocarbures, les effluents industriels, les xénobiotiques, sont parmi les contaminants qui ont augmenté dans le sol, et l'environnement en raison de l'industrialisation rapide et de la croissance démographique (Mishra *et al.*, 2021 ; Sharma *et al.*, 2021a & 2021b ; Tripathi *et al.*, 2021a). Ces substances toxiques nuisent à la santé humaine, aux plantes ainsi qu'à l'écosystème (Malla *et al.*, 2018 ; Sharma *et al.*, 2021c, 2021d ; Sharma et Kumar, 2021b). La qualité totale de l'environnement est étroitement liée à la qualité de la vie sur Terre. La Terre a été contaminée par de nombreuses substances nocives provenant de différentes sources au fur et à mesure que l'activité humaine a augmenté dans le monde entier (Raghunandan *et al.*, 2018 ; Sharma *et al.*, 2020 ; Sharma *et al.*, 2021e). En raison de la révolution industrielle de la pollution et des émissions de carbone ont augmenté, et d'autres difficultés liées à la santé sont apparues (Ahuti., 2015). L'industrialisation influence les transformations économiques et sociales des cultures humaines en plus des avancées hi-tech (Mgbemene *et al.*, 2016). La contamination de l'environnement est un problème persistant qui continue d'être toxique pour les humains (Sharma *et al.*, 2022a). Bien que de nombreuses méthodes aient été utilisées pour mieux comprendre et minimiser ce problème, celui-ci est resté difficile à résoudre. Ces risques environnementaux ont des conséquences mondiales. Pour protéger la santé humaine et l'environnement contre la contamination environnementale, de nouvelles méthodes doivent être développées. Comme de plus en plus de personnes se sont tournées vers la recherche de solutions à long terme pour les écosystèmes endommagés, elles se sont également intéressées à l'utilisation de la biorémédiation à base microbienne pour éliminer les toxines de l'environnement (Kumar *et al.*, 2016). Des sites pollués par le pétrole, séparés dans le monde et dans l'espace, révèlent une importante hétérogénéité taxonomique et fonctionnelle dans les réponses microbiennes aux environnements contaminés par les hydrocarbures (Mukherjee *et al.*, 2017).

#### 1. Définition de la bioremédiation

Le terme de bioremédiation est composé de "Bios " qui signifie la vie et se réfère aux organismes vivants et remédier qui signifie résoudre un problème (Batak., 2013). C'est un ensemble de techniques qui utilisent les capacités enzymatiques des microorganismes (bactéries, algues, champignons) pour dégrader les polluants organiques. Ces organismes peuvent être déjà présents dans la zone polluée (indigènes) ou ajoutés au

milieu (exogène), ou encore être prélevés sur le site contaminé, cultivées au laboratoire puis réintroduits dans le sol. La bioremédiation se déroule généralement en condition d'aérobie, cependant l'application des systèmes de bioremédiation en condition d'anaérobie permet de dégrader un certain nombre de molécules récalcitrantes (Abdelly., 2006 ; Fokou Mbogne., 2017).



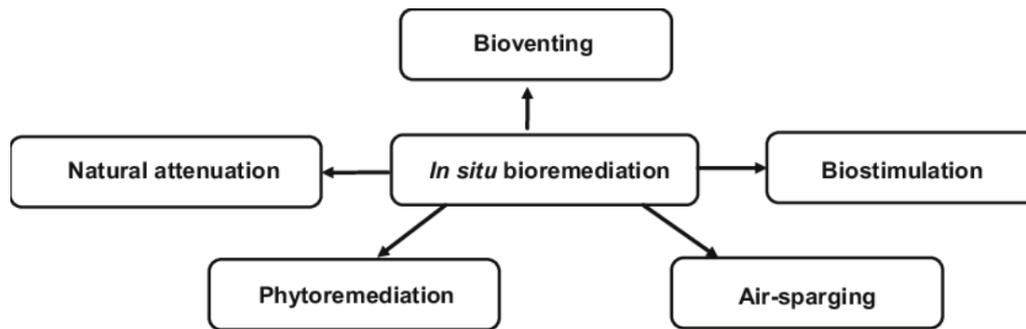
**Figure 7:** (a) bioremédiation naturelle et (b) bioremédiation assistée par l'homme (Malik., 2006).

## 2. Les techniques de la bioremédiation

La bioremédiation se déroule généralement en conditions d'aérobie, cependant l'application de systèmes de bioremédiation en conditions d'anaérobie permet la dégradation d'un certain nombre de molécules récalcitrantes (Charissou et Lejeune., 2009).

### 2.1. Bioremédiation *in situ*

La bioremédiation est une option intéressante, il s'agit de traitements biologiques directement appliqués sur le site à dépolluer (Hannachi., 2004). Ces traitements ont l'avantage de ne pas nécessiter d'excavation et de permettre une dépollution par les microorganismes (Banerjee et al., 2016).



**Figure8:** Bioremediation in situ (Bocard., 2006).

### 2.1.1. Bioremédiation intrinsèque

Alternativement appelée bioremédiation passive ou atténuation naturelle, la bioremédiation intrinsèque est un processus de dégradation naturelle qui ne dépend que du métabolisme des microorganismes natifs, pour détruire les contaminants dangereux, en n'utilisant aucune étape artificielle pour améliorer l'activité de biodégradation (Kumar et al., 2018).

### 2.1.2. Bioventing

Le bioventing implique une stimulation contrôlée du flux d'air, fournissant de l'oxygène pour augmenter l'activité microbienne, et par conséquent améliorer la biorestoration (Brown et al., 2017).

### 2.1.3. Biosparging

Dans le biosparging, l'air est introduit dans le sol pour favoriser la capacité de dégradation des microorganismes. Contrairement au bioventing, l'air est introduit à l'intérieur de la zone saturée, provoquant le mouvement ascendant des polluants volatils

L'efficacité du biosparging dépend de la perméabilité du sol, qui détermine la disponibilité des polluants pour les microorganismes ainsi pour la biodégradabilité des polluants (Godheja et al., 2019).

### 2.1.4. Bio augmentation

La bio augmentation est une technique consiste à l'ajout de cultures de microorganismes à la surface du milieu contaminé pour augmenter la biodégradation des contaminants organiques. Elle est largement utilisée pour décontaminer les sites pollués par des hydrocarbures.

La bio augmentation est principalement efficace dans les sites où les concentrations des polluants sont très élevées (**Lyoun et al., 2001**).

### 2.1.5 Bio stimulation

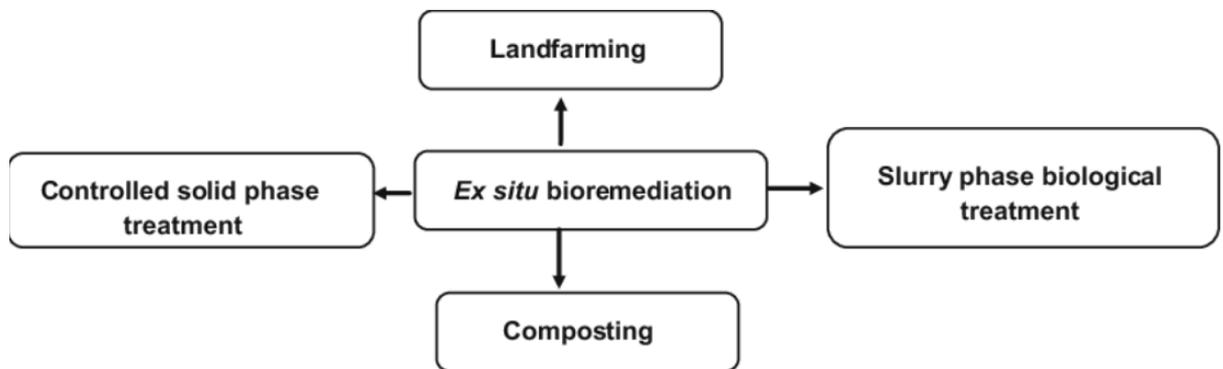
La bio stimulation est une technique d'assainissement très efficace, rentable et écologique (**Tribadai et al., 2018**). Le principe de cette technique consiste à stimuler le site pour le développement des microorganismes indigènes en optimisant les conditions de l'aération, l'ajout de nutriments (phosphore, azote), le pH et contrôler la température (**Endeshaw et al., 2017**).

**Tableau 7** : quelques travaux de recherche sur la biostimulation (**Tribadai et al., 2018**).

Auteurs	Intitulés	Résultats
Sari et al. (2011)	Amélioration de la bioremédiation du sol diesel carburant –diesel – fuel –contaminated dans un climat boréal comparaison de biostimulation et de bioaugmentation.	La biostimulation par l'intermédiaire de l'optimisation de l'azote et de fourniture d'oxygène a amélioré de manière significative la bioremédiation du sol polluée par une dégradation rapide des hydrocarbures.
Rafik et al. (2013)	Effect of nutrient source on indigenous biodegradation of diesel fuel contaminated soil.	Cette étude montre l'efficacité de l'addition des aliments (azote et le phosphore) sur le déplacement de TPH. Amélioration de processus de biodégradation à un pourcentage de 30%.
Kahil et Issad (2014)	Essai de réhabilitation d'un sol polluée aux hydrocarbures par biostimulation.	Une diminution significatif de la quantité d'hydrocarbures contenus dans le sol traité par l'azote et le phosphore ce qui signifie que les populations bactérienne sont aptes à dégrader les polluants.
Boukherchoufa et Bouzid (2014)	Etude de l'effet de l'apport d'azote et de phosphore dans deux sols de textures différentes argilo-limoneux (Alger), sableux (Hassi Messaoud) contaminés par les hydrocarbures.	Accélération de la dégradation des hydrocarbures dans les deux sols considérés par l'amélioration de la capacité des micro-organismes autochtones.

### 2. 2. Bioremédiation ex situ

Les techniques *ex situ* permettent un meilleur contrôle des conditions environnementales, conduisant à une augmentation du taux de biodégradation par rapport aux techniques de traitement *in situ*. De plus, grâce à la possibilité d'homogénéisation du sol pollué, l'opération est généralement plus uniforme et prend moins de temps. Cependant, ces techniques sont plus coûteuses en raison de l'excavation, de l'assainissement du site et du traitement. De plus, l'excavation du sol entraîne une augmentation de la mobilité des polluants et de leur exposition (Azubuiké *et al.*, 2018).



**Figure9** : Bioremédiation ex situ (Bocard., 2006).

#### 2.2.1. Bioréacteurs à boues

Le terme " bioréacteur " fait référence à tout équipement ou installation manufacturée qui prend en charge un système. Les bioréacteurs à boues sont utilisés pour traiter les polluants d'hydrocarbures en toute sécurité et facilement. Les contaminants sont conservés dans un conteneur de confinement où, à l'aide de divers types de dispositifs pour mélanger les boues. Un mélange est obtenu consistant en un système triphasé solide, liquide et gazeux. Le biofilm formé stimule la biodégradation des polluants et augmente le niveau de biomasse (Salehi *et al.*, 2017).

#### 2.2.2. Biopiles de sol

La bioremédiation par les biopiles consiste en l'empilement de sols contaminés et l'aération pour favoriser la biodégradation principalement en améliorant l'activité microbienne. Les éléments de technologie sont l'arrosage, l'aération et la lixiviation. Son utilisation est de plus en plus prise en compte grâce à ses caractéristiques de construction et

au rapport coût bénéfice favorable qui permettent une bioremédiation efficace, à condition qu'un contrôle adéquat des nutriments, de la température et de l'aération soit assuré (Whelan,et *al.*, 2015).

### 2.2.3. Compostage

Le compostage est un processus contrôlé de dégradation des constituants organiques d'origine végétale et/ou animale par une succession de communautés microbiennes évoluant .

En conditions aérobiques, entraînant une montée en température. Et conduisent à l'élaboration d'une matière organique humifiée et stabilisée (Francou., 2004).

### 2.2.4. Landfarming

Le landfarming est l'un des technologies de bioremediation les plus élémentaires en raison de son faible coût et le faible encombrement. Le landfarming peut être classé comme technologie *ex situ* ou *in situ* selon l'endroit où le traitement a lieu. Il existe certaines limitations et inconvénients liés à cette technique, tels que la nécessité d'un grand espace de travail, la limitation de l'activité microbienne en raison d'un environnement défavorable, le coût d'excavation supplémentaire et la faible efficacité dans l'élimination des polluants inorganiques. L'un des principaux inconvénients de la mise en décharge sont la libération de composés organiques volatils dans l'environnement (Ortega et *al.*, 2018).

**Tableau 8** : différentes techniques de bioremediation (Ademe., 2006).

Technique	Principe
Biolixiviation	Solubilisation et entraînement dans la phase aqueuse par les micro-organismes de polluants fixés ou piégés dans le sol.
Bioréacteur	Création d'une boue épaisse en mettant la partie fine du sol dans l'eau et ajout de nutriment pour stimuler la croissance de la population.
Bioaugmentation	Introduction dans le sol des micro-organismes exogènes adaptés aux polluants à traiter.
Bioventing	Injection d'O <sub>2</sub> dans la zone non saturée pour stimuler la microflore et la biodégradation des polluants.
Biosparging	Injection d'air, d'O <sub>2</sub> ou de nutriments (N, P) dans la zone saturée pour entraîner l'activité des micro-organismes indigènes.
Biopile	Regroupement des sols excavés en tas de terre qui sont traités sur site ou hors site par divers voies (compostage, biocentre).
Compostage	Procédé d'aération stimulant la flore aérobie optimisé par l'apport d'agents structurants (copeaux de bois, paille, fumier) et de population fongiques dégradant les xénobiotiques.

# **Partie 02**

## **Partie expérimentale**

# **Chapitre 01**

## **Matériel et méthodes**

### 1. L'isolement des bactéries de la rhizosphère de *Peganum harmala*

#### 1.1. Description de la plante

*Peganum harmala*, est une Plante herbacée vivace, à tiges ordinairement peu rameuses, de 30 à 90 cm de haut, à entrenœuds assez courts, densément feuilles. Les feuilles sont allongées et irrégulièrement divisées en multiples lanières très fines pouvant atteindre 5x5 cm. Les feuilles supérieures ne dépassent pas 1,5 mm de largeur. (Maire., 1943; Chopra et al., 1960; Ozanda., 1991).



**Figure 10.** *Peganum harmala* (Allouche A et Allouche A., 2022).

### 1.2. Position systématique

Bien qu'il appartienne à la famille des Zygophyllaceae mais sa position taxonomique est encore discutable et on a proposé une famille séparée Nitrariaceae pour ce genre (Shehan *et al.*, 1996).

Embranchement : Spermatophyte

Sous embranchement : Angiospermes

Classe : Dicotylédones

Sous classe : Rosidae

Ordre : Sapindales

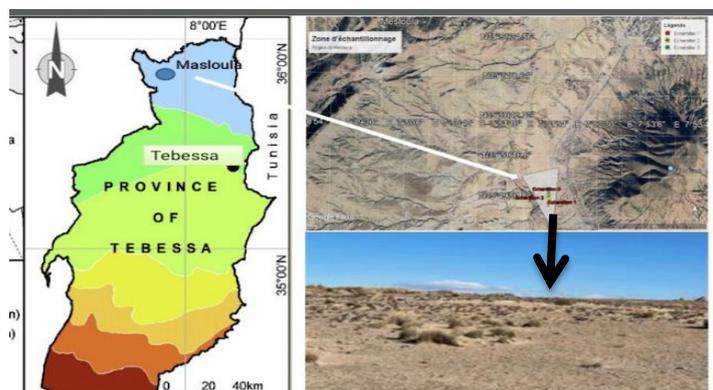
Famille : Zygophyllaceae

Genre : Peganum

Espèce : Peganum harmala L (Ozenda., 1991)

### 1.3. Présentation de la zone de prélèvement

Les échantillons ont été prélevés à partir de la région Missoula de la wilaya de Tébessa. Cette région a été choisie sur la base de leurs pollution par les métaux lourds. Chaque environnement représenté par la région (sol) et sa culture (plante) a été considéré comme un biotope.



**Figure 11.** Carte de situation des sites de prélèvement des échantillons

(Dr Dekak., 2022).

### 1.4. Prélèvement des échantillons du sol et des racines

Dans le but d'échantillonnage et l'obtention de souches des rhizobactéries (*Peganum harmala*), la technique de prélèvement consiste à enfoncer une spatule stérile dans le sol à une profondeur de 10 à 20 cm à proximité des racines végétal. Les échantillons sont prélevés aseptiquement et conserver au laboratoire à 4C° en vue de leurs analyses.



**Figure 12.** Prélèvements des échantillons du sol de la rhizosphère et des racines.

(Allouche A et Allouche A., 2022).

## 2. Préparation des milieux et mise en culture

### 2.1. Analyse microbiologique

La recherche de la flore bactérienne a une grande importance pour comprendre la richesse ou la pauvreté des sols; dans cette étude on s'intéresse à la recherche des rhizobactéries afin d'évaluer les aspects biotechnologiques de ces dernières notamment l'acquisition des ressource, la production des phytohormones et des substances antimicrobiennes d'une part, identifier ces microbes et évaluer leurs capacités de stimuler la croissance des plantes d'autre part.

Les classes des germes recherchés sont choisies dans les limites des moyens disponibles (milieux de culture).

#### 2.1.1. La purification des bactéries

A l'aide d'une micropipette de 1000  $\mu\text{L}$ , une série de dilutions ( $10^{-1}$  à  $10^{-4}$ ) a été préparée pour chaque échantillon en prélevant 1 g du sol et le plaçant dans 9 ml d'eau distillée stérile dans un tube à essai stérile pour obtenir une dilution  $10^{-1}$ , puis on répète la

## Chapitre 01 matériel et méthodes

---

même opération en ajoutant 9 ml d'eau distillée à 1 ml de chaque dilution jusqu'à l'obtention de la dilution  $10^{-4}$ .

Les racines sont lavées avec du  $HgCl_2$  et avec de l'eau distillée stérile dix fois pour assurer l'élimination des bactéries de la rhizosphère. Nous prenons une section longitudinale de la racine et la plaçons au milieu de culture.



**Figure 13** : les séries de dilutions (Allouche A et Allouche A., 2022).

### 2.1.2. Isolement des souches pures

On a opté à travailler avec le gélose nutritif,ensemencé à la surface par 100 $\mu$ l pour chaque dilution ont été prélevés puis étalés sur le milieu GN solide. dans des boites a pétri stériles qui ont été incubées à 30 °C pendant 72 h.

**Tableau 9 :** Composition du milieu d'ensemencement

<b>Ingrédient du milieu nutritif.....</b>	<b>g/l</b>
Peptone.....	20
Potassium sulfate.....	10
Magnésium chloride.....	1.4
Agar-agar.....	15
	pH 7.2±0.2

### **2.1.3. Aspect macroscopique**

Le caractère macroscopique des colonies est observé sur GN. Les cultures sont incubées à une température de 30°C pendant 72h.

La présence des colonies séparées sur la gélose permet d'observer la forme, l'aspect, le contour, la couleur, l'opacité, la consistance et le diamètre.

La purification consiste à réaliser des repiquages successifs sur gélose nutritif, avec une incubation à 30°C pendant 72h, jusqu'à l'obtention de colonies de même taille, même forme et même.

### **2.1.4. Stockage et préservation**

1 ml de chaque souche isolée sera conservé à - 80°C dans des flacons Eppendorf additionnés de glycérol pour des études ultérieures (longue durée) ; Le reste de l'inoculum sera stocké dans des tubes à essai stériles à - 4°C pour favoriser leur viabilité et limiter les risques de variations pendant les différents tests de notre étude (**Botton et al 1990**).

### **2.1.5. Évaluation de l'efficacité des microorganismes isolés comme de potentiels PGPR**

#### **2.1.5.1. Préparation des souches**

Les 22 isolats { 14 racines et 8 sols } potentiels de cultures pures des endophytes ont été choisis isolats pour subir les différents tests.

#### **2.1.5.2. Détermination des caractères biochimiques**

1- Production de phytohormone : AIA.

2- Test de solubilisation du phosphore.

3- Test de solubilisation du potassium .

4- Test de solubilisation du Fer.

5- La résistance aux métaux lourds : 17 isolats (13 racine et 4 sol)

### **2.1.5.3. Test de toxicité**

Nous divisons la boîte de pétri en 8 parties, chaque partie nous mettons un écouvillon sur sa surface, en utilisant une once de platine, chaque boîte de pétri contient du cadmium, soit du plomb, les boîtes ont été incubées à 28°C pendant 72 heures.

Le pouvoir des bactéries qui résistent à la toxicité est déterminé par la présence de la croissance des bactéries (colonie bactérienne).

Les résultats obtenus. (**Tableau 10**) font ressortir la résistance et la sensibilité des souches vis-à-vis des métaux lourds.

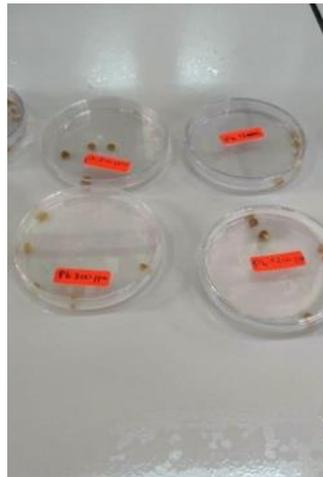
Tableau 10 : Test de toxicité (Allouche A et Allouche A., 2022).

E V	M.L.	Racines										sol														
		Concentra	PE1	PE1	PE1	PE1	PE2	PE2	PE2	PE2	PE3	PS1	PS2	PS2	PS3	PS3	PS3	PS3								
p.h.	pb	1	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+		
		4	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	
		5	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	
		8	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	
		1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	
		1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+
		2	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	-	+	+
		6	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
		8	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
		1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
		1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
		1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+
	2	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	
	3	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	
	1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	

### **.Test de la germination**

Parallèlement aux tests microbiologiques, un protocole visant à examiner l'effet de la contamination par les métaux lourds sur la germination des grains a été réalisé.

Ce test a été effectué au niveau de laboratoire sous différentes concentrations d'acétate de plomb et de cadmium ; elles ont été ensuite mises à germer dans des boîtes a pétri couvertes de papier filtre de nombre de 8 grains par boîte ; chaque essai de germination est conduit en trois 3 répétitions (R1, R2, R3) pour chaque concentration (12 ppm / 800 ppm). Nous avons ajouté 10 ml de solution contenant (0,1256 g) d'acétate de plomb et (0,00216 g) de cadmium ; les essais de germination sont effectués à des températures variant entre 10°C à 25°C . La germination est repérée par la sortie de la radicule des téguments de la graine dont la longueur est d'au moins de 2 mm (ISTA., 2003).



**Figure 15 :** Essai de germination (Allouche A et Allouche A., 2022).

### **3. Matériel végétal**

Le présent du travail a été réalisé au niveau du laboratoire de Biologie Végétale, Département des Etres Vivants, Université Larbi Tébessi, avec la collaboration d'Office Algérien Interprofessionnel des Céréales (OAIC) de Tébessa. Les principales caractéristiques de variété utilisée sont mentionnées.

**Tableau 11 : Les principales caractéristiques de variété Ain lahma (OAIC., 2022).**

Espèce	Variété	Origine	Caractéristiques Agronomiques :
<b>Blé dur</b> <i>Triticum durum</i>	<b>Aïn lahma</b>	Syrie	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Rendement : Élevé</li> <li>Caractéristiques technologiques :</li> <li>➤ PMG : Élevé</li> <li>➤ Teneur en protéines : 13.95%</li> <li>➤ Qualité semoulière : très bonne</li> <li>➤ Mitadinage : sensible</li> <li>Résistances aux maladies :</li> <li>➤ Oïdium feuille : Résistante</li> <li>➤ Oïdium Epi : Résistante</li> <li>➤ Rouille brune : Très sensible</li> <li>➤ Septoriose : Moyennement sensible</li> <li>Type de développement : Hiver</li> <li>➤ Graine : Forme Demi Allongée</li> <li>➤ Epi : Compacité Moyenne</li> <li>➤ Epi Forme en vue de profil : pyramidale</li> <li>➤ Epi : Couleur (à maturité) faiblement coloré</li> <li>➤ Barbes : Couleur noire</li> <li>➤ Barbes pigmentation anthocyanique : Nulle à très faible</li> <li>➤ Glume inférieur : Forme (Epillet au tiers moyen de l'épi) Allongée</li> <li>➤ Plante hauteur (tige, épi et barbe) : Court</li> <li>➤ Tige : pilosité du dernier nœud Nulle à très faible</li> <li>➤ Coléoptiles pigmentation anthocyanique : Nulle à très faible</li> <li>➤ Première feuille pigmentation anthocyanique : Nulle à très faible</li> <li>➤ Plante port au tallage : Mi-dressé Mi-étalé</li> <li>Résistante aux champignons</li> </ul>

#### 4. La stérilisation

- **stérilisation des graines**

Les graines débarrassées de leurs valves fructifères 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 de 10 minutes chacun et laissées sécher.

- **Stérilisation du matériel**

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; ensuite on met le sable et le terreau ensemble dans un cocote avec un peu d'eau et on le met sur le Feu pendant 45 minutes (Aoumeur., 2012).



**Figure 16.** Stérilisation du substrat (Allouche A et Allouche A., 2022).

36 pots ont été lavés avec l'eau du robinet puis, avec l'eau distillée; et stérilisés avec de l'éthanol et les mettons entre deux bec bunsen pour assurer leur stérilisation.



**Figure 17.** Stérilisation des pots (Allouche A et Allouche A., 2022).

### 5. 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.



**Figure 18.** Application de stress métallique (Allouche A et Allouche A., 2022).

## Chapitre 01 matériel et méthodes

---

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



**Figure 19 . Semis des grains (Allouche A et Allouche A., 2022).**

- **Inoculum**

Nous avons préparé dans un bécher 20 g de gélose broth avec 1 L d'eau distillé

On le laisse agiter pendant 8 minutes ; ensuite nous avons ajusté le rapport de  $\text{PH} \approx 7$  avec quelques goutte de NaCl ; puis divisé la solution en trois (3) flacons stériles

Ø flacons 01 : bouillon avec consortium A  $\sum$  PE1.1, PE1.2, PE1.3, PE1.4, PE2 .1 PE2.2, PE2.3, PE2.4, PE 3.2, PE3.3, PE3.5, PE3.6

Ø flacons 02 : bouillon avec consortium B  $\sum$  PS1.1, PS2.1, PS2.2, PS3.1

Ø flacons 03 : bouillon avec consortium AxB  $\sum$  (PE1.1, PE1.2, PE1.3, PE1.4, PE2 .1 PE2.2, PE2.3, PE2.4, PE 3.2, PE3.3, PE3.5, PE3.6)  $\times$  (PS1.1, PS2.1, PS2.2, PS3.1)



**Figure 20 : Les pots traités par les consortiums (Allouche A et Allouche A., 2022).**

- **L'irrigation des pots**

Nous avons arrosé les pots avec 100 ml d' eau distillé stérile trois (3) fois par semaine pendant 30 jours.



**Figure 21 : L'irrigation des plantes (Allouche A et Allouche A., 2022).**

### **6. Méthode et mesure effectuée**

#### **6.1. Les Paramètres morphologiques**

##### **6.1.1. Taux de germination**

Après le semis; la germination est notée par comptage effectué tous les 24 heures, jusqu'au 14<sup>ème</sup> jour. Le pourcentage de graines germées est déterminé par le rapport entre le nombre des plantules normales développées sur le nombre total de graines semées (ISTA, 2003), d'où :

$$\text{Taux de germination en } \% = \frac{\text{Nombre des graines germées}}{\text{Nombre des graines semées}} \times 100$$

G (%) : est le pourcentage de germination.

NGG : est le nombre des graines germées.

NTG : est le nombre total des graines incubées.

◇ Toute plantule dont la longueur de la racicule est égale ou supérieure à 2 mm est considérée comme normale (ISTA, 2003).

### 6.1.2. Poids frais des parties aérienne et racinaire de la plante

Le poids frais des parties aérienne et racinaire de la plante a été déterminé à l'aide d'une balance, juste après la récolte. Le poids de ces parties est exprimé en gramme (g).

### 6.1.3. Poids sec des parties aérienne et racinaire de la plante

La matière sèche (MS) est déterminée par séchage à l'étuve de l'échantillon pendant 48 heures à 80°C. La biomasse sèche des parties aérienne et racinaire de chaque plante est pesée à la fin de l'expérimentation à l'aide d'une balance de précision et les valeurs sont exprimées en gramme (g).

### 6.1.4. Elongation des parties aérienne et racinaire de la plante

L'élongation des parties aériennes et racinaires a été mesurée après la récolte des plantes, à l'aide d'un ruban gradué en centimètre (cm).



**Figure 22 :** Croissance en longueur de la partie aérienne après application du stress métallique (Allouche A et Allouche A., 2022).

### 6.1.5. Nombre des feuilles et des racines

Le nombre des feuilles et des racines a été calculé manuellement.

### 6.1.6. la 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 (cm<sup>2</sup>).

a : La longueur de limbe en (cm).

b : La largeur de limbe en (cm).

### 6.2. Les paramètres biochimiques

#### 6.2.1. Teneur en chlorophylle

La mesure du taux de chlorophylle des feuilles a été effectuée avec un chlorophylle-mètre minolta SPAD 502 (Spectrum Technology Inc., IL. USA, Figure). C'est un radiomètre manuel dont la mesure correspond à un rapport entre les réflectances de la feuille dans le rouge (650nm) et le proche infrarouge (940nm) (Kotchi., 2004).

Les mesures sont effectuées sur l'avant dernière feuille. Trois mesures, en unité arbitraire, sont prises par plantule.



**Figure 23 :** Chlorophylle-mètre minolta SPAD 502 (Allouche A et Allouche A., 2022).

#### 6.2.2 Analyse des lipoperoxydes membranaires

Le niveau de la peroxydation lipidique est déterminé selon la méthode de Ali *et al.* (2005) avec quelque modification. Les feuilles fraîches de plantules de céréales de 0, 2 g sont homogénéisées dans 2 ml d'acide trichloracétique (TCA) à 0,1% et centrifugés à 14,000 g pendant 15 min. Après centrifugation, 1 ml de surnageant est mixé avec 2,5 ml d'acide 2thiobarbiturique (TBA) à 0,5% préparé dans du TCA à 20 %. Le mélange est chauffé dans un bain Marie à 95°C pendant 30 min. Au cours de cette incubation, un complexe se forme entre le TBA et les composés aldéhydiques, essentiellement le malondialdéhyde (MDA) : TBA-MDA. La réaction est arrêtée par un refroidissement immédiat dans un bain de glace. Après centrifugation à 10 000xg pendant 20 min, le surnageant est récupéré pour un dosage colorimétrique des lipoperoxydes.

Les concentrations en lipoperoxydes sont déterminées par la méthode de **Heath et Packer (1968)**. Les produits de peroxydation lipidique, qui réagissent avec le TBA sont principalement le MDA et les endoperoxydes (**Buege et Aust., 1978**). Le dosage est effectué par spectrophotométrie. L'absorbance du complexe TBA-MDA est mesuré à 532 nm contre un blanc constitué de tampon d'extraction. La densité optique est corrigée par une lecture à

600 nm. La concentration de MDA est calculée en utilisant son coefficient d'extinction molaire ( $\epsilon = 155\text{mM}^{-1}\text{cm}^{-1}$ ).

$\text{MDA (nmol/g MF)} = \frac{(A_{532} - A_{600}) \times V}{155 \times \text{MF}} \times 1000$	<p>A = Absorbance V = Volume de l'extrait (mL) MF = Matière végétale fraîche (g)</p>
--	--

### 6.2.3 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.

### 6.2.4 Dosage des protéines totaux

La technique utilisée pour le dosage des protéines totales est celle de **Bradfort (1976)** qui utilise le BSA (le sérum d'albumine de bovin) comme standard. Le dosage se fait au spectrophotomètre à la longueur d'onde 595 nm.

### 6.2.5. 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 :

$$\text{RWC (\%)} = ((\text{PF} - \text{Ps}) / (\text{PpT} - \text{Ps})) \times 100$$

PF: poids frais (g).

Ps: poids sec (g).

PpT : poids de pleine turgescence (g).

### 6.2.6. Les Composés phénoliques

#### 6.2.6.1 Dosage 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 polyphénols 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. 50µl de chaque extrait est mélangé avec de 50µl de trichlorure d'aluminium (AlCl<sub>3</sub>) (200mg d'AlCl<sub>3</sub> sont dissouts dans 10ml d'H<sub>2</sub>O) après 5 min ajoute 150µl de d'acétate de sodium (C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>NaO<sub>2</sub>) (500mg d'C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>NaO<sub>2</sub> son dissouts dans 10ml d'H<sub>2</sub>O) 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 quercétine a différentes concentrations dans les mêmes conditions que l'échantillon, et exprimée en mg d'équivalent de Quercétine par gramme de matière fraîche (mg EQ/g MF).

#### 6.2.6.2 La teneur totale en polyphénols

##### Principe de la réaction

On calcule la teneur totale en polyphénols à l'aide du réactif Folin Ciocalteu (**Singleton et Rossi., 1965**). Le réactif FCR, constitué d'un mélange d'acide phosphotungstique (H<sub>3</sub>PW<sub>12</sub>O<sub>40</sub>) et d'acide phosphomolybdique (H<sub>3</sub>PMo<sub>12</sub>O<sub>40</sub>), est réduit lors de l'oxydation des phénols, en mélange d'oxydes de tungstène (W<sub>8</sub>O<sub>23</sub>) et de

molybdène ( $\text{Mo8O23}$ ). 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 ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) à 7,5% Cette solution est préparée en dissolvant 7,5 g de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  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.

A 20  $\mu\text{l}$  d'extrait de plante on ajoute 100  $\mu\text{l}$  de FCR dilué (1 :10) et 75  $\mu\text{l}$  de carbonate de sodium à 7,5%, et on place le mélange à l'obscurité pendant 2h. La lecture est réalisée à 765 nm. Un blanc est préparé de la même manière en remplaçant l'extrait de plante par le solvant utilisé (le méthanol).La concentration des polyphénols a été déterminé à partir d'une courbe d'étalonnage (réalisé par un standard étalon la quercétine a différentes concentrations dans les mêmes conditions que l'échantillon, et exprimée en mg d'équivalent de l'acide gallique par gramme de matière fraîche (mg AG/g MF).

### 6.3 Analyses physico-chimiques des sols

La qualité physico-chimique du sol est importante à connaître car elle conditionne la diversité de la microflore tellurique. Dans ce cas, le pH et la conductivité électrique sont deux paramètres à déterminer du fait de leur influence sur la composition de la communauté microbienne tellurique.

La mesure du pH consiste à homogénéiser 10 g de sol dans 25 ml d'eau distillée. Après agitation, à l'aide d'un homogénéiseur pendant 15 minutes et décantation le pH du surnageant est déterminé. La CE permet de déterminer la salinité d'un sol. Elle s'effectue à partir de l'extrait du sol dilué au 1/5 dans l'eau distillée en homogénéisant 10g de sol/ 50 ml  $\text{H}_2\text{O}$ . Après agitation (30mn) et décantation, la CE de l'extrait est mesurée à l'aide d'un salinomètre (**Hanna H1 9032**). Les résultats sont exprimés en mS/cm.



**Figure 24 :** analyses physico-chimique du sol (Allouche A et Allouche A., 2022).

### **Traitement de données et analyse statistique**

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

# **Chapitre 02**

## **Résultat et discussion**

## chapitre 02 Résultats et discussion

### Résultats et discussion

#### 1. Résultat

Dans notre travail, nous avons essayé de montrer en évidence les modifications morphologiques, physiologiques et biochimiques de plantules blé dur (*Triticum durum*) traitées par le cadmium à 12 ppm, et par le plomb à 800 ppm pendant 30 jours.

##### 1.1. Effet de la co inoculation par la PGPR sur le taux de germination chez *Triticum durum*

L'analyse de la variance (tableau 12) montre que les différentes concentrations influent de manière hautement significative ( $P < 0.01$ ) sur le taux de germination de *Triticum durum* stressé avec le cadmium, et de manière significative ( $P \leq 0.05$ ) par rapport les plantules stressé avec le plomb (tableaux 13).

**Tableau 12:** Analyse de la variance de taux germination de *Triticum durum* stressé par le cadmium.

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
TG	7	3662,850	523,264	4,506	0,006
Erreur	1 6	1857,877	116,117		
Total corrigé	2 3	5520,727			

**Tableau 13:** Test de kruskal-wallis de taux germination de *Triticum durum* stressé par le plomb.

Source	DDL	K (valeur observée)	k (valeur critique)	P-value	Alpha
TG	7	14.942	14.067	0.037	0,05

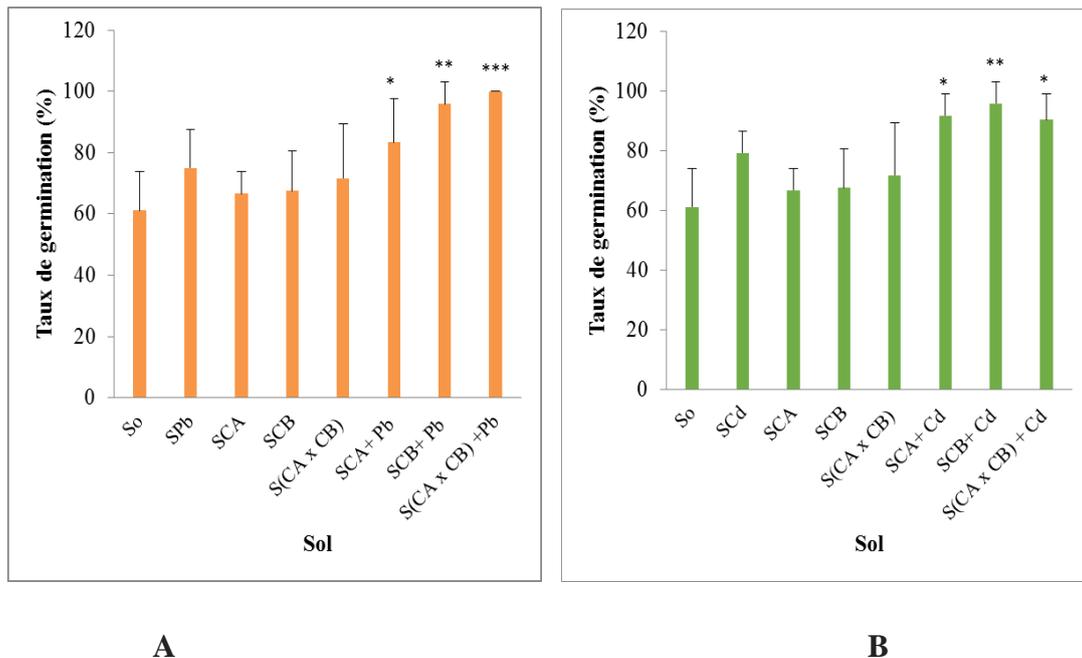
Les résultats obtenus dans La (**figure 26**) représente les moyennes  $\pm$  l'écartype

L'analyse de ces résultats révèle que les plantules inoculés par (SCA) et sous l'influence de stress cadmique et plombique provoque une augmentation significative, tandis que les

## chapitre 02 Résultats et discussion

plantes soumise au traitement par(SCB) est plus élevées de manière hautement significative ( $95,83 \pm 7,21$ ) par apport au témoins ( $61,11 \pm 12,72$ )

Les plantules inoculés par (SCA×SCB) sous l'influence de plomb enregistré une augmentation très hautement significative ( $100 \pm 00$ ), comparativement au cadmium qui augmente à manière significative .



**Figure 25:** Effet de la co-inoculation avec des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR) sur le taux de germination des plantes de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées (A: en présence de cadmium, B : en présence de plomb).

### 1.2 Effet de la co inoculation par la PGPR sur le nombre de feuilles chez *Triticum durum*

L'analyse statistique a révélé une différence entre les plantules qui traité par cadmium (tableau 15) de manière très hautement significative ( $P < 0.01$ ), et significative ( $P \leq 0.05$ ) par apport les plantules traité par plomb (tableau 14) relative à nombre de feuille

## chapitre 02 Résultats et discussion

---

**Tableau 14:** Test de kruskal-wallis de nombre feuilles de *Triticum durum* stressé par le plomb

Source	DDL	K (valeur observée)	k (valeur critique)	P-value	Alpha
TG	7	18.78	14.067	0.037	0,05

**Tableau 15:** Test de kruskal-wallis de nombre feuilles de *Triticum durum* stressé par le cadmium

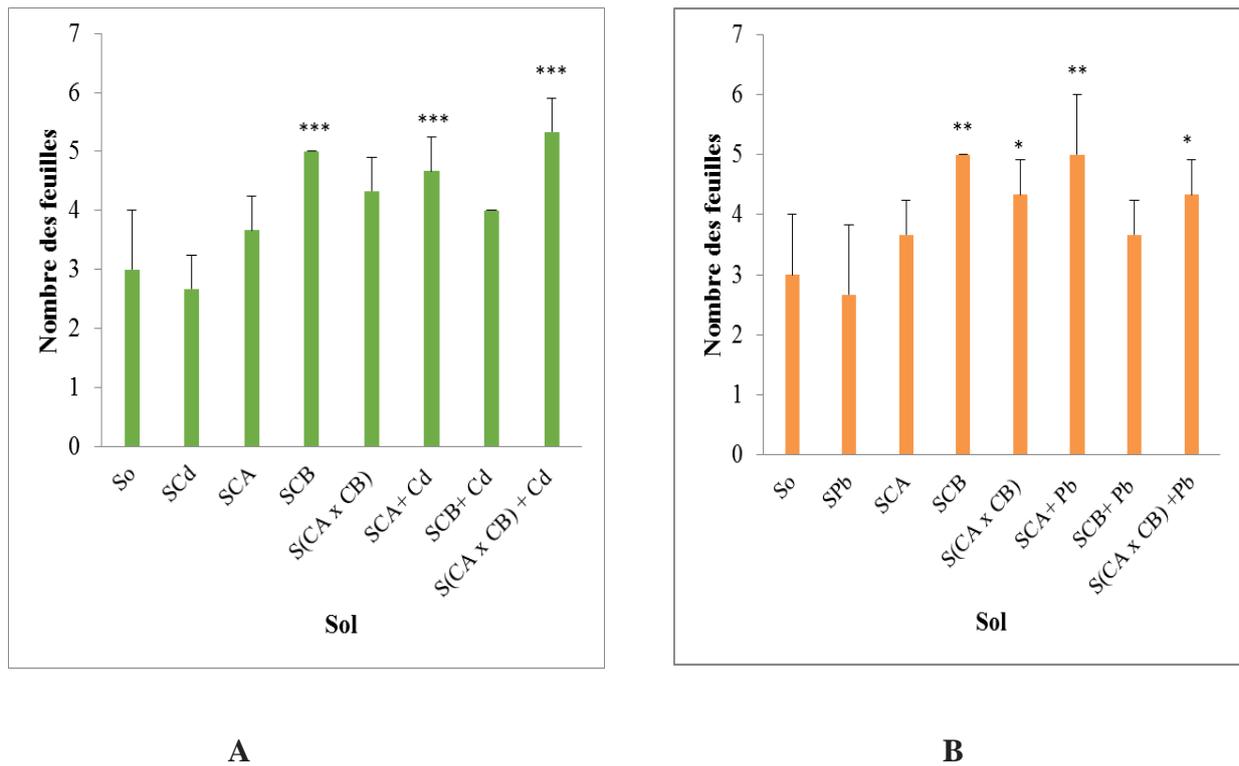
Source	DDL	K (valeur observée)	k (valeur critique)	P-value	Alpha
TG	7	14.93	14.067	0.009	0,05

La vérification de la normalité des variables par le teste de Shapiro-Wilk, nous a permis de dire que les variables ne suit pas une loi Normale dans les deux métal respectivement aux valeur ( $P_v=0.02169$ ) ( $P_v=0.013$ ).

Les résultats présentés dans la figure **26 (26A,26B)** montrent que le nombre de feuille diminué substantiellement avec l'échantillon non traité par apport au témoins et sous l'influence de chaque métal (S+ metal).

en absence de métal les plantes inoculés par (SCB), enregistrée une augmentation très hautement significative de ( **$5\pm 0$** ) en cadmium et de manière hautement significative avec le plomb comparativement au (SCA) qui enregistré une légère augmentation non significative ; en parallèle cette dernier présente un effet très hautement significative sous l'influence de cadmium de ( **$4.66\pm 0.57$** ) et hautement significative avec plomb ( **$5.00\pm 1.00$** ).

Cette même observation est enregistré chez les plantes provoqué par métal et traité par consortium A×B à manière significative, par apport au cadmium enregistré de manière très hautement significative de ( **$5.33\pm 0.57$** ).



**Figure 26:** Effet de la co-inoculation avec des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR) sur le nombre des feuilles des plantes de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées (B: en présence de cadmium, A : en présence de plomb).

### 1.3 Effet de la co-inoculation par la PGPR sur le nombre des racines chez *Triticum durum*

L'analyse de la variance (tableau 16) montre que les différents traitements influent de manière très hautement.

significative ( $P < 0.005$ ) sur le nombre des racines de (*Triticum durum*) Stressé avec le cadmium, et aussi de manière significative ( $P \leq 0.05$ ) par rapport aux plantules stressées avec le plomb (tableaux 17).

## chapitre 02 Résultats et discussion

---

**Tableau 16:** Analyse de la variance de nombre des racines de *Triticum durum* stressé par le cadmium

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
NR	7	141,167	20,167	5,500	0,002
Erreur	16	58,667	3,667		
Total corrigé	23	199,833			

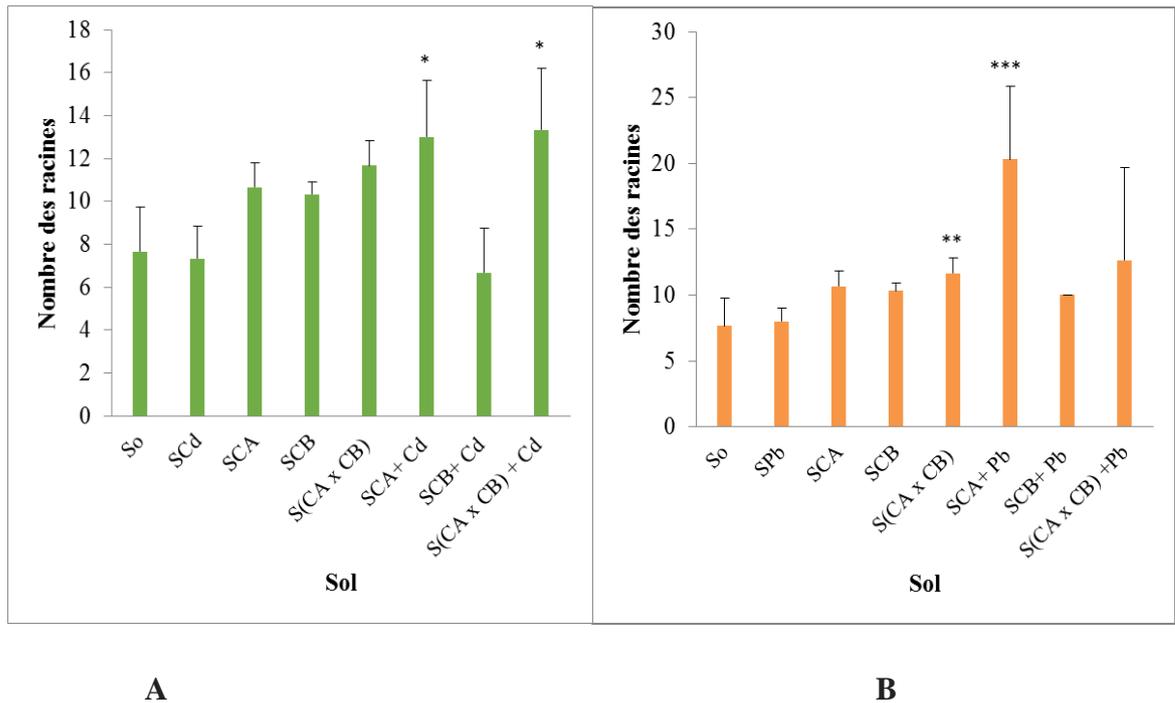
**Tableau 17:** Test de kruskal-wallis de nombre des racines de *Triticum durum* stressé par le plomb

Source	DDL	K (valeur observée)	k (valeur critique)	P-value	Alpha
TG	7	15.198	14.067	0.034	0,05

Les histogrammes suivants résument les valeurs moyennes et les écartypes du nombre des racines provient des plantes implantées dans sols mélangés avec des bactéries et des métaux lourds, et un sol témoins.

Le nombre élevé des racines a été enregistrés dans les plantules inoculés par (CA) sous l'influence de plomb (**20.33±5.5**), l'impact de cette consortium avec cadmium enregistré par manière significative.

En revanche, l'interaction CA× CB provoque une augmentation significative du nombre de racine par l'application du cadmium (**11.66± 1.15**)



**Figure 27:** Effet de la co-inoculation avec des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR) sur le nombre de racine des plantes de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées (A: en présence de cadmium, B : en présence de plomb)

### 1.4 Effet de la co inoculation par la PGPR sur la longueur de la partie racinaire chez *Triticum durum*

Les résultats statistique (tableaux 18/ tableau 19) montrent que aucun effet significatif (P 0.13) par rapport les plantes stressé par cadmium et plomb (P 0.11) au niveau de la longueur de la partie racinaire.

**Tableau 18:** Analyse de la variance de la longueur de la partie racinaire de *Triticum durum* stressé par le cadmium

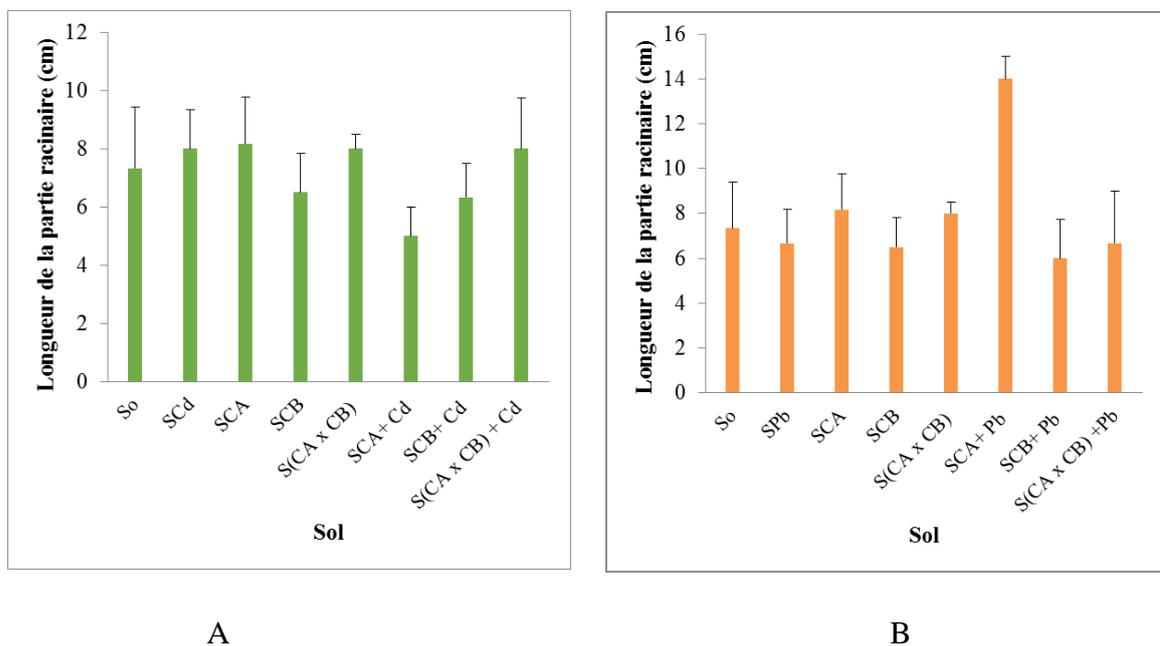
Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
LPR	7	26,833	3,833	1,917	0,133
Erreur	16	32,000	2,000		
Total corrigé	23	58,833			

## chapitre 02 Résultats et discussion

**Tableau 19:** test de kruskal-wallis de la longueur de la partie racinaire de *Triticum durum* stressé par le plomb

Source	DDL	K (valeur observée)	k (valeur critique)	P-value	Alpha
TG	7	11.480	14.067	0.119	0,05

Test de Kruskal-Wallis nous a permis de dire que ces variables qui ne présentent aucune différence significative entre la longueur des racines des différents échantillons



**Figure 28 :** Effet de la co-inoculation avec des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR) sur la longueur de la partie racinaire des plantes de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées (A: en présence de cadmium, B : en présence de plomb).

### 1.5 Effet de la co-inoculation par la PGPR sur la longueur de la partie aérienne chez *Triticum durum*

Les résultats statistiques (tableau 20/ tableau 21) montrent que aucun effet significatif (P 0.26) par rapport aux plantes stressées par cadmium et plomb (P 0.55), au niveau de la longueur de la partie aérienne.

## chapitre 02 Résultats et discussion

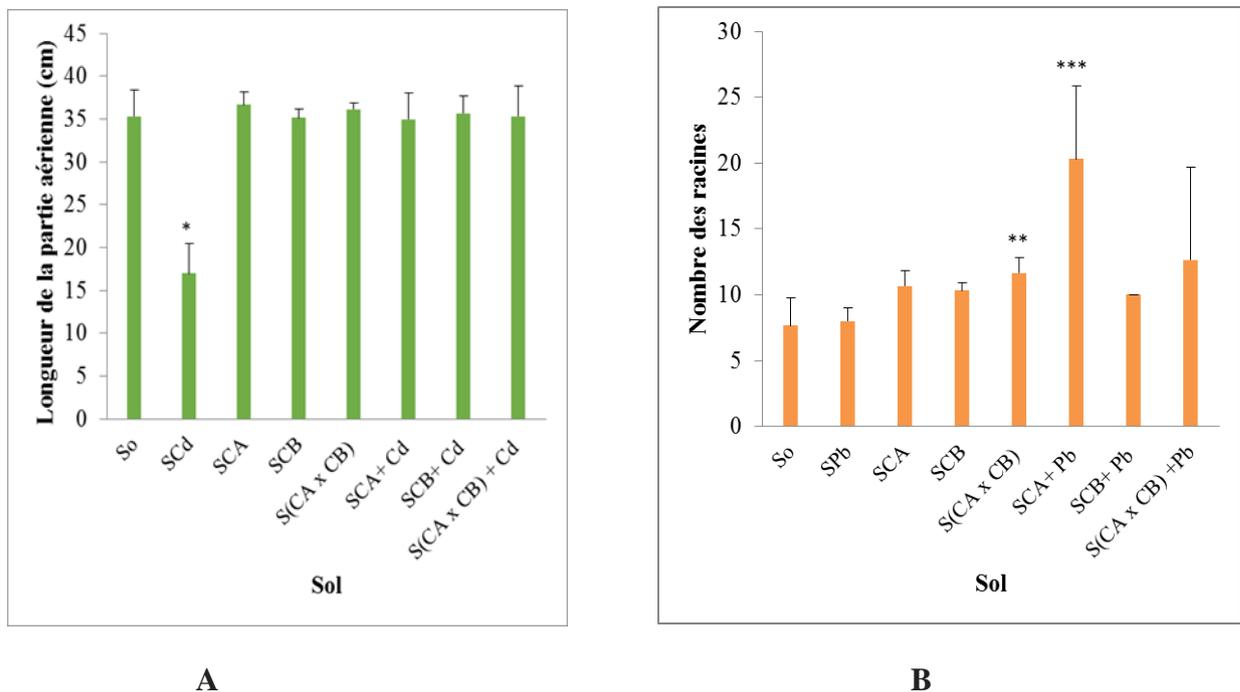
**Tableau 20:** Test de kruskal-wallis de la longueur de la partie aérienne de *Triticum durum* stressé par le cadmium

Source	DDL	K (valeur observée)	k (valeur critique)	P-value	Alpha
TG	7	8.823	14.067	0.266	0,05

**Tableau 21:** Test de kruskal-wallis de la longueur de la partie aérienne de *Triticum durum* stressé par le plomb

Source	DDL	K (valeur observée)	k (valeur critique)	P-value	Alpha
TG	7	13.786	14.067	0.055	0,05

le teste de Kruskal-Wallis révèle l'existence d'une différence significative entre la longueur moyenne de la partie aérienne de témoins ( $35,33 \pm 3,05$ ) et des plantes inoculés sous stress cadmique ( $17,00 \pm 3,46$ ) et plombique ( $6,66 \pm 1,52$ ) (Fig. 29A. Fig. 29B), ces derniers influencent négativement la longueur de *Triticum durum* par apport les plantules traité avec l'inoculum qui enregistré une augmentation non significative et témoins.



**Figure 29 :** Effet de la co-inoculation avec des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR) sur la longueur de la partie aérienne des plantes de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées (A: en présence de cadmium, B : en présence de plomb)

## chapitre 02 Résultats et discussion

### 1.6 Effet de la co -inoculation par la PGPR sur le poids frais la chez *Triticum durum*

Les résultats statistique montre que les différents traitement influent de manière très hautement significative ( $P \leq 0.0001$ ) par apport les plantules stressé par cadmium et plomb dans les différents source (sol/ orange/ sol.organe) sur poids frais de plante.

**Tableau 22:** Analyse type II du poids frais de *Triticum durum* stressé par le cadmium

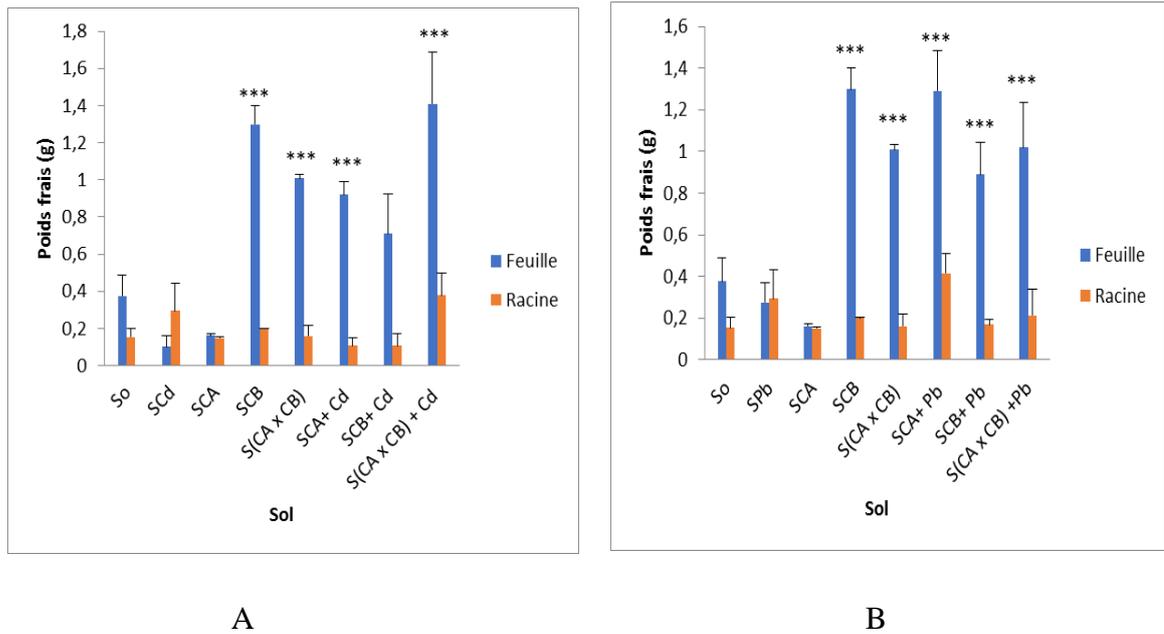
Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Sol	7	2,944	0,421	32,731	< 0,0001
Organe	1	3,689	3,689	287,099	< 0,0001
Sol* organe	7	2,464	0,352	27,393	< 0,0001

**Tableau 23 :** Analyse type II du poids frais de *Triticum durum* stressé par le plomb

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Sol	8	3,092	0,387	31,670	<, 0001
Organe	1	4,498	4,498	368,559	<, 0001
Sol*Organe	6	1,433	0,239	19,562	< 0,0001

La figure **31A** compare les feuilles et les racines des plantes traités et sous l'influence de cadmium , tandis que la figure **31B** sous l'impact de plomb. Cette comparaison distingue presque la même situation, le poids racinaire et toujours inférieur à la masse foliaire.

Enregistré une augmente a manière très hautement significative avec SCB , SCA×CB, SCA×Cd, S(CA×CB+Cd), comparativement aux SCB+Pb qui augmenté a manière hautement significative et aucune différence a été signalée par apport SCB+Cd .



**Figure 30 :** Effet de la co-inoculation avec des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR) sur le poids frais des plantes de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées (A: en présence de cadmium, B : en présence de plomb).

### 1.7 Effet de la co-inoculation par la PGPR sur le poids sec la chez *Triticum durum*

Les résultats statistique montre que les différents traitement influent de manière très hautement significative ( $P \leq 0.0001$ ) par apport les plantules stressé par cadmium et plomb dans les différent source sur poids sec de plante.

**Tableau 24:** Analyse type II du poids sec de *Triticum durum* stressé par le cadmium

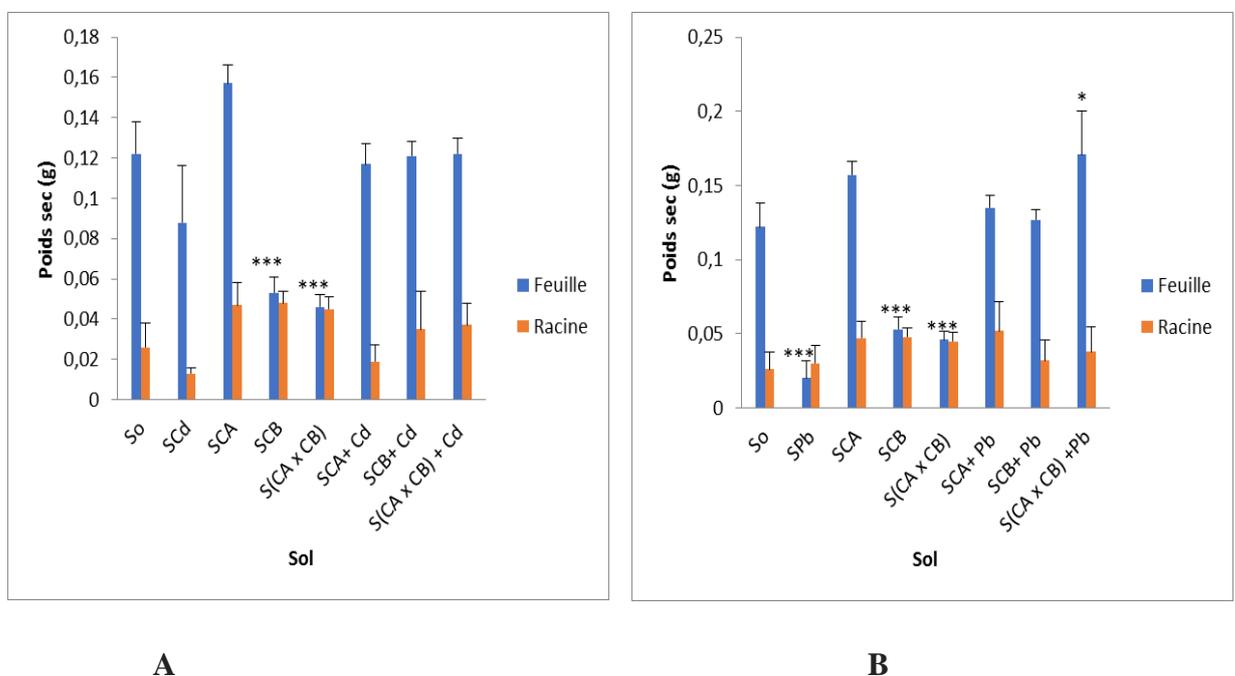
Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Sol	7	0,015	0,002	14,066	<, 0001
Organe	1	0,058	0,058	372,717	<0,0001
Sol*Organe	7	0,019	0,003	17,358	<, 0001

## chapitre 02 Résultats et discussion

**Tableau 25:** Analyse type II du poids sec de *Triticum durum* stressé par le plomb

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Sol	8	0,044	0,006	28.509	<, 0001
Organe	1	0,058	0,058	300.896	<, 0001
Sol*Organe	6	0,024	0,004	20.855	< 0,0001

Les résultats exprimés dans la figure 32 (32 A , 32 B) montrent qu'aucune effet significative dans partie racinaire , par apport la partie aérienne a enregistré une diminution très hautement significative dans les plantes traité par SCB , SCA×SCB , SPb (**0,02 g**) par apport au témoins (**0,12 g**) .



**Figure 31 :** Effet de la co-inoculation avec des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR) sur le poids sec des plantes de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées (A: en présence de cadmium, B : en présence de plomb).

## chapitre 02 Résultats et discussion

### 1.8 Effet de la co- inoculation par la PGPR sur la surface foliaire chez *Triticum durum*

Les résultats statistique (tableaux 26/ tableau 27) montrent que les différents traitement influent de manière significative ( $P \leq 0.05$ ) par apport les plantules traité par cadmium et effet très hautement significative par apport plomb ( $P \leq 0.001$ ) au niveau foliaire.

**Tableau 26:** Test de kruskal-wallis de la surface foliaire de *Triticum durum* stressé par le cadmium

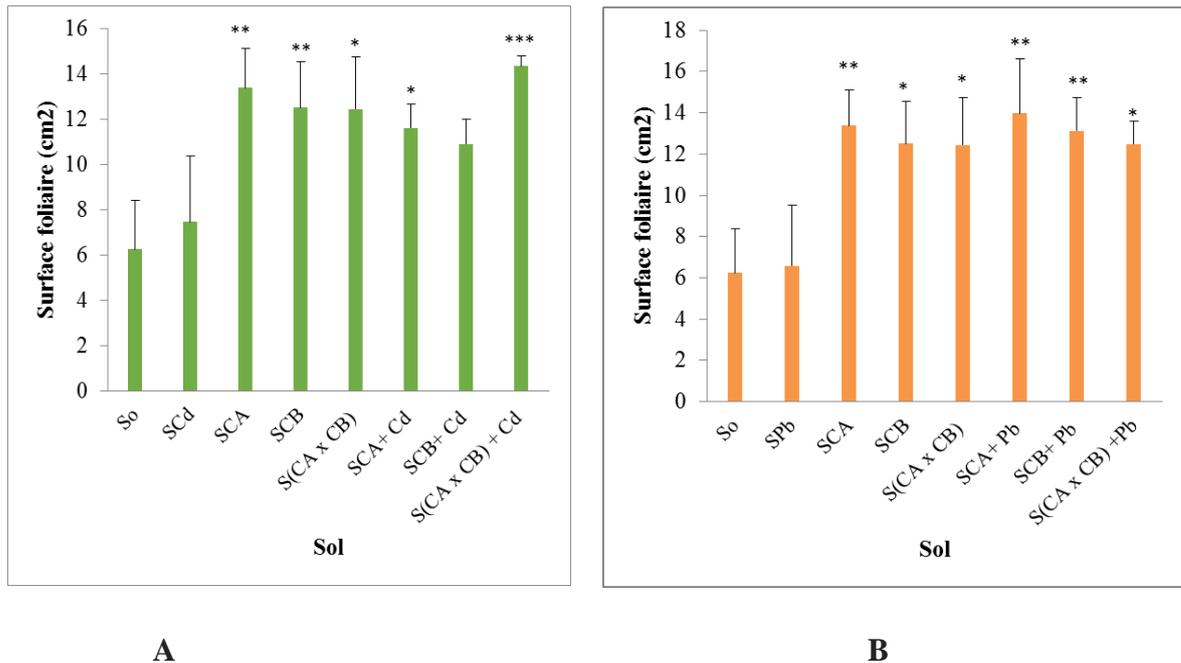
Source	DDL	K (valeur observée)	k (valeur critique)	P-value	Alpha
TG	7	15.293	14.067	0.032	0,05

**Tableau 27:** Analyse de la variance de la surface foliaire de *Triticum durum* stressé par le plomb

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
SF	7	199,829	28,547	6,260	0,001
Erreur	16	72,961	4,560		
Total corrigé	23	272,791			

La surface des feuilles ont été mesurées pour voir l'influence et l'efficacité de la mix inoculation, les valeurs moyennes ont été illustrées dans la **figure 32 (32A, provoqué par plomb ; 32B, provoqué par cadmium)**, la comparaison de ces moyennes maitre en évidence une différence très hautement significative dans les plantules inoculés par CA× CB sous stress cadmique (**12,42±2,33**) par apport plomb (**12,48±1,11**) qui enregistré a manière significative .

Les plantes traité par CA +Cd et par CA+Pb augmente progressivement et de manière significative comparativement au plantes inoculés par CB+Pb qui provoque une augmentation hautement significative, et aussi observée pour SCA et SCB un effet hautement significative par apport SCA×SCB ce qui correspond à une augmentation significative.



**Figure 32** : Effet de la co-inoculation avec des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR) sur la surface foliaire de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées (A: en présence de cadmium, B : en présence de plomb).

### 1.9 Effet de la co -inoculation par la PGPR sur la teneur relative en eau (TRE) chez *Triticum durum*

Les résultats statistique (tableaux 28/ tableau 29) montrent que les différents traitement influent de manière significative ( $P \leq 0.05$ ) par apport les plantules traité par cadmium et plomb sur le teneur relative en eau

**Tableau 28** : Test de kruskal-wallis de le teneur relative en eau de *Triticum durum* stressé par le cadmium

Source	DDL	K (valeur observée)	k (valeur critique)	P-value	Alpha
TG	7	15.547	14.067	0.030	0,05

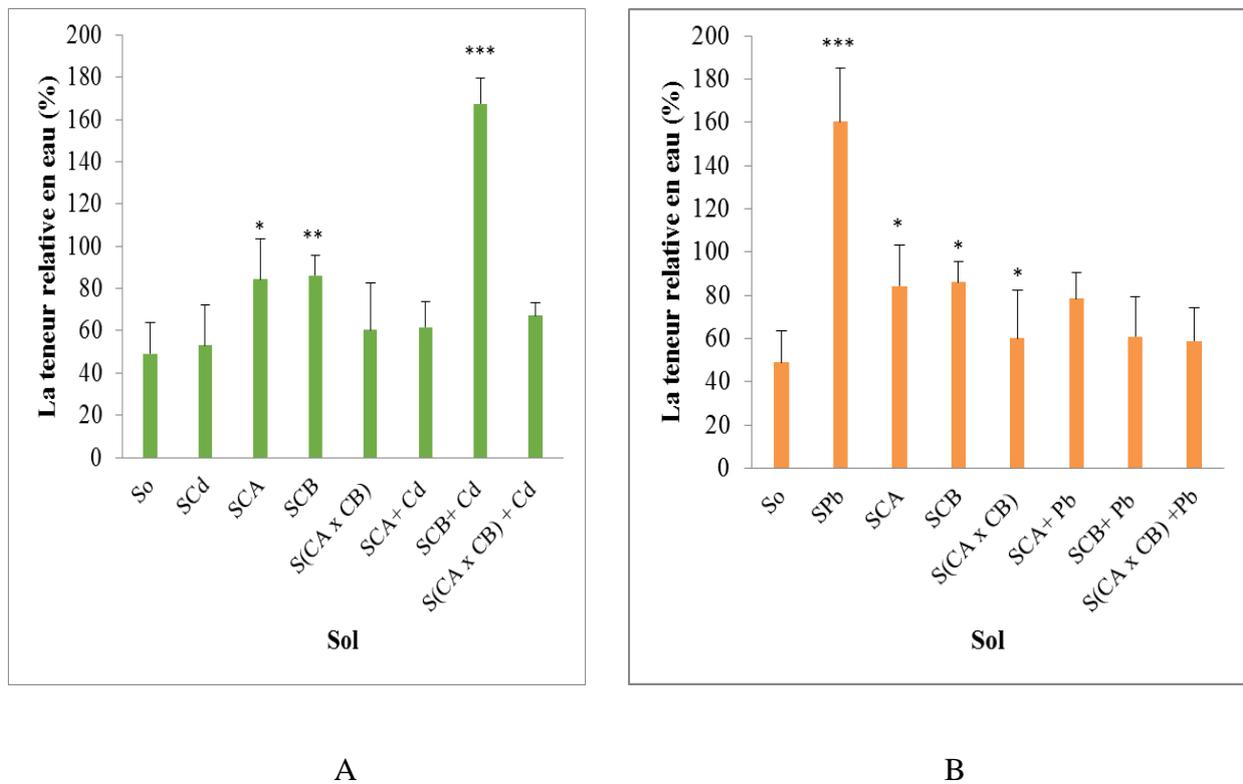
**Tableau 29**: Test de kruskal-wallis de le teneur relative en eau de *Triticum durum* stressé par le plomb

Source	DDL	K (valeur observée)	k (valeur critique)	P-value	Alpha
TG	7	15.040	14.067	0.035	0,05

## chapitre 02 Résultats et discussion

Les figures 33A et 33B qui expriment les teneurs relatives en eau, ces pourcentages varient entre une diminution, alors que une augmentation très hautement significative a été signalée dans le SCB+Cd pour la figure 33A, cette signification de différence est la même dans le sol SPb dans la figure 33b, les plantes inoculés par SCA augmenté a manière significative dans les deux métal, contrairement SCB enregistrée une augmentation hautement significative.

A des niveaux de traitement SCA×CB, le plomb entraine une augmentation significative sur le teneur relative en eau.



**Figure 33:** Effet de la co-inoculation avec des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR) sur la teneur relative en eau des plantes de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées (A: en présence de cadmium, B : en présence de plomb).

### 1.10 Effet de la co inoculation par la PGPR sur la teneur en chlorophylle chez *Triticum durum*

L'analyse de la variance (tableau 30) montre que les différents traitement influent de manière.

## chapitre 02 Résultats et discussion

---

Très hautement significative ( $P \leq 0.0001$ ) sur la teneur en chlorophylle de *Triticum durum* Stressé avec le cadmium, et a manière significative ( $P \leq 0.05$ ) par apport les plantules stressé avec plomb (tableau 31).

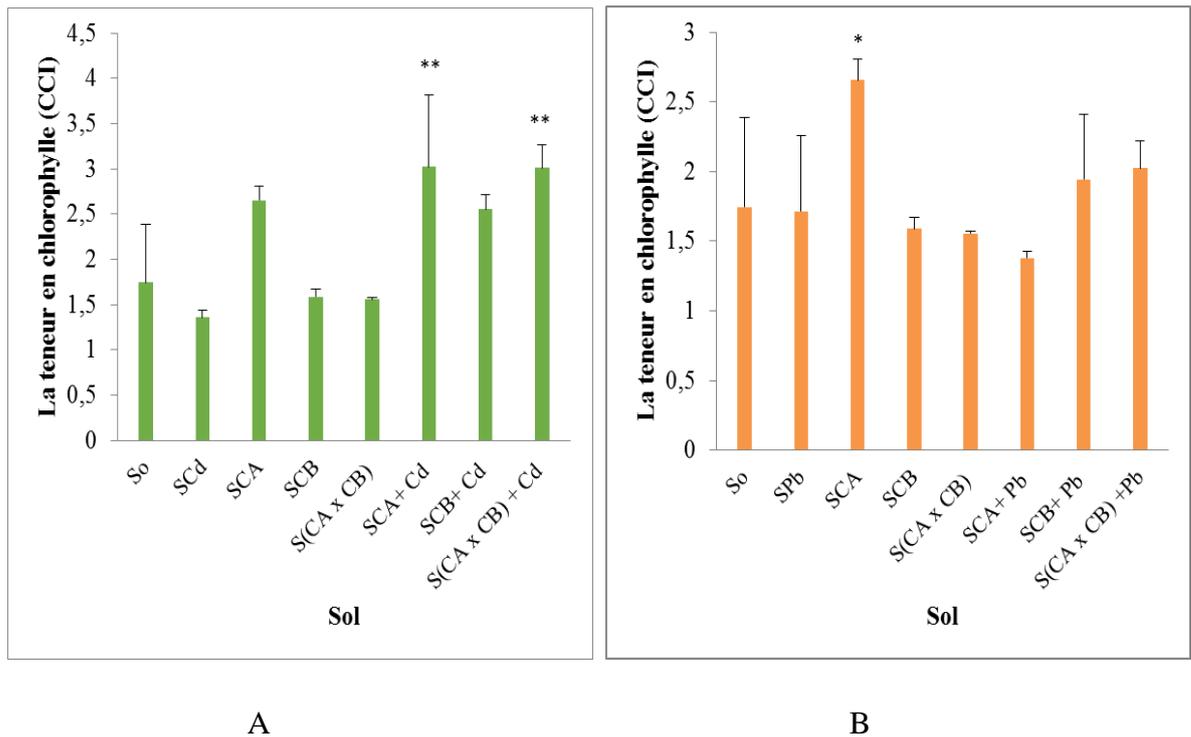
**Tableau 30:** Analyse de la variance de la teneur en chlorophylle de *Triticum durum* stressé par le cadmium

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	7	10,127	1,447	9,821	< 0,0001
Erreur	16	2,357	0,147		
Total corrigé	23	12,484			

**Tableau 31:** Test de kruskal-wallis de la teneur en chlorophylle de *Triticum durum* stressé par le plomb

Source	DDL	K (valeur observée)	k (valeur critique)	P-value	Alpha
TG	7	14.446	14.067	0.044	0,05

La chlorophylle contenue dans la *Triticum durum* a été mesurée et représentée sous forme d'histogramme dans la **figure 34** (34A et 34B), le cadmium et comme la majorité des cas montrent un augmentation hautement significative par apport SCA+Cd et SCA× CB sous l'influence de cadmium, alors que dans la figure 34 B en observée une différence significative a été signalée (SCA).



**Figure 34 :** Effet de la co-inoculation avec des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR) sur la teneur en chlorophylle des plantes de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées (A: en présence de cadmium, B : en présence de plomb).

### 1.11 Effet de la co -inoculation par la PGPR sur la teneur en protéines solubles chez *Triticum durum*

Les résultats statistique montre que les différents traitements influent des plusieurs manières :

(sol): effet très hautement significative ( $P \leq 0.0001$ ) par apport les plantules traité avec cadmium et plomb.

(Organe): effet hautement significative par apport plomb et effet très hautement significative ( $P \leq 0.0001$ ) dans le cas des plantules traité par cadmium.

(Sol.organe) : effet très hautement significative ( $P \leq 0.0001$ ) par apport les plantules traité par cadmium et Plomb.

## chapitre 02 Résultats et discussion

**Tableau 32:** Analyse type II de la teneur en protéines solubles de *Triticum durum* stressé par le cadmium

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Sol	7	88,399	12,628	8,479	<, 0001
Organe	1	182,558	182,558	122,569	<, 0001
Sol*Organe	7	94,306	13,472	9,045	<, 0001

**Tableau 33:** Analyse type II de la teneur en protéines solubles de *Triticum durum* stressé par le plomb

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Sol	8	321,264	40,158	26,252	< 0,0001
Organe	1	11,794	11,794	7,710	0,009
Sol organe	6	244,707	40,785	26,661	< 0,0001

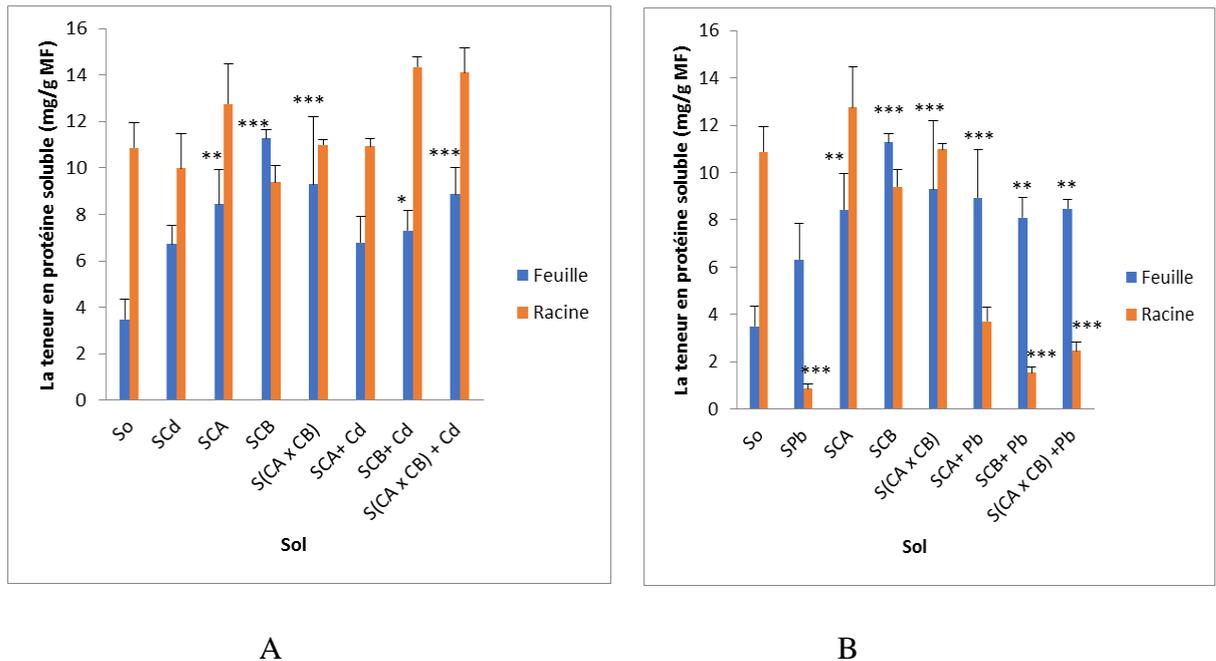
Selon la figure 35 B , la teneur en protéines solubles au niveau des racines diminue dans les plantes SPb ,SCB+Pb , SCA+SCB+Pb et atteindre (**0.86mg/gMF**) par rapport au témoins (**10.87mg/gMF**).

Au niveau foliaire, le traitement par les bactéries isolées de la partie racinaire du *Peganum harmala*, préférentiellement augmentée le teneur des plantes sous l'influence de plomb (effet très hautement significatif) comparativement au cadmium (effet significatif) par rapport au témoin.

En parallèle , les plantes inoculés avec SCB et sous stress cadmique ont enregistré une augmentation significative alors que sous stress plombique, une augmentation hautement significative.

Les plantes inoculés avec CA×CB sous l'influence de plomb augmente à manière hautement significative comparativement au cadmium, qui enregistré un effet très hautement significative.

Les mêmes observations ont été notées chez plantes inoculés avec SCA une augmentation hautement significative à très hautement significative par les consortium SCB , SCA×CB par rapport au témoins.



**Figure 35:** Effet de la co-inoculation avec des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (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).

### 1.12 Effet de la co-inoculation par la PGPR sur la teneur en sucre solubles chez *Triticum durum*

Les résultats statistique montre que les différents traitements influent des plusieurs manières par apport les différents sources :

Sol : effet très hautement significative ( $P \leq 0.0001$ ) par apport les plantules traité avec cadmium et plomb

Organe : aucun effet significative ( $P > 0.40$ ) par apport plomb et effet très hautement significative ( $P \leq 0.0001$ ) dans le cas des plantules traité par cadmium.

sol\*organe : effet significative ( $P < 0.4$ ) par apport cadmium et très hautement significative ( $P \leq 0.001$ ) du plante traité par plomb.

## chapitre 02 Résultats et discussion

**Tableau 34:** Analyse type II de la teneur en sucre solubles de *Triticum durum* stressé par le plomb

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
sol	8	163,093	20,387	17,032	< 0,0001
Organe	1	0,853	0,853	0,713	0,405
Sol organe	6	37,848	6,308	5,270	0,001

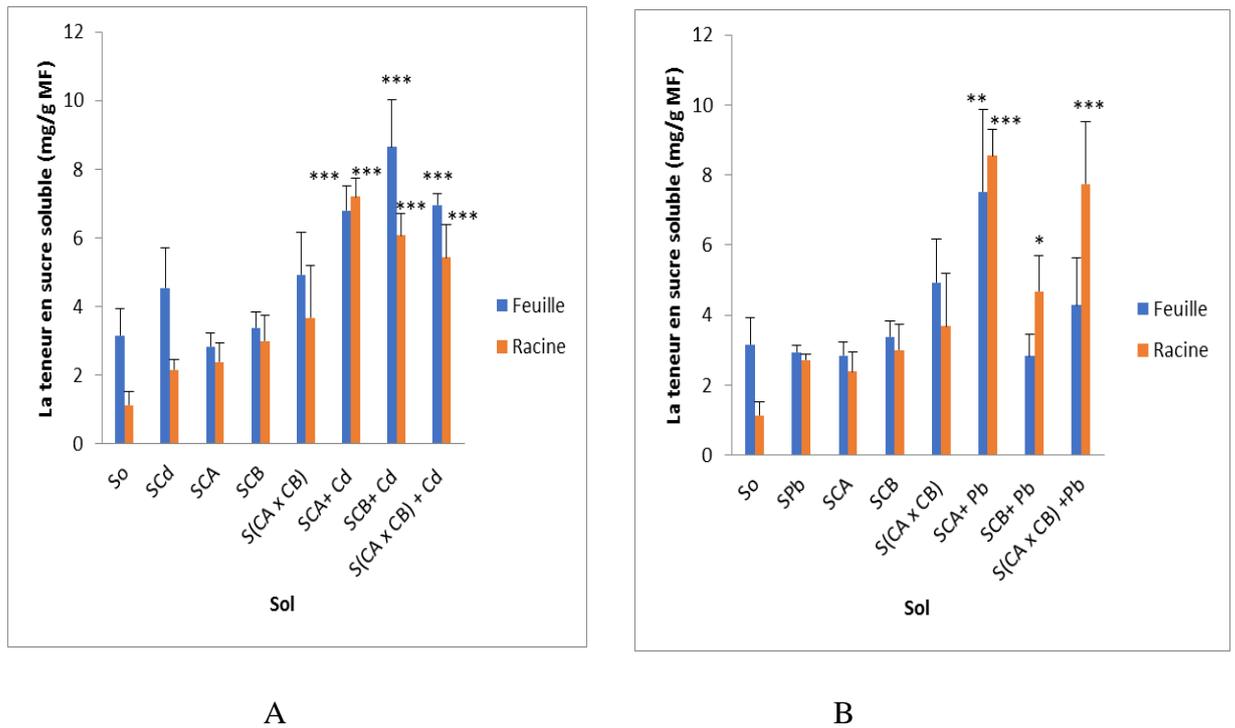
**Tableau 35:** Analyse type II de la teneur en sucre solubles de *Triticum durum* stressé par le cadmium

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Q1	7	176,930	25,276	35,447	< 0,0001
Q2	1	19,640	19,640	27,543	< 0,0001
Q1*Q2	7	11,722	1,675	2,348	0,047

En ce qui concerne le sucre soluble dans les plantes soit dans la partie foliaire soit dans la partie racinaire a été quantifié et les valeurs moyennes  $\pm$  ectype ont été illustrées dans la **figure 37 (37A et 37B)**.

Les comparaisons des moyennes permettent de distinguer clairement de résultat varie, dans la **figure 37A** diffèrent très hautement significative enregistré par les plantes traités avec SCA (**8,65mg/gMF**),SCB,SCA×CB Sous l'influence de cadmium dans partie aérienne et racinaire par apport au témoins.

Les plantules sous stress plombique enregistré une augmentation très hautement significative par l'inoculum SCA (**8,55mg/gMF**) dans les racines et effet hautement significative au feuilles par apport au témoin (**3,155mg/gMF**) En revanche l'interaction CA×CB sous l'influence de plomb est plus importante dans la partie racinaire d'où enregistré un effet de manière très hautement significative la partie aérienne .



**Figure 36 :** Effet de la co-inoculation avec des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR) sur la teneur en sucre soluble des plantes de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées (A: en présence de cadmium, B : en présence de plomb).

### 1.13 Effet de la co-inoculation par la PGPR sur la teneur en malondialdihyde chez *Triticum durum*

Les résultats statistique montre que les différents traitements influent des plusieurs manières :

Sol : effet très hautement significative ( $P \leq 0.0001$ ) par apport les plantules traité avec cadmium et plomb.

Organe : effet très hautement significative ( $P \leq 0.001$ ) par apport les plantes stressé par plomb et cadmium ( $P \leq 0.0001$ )

Sol\*Organe : effet très hautement significative ( $P \leq 0.0001$ ) par apport les plantules traité par cadmium et plomb.

## chapitre 02 Résultats et discussion

**Tableau 36:** Analyse type II de la teneur en malondialdiyhde de *Triticum durum* stressé par le plomb

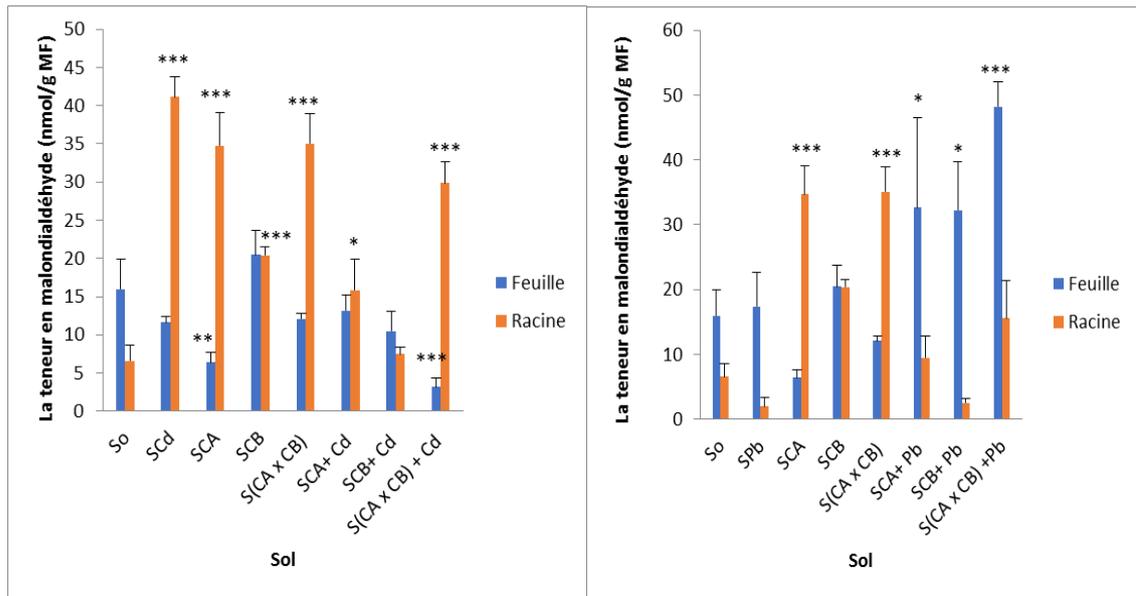
Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Sol	8	2165,697	270,712	10,348	< 0,0001
Organe	1	362,034	362,034	13,839	0,001
Sol*Organe	6	5717,109	952,851	36,422	< 0,0001

**Tableau 37:** Analyse type II de la teneur en malondialdiyhde de *Triticum durum* stressé par le cadmium

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Sol	7	1530,090	218,584	30,846	<, 0001
Organe	1	1788,881	1788,881	252,444	<, 0001
Sol*Organe	7	2739,295	391,328	55,224	<, 0001

Les teneurs en Malondialdéhyde ont été mesurés en nmol/g MF et les valeurs moyennes ont été représentées en histogrammes dans la **figure 37**, sous stress cadmique **37A**, stress blombique **37B**.

En présence de cadmium les racines semblent être plus productive que les feuilles et diffèrent hautement significative alors qu'une différence très significative marque les feuilles du SCA et hautement significative marque le SCA+CB+Cd. Une situation inversée dans le SCA+Pb, SCB et SCA+CB+Pb sous l'influence de plomb, les feuilles produisent plus de Malondialdéhyde, ces sols présentent une différence significative et hautement significative avec les feuilles de la plante témoin, la différence hautement significative caractérise aussi les racines des plantes traité par SCA et SCA+CB .



A

B

**Figure 37:** Effet de la co-inoculation avec des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR) sur le MDA des plantes de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées (A: en présence de cadmium, B : en présence de plomb).

### 1.14 Effet de la co inoculation par la PGPR sur la teneur en phénols totaux chez *Triticum durum*

Les résultats statistique montre que les différents traitement influent des plusieurs manières :

(sol): effet hautement significative ( $P \leq 0.01$ ) par apport les plantules traité avec cadmium et aucun effet dans le cas des plantules traité par plomb

(Organe): effet très hautement significative ( $P \leq 0.0001$ ) par apport les plantes stressé par plomb et cadmium.

(Sol.organe) : effet significative ( $P \leq 0.05$ ) par apport les plantules traité par cadmium comparativement aux cadmium qui enregistré une effet très hautement significative.

## chapitre 02 Résultats et discussion

**Tableau 38:** Analyse type II de la teneur en phénols totaux de *Triticum durum* stressé par le plomb

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
sol	8	2,409	0,301	1,812	0,111
Organe	1	104,855	104,855	630,705	<, 0001
Sol*Organe	6	6,463	1,077	6,479	0,000

**Tableau 39:** Analyse type II de la teneur en phénols totaux de *Triticum durum* stressé par le cadmium

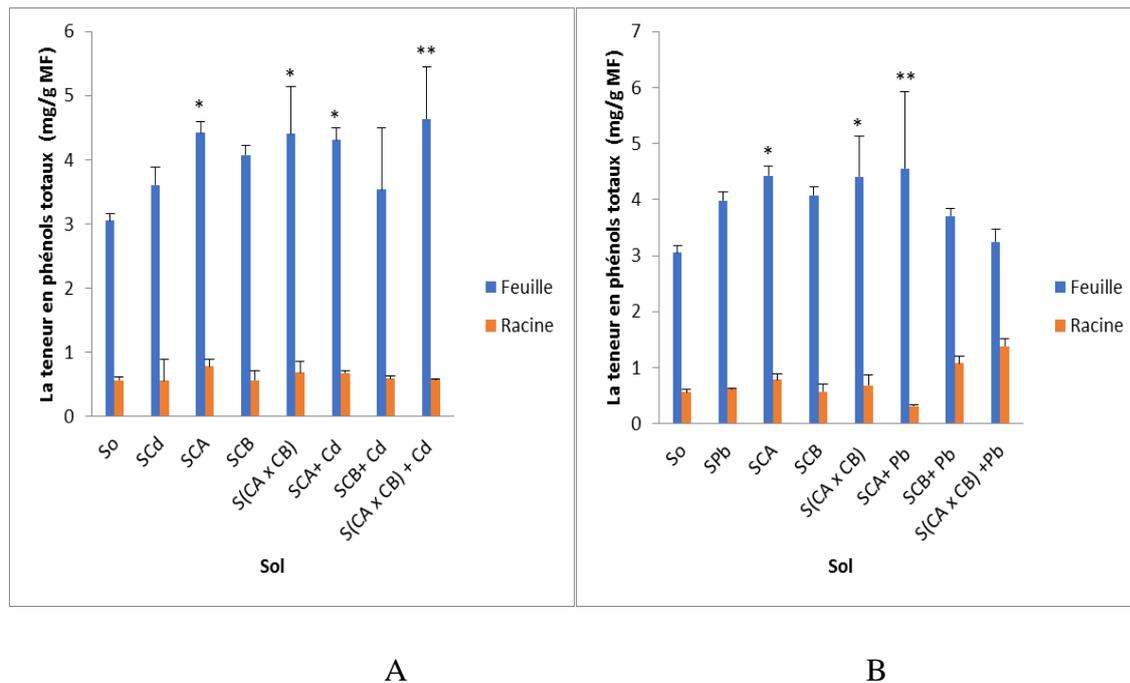
Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Sol	7	3,744	0,535	3,449	0,007
Organe	1	137,153	137,153	884,302	<, 0001
Sol*Organe	7	2,717	0,388	2,502	0,036

Selon la figure 38 (38A, 38B), la teneur en phénol totaux diminue au niveau des racines (1 mg/g MF).

Au niveau foliaire, le traitement par les bactéries isolées de partie racinaire du *Peganum harmala*, augmentée a manière significative le teneur des plantes par apport au témoins.

L'influence du bactéries SCA×SCB+Cd et SCA+Pb a eu un effet marqué sur le taux de phénol totaux au niveau des feuilles de blé dur qui augmente de manière hautement significative et manière significative par apport SCA×SCB .

En parallèle, l'impact de stress cadmique sur les plantes inoculés par SCA enregistré une augmentation significative par rapport au témoins .



**Figure 38:** Effet de la co-inoculation avec des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR) sur la teneur en flavonoïde des plantes de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées (A: en présence de cadmium, B : en présence de plomb).

### 1.15 Effet de la co inoculation par la PGPR sur la teneur en flavonoïdes chez *Triticum durum*

Les résultats statistique montre que les différents traitement influent des plusieurs manières :

(sol): effet très hautement significative ( $P \leq 0.0001$ ) par apport les plantules traité avec cadmium et plomb.

(Organe): effet significative ( $P \leq 0.05$ ) par apport les plantes stressé par plomb et aucun effet ( $P 0.35$ ) dans le cas des plantules traité par cadmium.

(Sol.organe) : effet très hautement significative ( $P \leq 0.0001$ ) par apport les plantules traité par cadmium et plomb .

## chapitre 02 Résultats et discussion

**Tableau40** : Analyse type II de la teneur en flavonoïdes de *Triticum durum* stressé par le cadmium

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Sol	7	4,507	0,644	34,943	< 0,0001
Organe	1	0,016	0,016	0,886	0,354
Sol*Organe	7	1,422	0,203	11,021	< 0,0001

**Tableau41** : Analyse type II de la teneur en flavonoïdes de *Triticum durum* stressé par le plomb

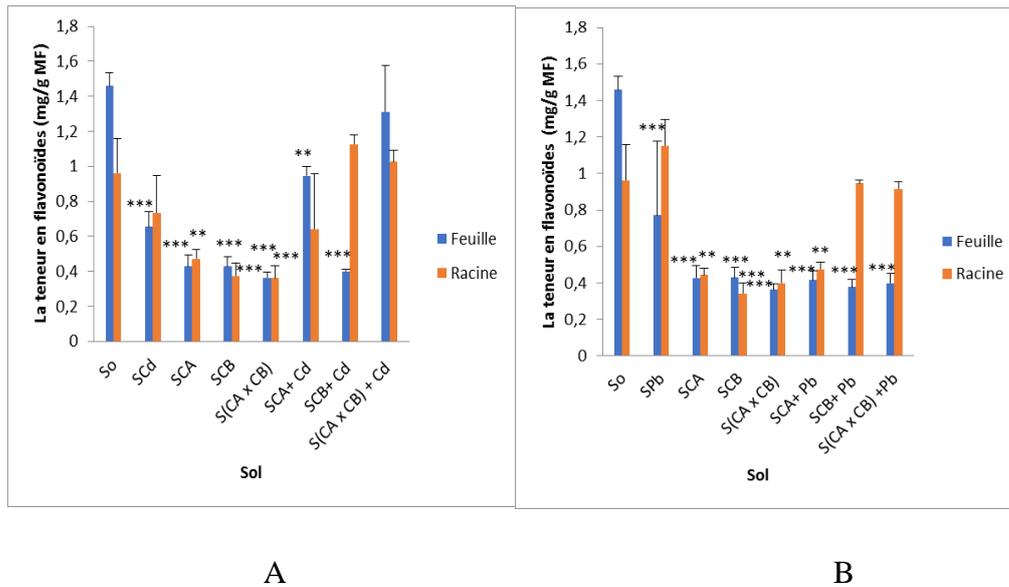
Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
sol	8	3,955	0,494	30,458	< 0,0001
Organe	1	0,080	0,080	4,922	0,034
Sol*Organe	6	1,189	0,198	12,213	< 0,0001

Les moyennes des teneurs en flavonoïde ont été illustrées dans la **figure 40 (40A et 40B)**, la comparaison de ces moyennes avec le témoin (S0) nous permet de constater des différents résultats :

Selon la partie aérienne et racinaire, les plantes traité par SCA, SCB, SCA×CB, enregistré une diminution très hautement significative par rapport au témoins.

Les mêmes observations ont été notées chez plantes inoculés par SCA+Cd, SCB+Cd, SCB+Pb, où le métal a provoqué une diminution hautement significative à très hautement significative de la teneur en flavonides passant de **(0,41 mg/g MF)** chez les plantes témoins **(1,45 mg/g MF)** )

La figure **39 B** qui montre les résultats des plantes traités par SCA×CB en présence de plomb, les valeurs moyennes qui ont été comparées avec le témoin révèlent l'existence d'une différence très hautement significative dans les feuilles tandis que les racines qu'aucune effet significative .



**Figure 39:** Effet de la co-inoculation avec des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR) sur la teneur en flavonoïde des plantes de *Triticum durum* cultivées dans des conditions contrôlées (A: en présence de cadmium, B : en présence de plomb).

### 1.16 Effet de la co-inoculation par la PGPR sur les propriétés physicochimiques du sol

Les résultats obtenus sur les caractéristiques physiques et chimique du sol contaminé avec le cadmium et plomb indiquent qu'il s'agit d'un sol légèrement salé a salé, Ce sol présent une teneur de PH neutre {6.91; 7.21 } dans le cas de plantule traité par cadmium et plomb

## Résultats et discussion

**Tableau 42:** présent les résultats des analyses physique et chimique du sol et leur interprétation et leur classe de la qualité

L'analyse de sol	ph		Conductivité		Type de sol		Qualité de sol	
	Cadmium	Plomb	Cadmium	Plomb	Cadmium	Plomb	Cadmium	Plomb
S0	7.08 ±0.07	7.088±0.071	681.16±250.57	681.167±250.578	Neutre	Neutre	Légèrement salé	Légèrement salé
S (CA.CB)	7.21±0.03	7.025±0.205	882.16±75.79	987.167±200.191	Neutre	Neutre	Légèrement salé	Légèrement salé
S (CA .CB)+Cd/ pb	7.08±0.005	7.090±0.075	557.33±30.50	1184.667±182.582	Neutre	Neutre	Légèrement salé	salé
SCA	7.09±0.07	7.208±0.133	1184.66±182.8 *	785±88.878 *	Neutre	Neutre	salé	Légèrement salé
SCA+Cd/ pb	7.16±0.013	7.213±0.037	806.66±303.75	882.167±75.798	Neutre	Neutre	Légèrement salé	Légèrement salé
SCB	7.20±0.13	7.092±0.066	785±88.87	946.500±190.549	Neutre	Neutre	Légèrement salé	Légèrement salé
SCB+Cd/ pb	7.13±0.07	7.188±0.114	835.83±294.88	972.500±112.573	Neutre	Neutre	Légèrement salé	Légèrement salé
S Cd/ pb	6.91 ± 0.05 *	7.167±0.150	1079±150.53	890±101.869	Neutre	Neutre	salé	Légèrement salé

## Résultats et discussion

- **PH**

L'analyse de la variance (tableau 43) montre que les différents traitements influent de manière

significative ( $P < 0.005$ ) sur le pH de *Triticum durum* Stressé avec le cadmium, et aucun effet significatif ( $P = 0.4$ ) par rapport aux plantules stressées avec le plomb (tableaux 44)

**Tableau 43:** Analyse de la variance de PH de *Triticum durum* stressé par Cadmium

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
pH	7	0,195	0,028	5,934	0,002
Erreur	16	0,075	0,005		
Total corrigé	23	0,270			

**Tableau 44:** Analyse de la variance de PH de *Triticum durum* stressé par plomb

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	7	0,101	0,014	1,032	0,447
Erreur	16	0,223	0,014		
Total corrigé	23	0,323			

- **Conductivité**

L'analyse de la variance (tableau 45) montre que les différents traitements influent de manière significative ( $P < 0.05$ ) sur la conductivité électrique de *Triticum durum* Stressé avec le cadmium, et aucun effet significatif ( $P = 0.57$ ) par rapport aux plantules stressées avec le plomb (tableaux 46).

## Résultats et discussion

**Tableau 45:** Analyse de la variance de conductivité de *Triticum durum* stressé par Cadmium.

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
CE	7	857765,740	122537,963	3,136	0,028
Erreur	16	625178,500	39073,656		
Total corrigé	23	1482944,240			

**Tableau 46:** Analyse de la variance de conductivité électrique de *Triticum durum* stressé par plomb.

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	7	466491,573	66641,653	2,548	0,057
Erreur	16	418411,667	26150,729		
Total corrigé	23	884903,240			

## Résultats et discussion

**Tableau 47.** Récapitulatif des données les plus marquantes obtenues au cours de cette étude, concernant l' effet de co-inoculation par PGPR sur la croissance de *Triticum durum*, au présence de métaux lourds : Pb (800ppm) ; Cd (12ppm)

Paramètres étudiés			Consortium A		Consortium B		Consortium A . B		
			Cd	Pb	Cd	Pb	Cd	Pb	
Croissance	Biométrie	Taux de germination	↗ +	↗ +	↗ ++	↗ ++	↗ +	↗ ++	
		Nombre de feuille	↗ + ++	↗ ++	E NS	E NS	↗ ++ +	↗ +	
		Nombre de racine	↗ +	↗ ++	E NS	E NS	↗ +	E NS	
		Longueur partie aérienne	E NS	E NS	E NS	E NS	E NS	E NS	
		Longueur partie racinaire	E NS	E NS	E NS	E NS	E NS	E NS	
		Poids frais	F	↗ + ++	↗ ++ +	E NS	↗ ++ +	↗ ++ +	↗ ++ +
			R	E NS	E NS	E NS	E NS	E NS	E NS
		Poids sec	F	E NS	E NS	E NS	E NS	E NS	↗ +
			R	E NS	E NS	E NS	E NS	E NS	E NS
		Teneur en eau		E NS	E NS	↗ ++ +	E NS	E NS	E NS
		Surface foliaire		↗ +	↗ ++	E NS	↗ ++	↗ ++ +	↗ +
Caractéristiques Biochimiques	Chlorophylle		↗ + +	E NS	E NS	E NS	↗ ++	E NS	
	la teneur Sucre solubles	F	↗ + ++	↗ ++	↗ ++ +	E NS	↗ ++ +	↗ ++ +	
		R	↗ + ++	↗ ++ +	↗ ++ +	↗ +	↗ ++ +	↗ ++ +	

## Résultats et discussion

	la teneur en protéine		F	ENS	↗ ++ +	↗ +	↗ ++	↗ ++ +	↗ +	
			R	ENS	EN	ENS	↘	ENS	↘	
	malondialdéhyde		F	ENS	↗ +	ENS	↗ +	↘	↗ ++ +	
			R	↗ +	ENS	ENS	ENS	↗ ++ +	ENS	
	Polyphénols		Phénols totaux	F	↗ +	↗ ++	ENS	ENS	↗ ++	ENS
				R	ENS	ENS	ENS	ENS	ENS	ENS
			flavonoïdes	F	↗ + +	↘	↘	↘	ENS	↘
				R	ENS	↘	ENS	ENS	ENS	ENS

- ↗ : Augmentation
- ↘ : Réduction
- ++++ : Effet très hautement significative de mix inoculation par les PGPR
- ++ : Effet hautement significative de mix inoculation par PGPR
- + : Effet significative de mix inoculation par PGPR
- ENS : Effet non significative

### 2. Discussion

En premier lieu, nous avons étudié l'effet de la co-inoculation par les PGPR *sur la croissance de blé dur* *Triticum durum* (variété Ain lahma). Pour cela, nous avons évalué différents paramètres physiologiques et biochimiques. 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**).

Le premier paramètre mesuré est la germination, celle-ci représente un processus complexe considéré comme fortement affecté par la présence d'un excès de métaux lourds. De plus, le pourcentage de germination peut être considéré comme reflétant à l'effet de co inoculation par les rhizobactéries . Les résultats obtenus avec les effets des éléments toxiques cadmium et plomb sur le pourcentage de germination montrent que ce dernier augmente proportionnellement pour les plantules sous traitements des bactéries isolées du sol et de racine de *piganum harmala* ; probable que ces bactéries faire des liaisons entre les groupes fonctionnels ou les composés dans la paroi cellulaire bactérienne se produire en tant que mécanismes de résistance aux métaux lourds (**Imron et al., 2021**) dans la phase de germination ; alors que le cadmium et plomb diminue (effet non significative) le taux de germination de plantule (Spb) pour atteindre un taux proche de celui de témoin (S0). L'effet inhibiteur du plomb sur la germination a été souligné par plusieurs auteurs (**Rouibi et al., 1992**).

La diminution du pourcentage de la germination est due à l'effet inhibiteur du plomb, qui expliquer par (**Poschenreider et al., 1989 ; Vassilev et al., 1998**) diminution du taux de germination de plantes comme les graines de *Vigna unguiculata* peut être liée aux effets négatifs de métaux comme le Cd sur l'absorption et le mouvement de l'eau ; et Ce métal présente une affinité vis-à-vis les protéines cellulaires, notamment les enzymes qui contrôlent le processus de la germination (**Shalini., 2003**).

De ce fait plusieurs travaux (**Belaidi., 2019**) montrent que Les concentrations élevées du plomb agissent négativement sur tous les paramètres germinatifs de *Moringa oleifera* L, entraînant une diminution non significative du taux final de germination des graines qui ont été traitées à différentes concentrations de plomb (3, 5, 7 et 10 ppm) où le taux de germination le plus élevé est enregistré en absence de plomb (100%)

## Résultats et discussion

---

La concentration ( $10^{-2}$  M) de cadmium inhibe la germination des graines du *Triticum durum* et de *Phaseolus vulgaris* et déshydrate les tissus (**Rouibi., 1992**). La concentration  $1000\mu\text{g/ml}$  réduit à 43,33% le pourcentage de la germination de *Brassica pekinensis* Cette même concentration inhibe l'élongation racinaire et réduit la biomasse (**Xiong., 1999**).

L'étude des mécanismes physiologiques assurant la survie des plantes dans des conditions d'excès de métaux lourds est devenue une urgence (**Jordan et al., 2002 ; Shevyakova et al., 2003**).

D'après les résultats de ce paramètre, nous remarquons que les métaux lourds réduit sous le traitement de PGPR, ça peut être s'expliquerait également par accéléré la formation lente des surfaces foliaires photosynthétiques qui est augmenté le flux des assimilais vers les tissus méristématiques en croissance le nombre de feuille (**Khan et al., 2017**).

Plusieurs travaux ont signalé que la réduction du nombre des racines et des feuilles de la plante est due aux effets toxiques des teneurs élevées de métaux lourds et au déséquilibre de la disponibilité en nutriment (**Datta et al., 2009**).

Parallèlement, le nombre de racines, semble peu ou pas affecter par les traitements à base de (Cd et Pb), en effet plusieurs auteurs s'accordent à dire que ce paramètre est peu représentatif du stress (**Salemaa., 2009; Soughir., 2018**).

Nos résultats ont montré que les deux traitement sous l'influence de cadmium et plomb présentent un comportement similaire pour ce paramètre .Cependant, l'échantillon qui traité avec les bactéries isolées du racine de *piganum harmala* (consortium A) se montre plus productive (nombre racine) sous l'influence des métaux lourds que consortium B (bactéries isolées du sol), cela qui expliquer par la capacité de produire des signaux moléculaires stimulant la ramification du système racinaire sont documentés, comme le 2,4-diacétylphloroglucinol et l'oxyde nitrique produit par de nombreux bactéries, qui tous deux agissent via la voie de transduction de l'auxine (**Vacheron et al., 2017**) ; les PGPR peuvent aussi conduire à une modification du métabolisme racinaire de l'éthylène, par désamination bactérienne de son précurseur chez la plante (l'acide 1-aminocyclopropane carboxylique ; ACC). Cela conduit à une réduction de la concentration en éthylène dans les racines et à la répression de la croissance racinaire (**Vacheron et al., 2013**). Ça prouve l'activité et l'effet positif de bactéries isolées aux niveaux racinaire.

## Résultats et discussion

---

La longueur de cette partie est souvent utilisée comme bioindicateur de phytotoxicité des métaux lourds (**Silvia et al., 2009**).

L'influence du métaux lourds agissent négativement sur cette paramètre germinatifs de *Triticum durum*, entraînant une diminution non significative du longueur de la partie racinaire. Cette diminution serait peut être due aux interférences directes du cadmium avec les enzymes hydrolytiques qui jouent un rôle important dans le transport des aliments vers les racines primaires (**Mondal., 2013 et Parvaiz et al., 2016**).

Ces résultats sont en concordance avec des études précédentes documentent l'impact négatif des métaux lourds sur la croissance des racines chez *Raphanus sativus* (**Javed Akhtar et al., 2018**), *Oryza sativa* (**Aziz et al., 2015**), et *Typha domingensis* (**Akhtar et al., 2017**) traités par le Ni, de *Fagopyrum esculentum* sous l'effet de Zn (**Lee et al., 2013**), et de *Populus* sous l'action de Cd et Pb (**Ivana et al., 2017**). Le Cérium à provoqué aussi une réduction de la biomasse chez *Raphanus sativus* (**Zhang et al., 2015**), *Zea mays* (**Zhao et al., 2015**), et *Hordeum vulgare* L. (**Rico et al., 2015**).

En parallèle le traitement combiné des bactéries isolées du sol de *Peganum harmala* agit négativement du longueur racinaire (6cm) par apport les deux métaux lourds. Ceci pourrait être expliqué par le fait que les bactéries du sol seulement inhibent la croissance racinaire et inhibe la division et l'élongation cellulaire (**Cumberland et al., 2016**).

La longueur de cette partie est souvent utilisée comme résulte de la toxicité des élément tracs métallique (**Nugroho 2006**).

L'effet toxique du cadmium sur la croissance de la plante se manifeste par une réduction de la croissance des parties aériennes (**Ghnaya et al., 2005 ; Zorrig et al., 2010**).

Les résultats obtenus montrent une réduction en longueur de la partie aérienne sous l'influence de métaux . Nos résultats sont donc en adéquation avec ceux obtenus par (**Mergeay et al., 1995**) que il existe des microorganismes qui sont capables de survivre dans des milieux naturels contaminés par les métaux lourds à effet toxique mais ce dernier inhibe leur activité , (**Márquez- García et al., 2013**) diminue proportionnellement avec la dose de cadmium la partie aérienne des plantes stressée . Au niveau physiologique une

## Résultats et discussion

---

exposition au plomb entraîne des nombreuses perturbations (**Souahi et al., 2021 ; Souahi et al., 2017** ).

D'après les résultats, il est à déceler que les plantules traitées par les bactéries isolées au niveau du sol et de racine (*Peganum harmala*) en présence de métaux lourds ou en absence répondent de manière très hautement significative sur le poids frais des feuilles (partie aérienne), qui serait probablement due à l'un des mécanismes d'adaptation à la contrainte métallique qui est bien réparti l'ion Na<sup>+</sup> dans la vacuole (**Cheeseman., 1989**) et l'ajustement osmotique implique l'accumulation d'ions minéraux (K, Cl, Na) et/ou de solutés organiques comme la proline, la glycine-bétaine, les sucres, les protéines ; acides organiques, etc. (**Morgan., 1999**) cela augmente matière fraîche des feuilles . par contre on remarque une diminution considérable non significative dans partie racinaire, ceci pourrait s'expliquer que La réduction du poids frais en réponse au stress suggère fortement que dans des conditions stressantes, les plantes préfèrent consacrer plus d'énergie à la survie plutôt qu'à la croissance végétative (**Reekie et Avila-Sakar 2005**).

En parfait accord avec les résultats suivant de (**Yakoubi., 2014**) Diminue proportionnellement dans poids de partie racinaire des plantes stressées au cadmium comparativement au foliaire .Les racines sont également affectées par le cadmium, par conséquent le nombre de feuilles vivantes (**Neggaz., 2019**) une diminution assez conséquente du poids frais de la partie racinaire du radis traité par le Pb et l'interaction pb-Zn, contrairement à la partie aérienne ; aussi Ces résultats sont similaires à ceux rapportés dans plusieurs travaux signalent une réduction des poids frais et sec des différentes espèces végétales soumis au stress de Pb telles que *Pisum sativum* (**Kopittke et al., 2007**), *Raphanus sativus* (**Gopal et Rizvi., 2008**), et *Glumus etunicatum* et *Calopogonium mucunoides* (**Souza et al., 2012**), ou par d'autre métaux lourds comme le chrome dans *Cucumis melo* (**Akinci et al., 2010**), le cadmium chez *Raphanus sativus* et *Triticum aestivum* L. (**Anuradha ; Rao, 2007**), le cuivre chez *Raphanus sativus* (**Sun et al., 2010**), et le Pb, Zn et Cu chez *Atriplex canescens* (**Khedim., 2019**).

D'autre part, le poids sec des plantules est été affecté par le métal par L'augmentation de imino-acide chez le blé qui pourrait être associée à la déshydratation due au stress (**Karamanos et al., 1983**) entraînant une diminution de la production de la matière sèche et du contenu relatif en eau (**Tatar et Gevrek., 2008**).

## Résultats et discussion

---

les résultats ont montré que ce paramètre a diminué par rapport aux racines et observé une augmentation non significative dans la partie foliaire. Ce qui corrobore avec plusieurs travaux. La présente étude a montré que le poids sec de la partie racinaire a été davantage réduit que le poids sec des feuilles ; ce résultat est en accord avec ceux obtenus par plusieurs chercheurs (**Rawson., 1986 ; Rawson et al., ; 1988 ; Al-Khafaf et al.; 1990; Pessaraki et al., 1991 Kuiper et al., 1990 Munns et Sharp, 1993 ; Bchini et al., 2010**).

Une des premières réactions des plantes au stress est généralement de réduire leur surface foliaire, en générale, la photosynthèse diminue (**Seregin ; 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 capable d'altérer la structure et la composition des membranes des thylakoïdes (**Aidons et al., 1993**).

Les résultats de cette étude montrent que la présence de bactéries isolées aux niveaux de racine (PGPR) et du sol et en particulier l'interaction entre- eux (consortium A et B) affecté positivement la surface foliaire, en effet, plusieurs hypothèses ont été élaborées pour expliquer le mode d'action des bactéries sur les mouvements stomatiques. (**Polle ; Schützendübel., 2003**) suggèrent que la réduction de l'absorption de l'eau chez les plantes, en présence des métaux lourds, induit une surproduction de l'ABA qui va transmettre un signal vers les feuilles répondant par une fermeture de leurs stomates pour la protection de la membrane des feuilles et par le contrôle de sa concentration interne en ions (**Paquin et al., 2002**).

En revanche, le plomb peut entraîner 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 des pigments de la chlorophylle et des caroténoïdes (**Seregin ; Ivanov., 2000**) et limite considérablement les flux gazeux entre les feuilles et le milieu extérieur. Cette limitation du flux de CO<sub>2</sub> entrant est considérée comme la cause principale de la forte réduction de la fixation du CO<sub>2</sub> (**Bazar et al., 1975 ; Parys et al., 1998**), sans oublier que l'augmentation de la concentration de cadmium diminue la surface foliaire.

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

## Résultats et discussion

---

Selon (**El jaarari 2000**), la teneur relative en eau permet de décrire d'une manière globale le statut hydrique et d'évaluer l'aptitude des plantes à réaliser une osmorégulation et maintenir une turgescence cellulaire.

Les résultats obtenus révèlent que le stress métallique appliqué à la plante entraîne une diminution de la teneur en eau dans les feuilles à (**40%**) comparativement aux plantules inoculées par bactéries isolées au niveau racinaire et du sol de (*Peganum harmala*) qui est augmenté significativement où a été enregistré de taux (**170**). Ceci peut être justifié par la capacité des bactéries avec un mécanisme qui régule la diffusion de l'oxygène, les échanges entre milieu intra et extracellulaires et les molécules d'eau sont indispensables aux réactions biochimiques ; particulièrement la réaction d'hydrolyse qui intervient dans les processus de dégradation de polluants (**Bahmani et al., 2018**).

En revanche, le maintien de la teneur en eau plus élevée pour les plantes provoquée au plomb en comparaison au témoin et par apport des plantes traitées avec les bactéries où atteindre (**160**), serait probablement dû à une osmorégulation active, suite à la mise en place d'un mécanisme de tolérance au stress métallique, ou peut-être ces résultats sont en corrélation avec l'accumulation des métaux lourds dans la partie aérienne ou le Pb et le moins transloqué vers les parties aériennes comparativement au Cd, et cela la plante peut contrôler ses pertes d'eau ; cet effet peut résulter d'une régulation somatique efficace (**Brunet., 2008 ; Cheikh M'hamed et al., 2008**).

D'autres résultats publiés récemment par (**Bouchachi., 2018**) qu'il est noté une stimulation de la teneur relative en eau dans les plantes stressées que les plantes non stressées ont été remarquées, confirment également la pertinence des résultats que nous avons obtenus.

Ces résultats de diminution de la teneur relative en eau sont concordants avec ceux des travaux de (**Bouziati., 2012**), où il a observé une diminution de la teneur en eau sous l'effet du cadmium chez la fève (*Vicia faba L.*) ; et aussi sont similaires à ceux rapportés par (**Khedim., 2019**), où l'augmentation des doses de Pb, provoque une réduction de la teneur relative en eau d'*Atriplex canescens*. (**Zhang et al., 1999**).

De nombreuses études ont mis en évidence une perturbation importante du statut hydrique des plantes traitées aux métaux lourds. Elles ont principalement relevé une diminution de la transpiration, y compris à de faibles doses, ainsi qu'une diminution de la

## Résultats et discussion

---

teneur en eau (**Pourrut., 2008 ; Brunet et al., 2009**). En plus, les perturbations du statut hydrique conduisant à la fermeture des stomates (**Brunet et al., 2008**) suite à l'implication de la sécrétion de l'acide abscissique induit par la présence de plomb (**Parys et al., 1998 ; Atici et al., 2005**).

La quantité de la chlorophylle des feuilles peut être influencée par plusieurs stress abiotiques. (**Hikosaka et al., 2006**).

Nos résultats montrent une augmentation importante de la teneur en pigment chlorophyllien de blé dur (*Triticum durum*) exposées à différentes stress soit Pb (800ppm) ou Cd (12ppm) ; cette augmentation s'accroît à l'influence des bactéries isolées de la racine et du sol de *Peganum harmala* par rapport aux témoins qui serait probablement due à un mécanisme de biosorption qui absorbent ces ions métalliques permettent de réduire leur concentration dans le milieu et protection le système de conduction de l'eau (**Ayangbenro et Babalola., 2017**); 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 pigment chlorophylles. Ceci pourrait être attribué d'une part, au stress métallique qui provoque l'inhibition de l'acide amino lévulinique déshydratase (ALAD) une enzyme importante dans la biosynthèse de la chlorophylle (**Pereira et al., 2006**) et d'autre part, le cadmium 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 et al., 2000**) et aussi Cette diminution de la teneur en chlorophylles peut être attribuée également à une déficience en oligo-éléments notamment le fer (**Breckle et al, 1992 ; Redondo-Gómez et al., 2010**), La réduction de chlorophylle peut être attribuée à l'anomalie des stomates (**Ying et al., 2010**).

Des études similaires ont montré que la teneur en chlorophylle est réduite sous l'effet du Pb chez *Raphanus sativus* (**Gopal et al., 2008 ; Sun et al., 2010 ; Biteur 2012**), de Cd chez *Zea mays*, *pfaffia glomerata* et *Raphanus sativus* (**Jain et al., 2007 ; El-Beltagi et al., 2010**), de Cu chez *Raphanus sativus* (**Sun et al., 2010**). de Cd dans l'*Atriplex halimus* (**Mesnoui, 2017**), de Zn chez *Arabidopsis* (**Wang et al., 2015**). Le Cd peut entraîner aussi des effets inhibiteurs sur l'appareil photosynthétique des plantes même à de très faibles doses (**Di cagno et al., 1999; Liu et al., 2012**). (**Rico et al., (2013)**).

## Résultats et discussion

---

Dans la présente étude, nous nous sommes intéressés aussi à la teneur de protéines solubles, ce dernier jouent un rôle important dans tous les systèmes vivants (**Basile et al., 2013**). Tout changement physiologique ou biochimique, qu'il soit négatif ou positif, se fera par altération de l'activité des protéines. (**Kriz 1989 ; Xiang et al., 2013**). Les résultats de cette étude montrent une augmentation en protéines dans les feuilles des plantes inoculés sous stress cadmique et plombique, c'est-à-dire que la synthèse des protéines de stress qui participent à la détoxification cellulaire a été induite sous l'influence des bactéries rhizosphérique (**Sabatini et al., 2009**). Il a été démontré que les plantes peuvent résister à la toxicité des métaux lourds par les PGPR et en augmentant la teneur en protéines solubles (**Noctor., 2006**). L'augmentation de ces derniers cela s'expliquerait également par la perméabilité cellulaire et le nombre de protéines fonctionnelles, ce qui permet de maintenir le métabolisme normal des cellules (**Jing Hou et al., 2018**), et est également probable que ces bactéries aient inhibe une peroxydation lipidique et une fragmentation des protéines en raison des effets toxiques des espèces réactives de l'oxygène qui ont entraîné une réduction de la teneur en protéines (**Aravind et al., 2005**). ; Contrairement aux racines, la quantité de protéines chez les racines diminue en fonction de stress, peut être causé par une dégradation accrue des protéines à la suite d'une augmentation de l'activité de la protéase, qui s'accroît sous l'effet du métal. Nos résultats sont en corrélation avec ceux obtenus par plusieurs chercheurs (**Rai et al., 1983; Kumar., 1991**) ces derniers rapportent que le stress peut provoquer une baisse ou une augmentation des protéines totales. L'accumulation des protéines totales chez les plantes exposées au Cd semble être répandue (**Zhao., 2011; Siddique et al., 2012; El beltagi., 2013**).

Les protéines de stress jouent un rôle dans l'adaptation de la plante (**Lamaze et al., 1994**). Quand une plante est soumise à n'importe quel facteur de stress biotique ou abiotique; Ceci s'expliquerait par le fait que la présence des xénobiotiques à l'intérieur des tissus stimule la synthèse protéique de nombreuses enzymes entre autres celles intervenant dans la détoxification ceci est en parfait accord avec les résultats de (**Shraddha et al., 2004**) qui montrent que l'accumulation des protéines dans les racines et les feuilles de tomate est proportionnelle à celle du métal.

d'autres résultats sur l'augmentation de teneur en protéines totales publiés récemment par (**Mishra et al., 2006**), confirment également la pertinence des résultats que nous avons obtenues puisqu'ils observent une augmentation de la teneur en protéines dans

## Résultats et discussion

---

les feuilles des plantes stressées de par rapport au témoin. Nos résultats sont concordants avec ceux des travaux de **(Bajguz., 2011)**.

En effet, l'accumulation des protéines durant le stress métallique peut fournir des réserves en azote (N) qui seront utilisés ultérieurement pour contribuer à l'osmorégulation **(Parvaiz et al., 2016)**. D'autres travaux **(Wollgieh et al., 1995)** reportent l'induction des protéines spécifiques au choc thermique sous l'effet d'un stress métallique qui montre leur rôle dans la réponse adaptative. **(Salt et al., 2003)**, En revanche, l'augmentation du taux de protéines enregistré dans notre étude suggère que le mix inoculation avec les bactéries isolées du sol et de la racine de *piganum harmala* qui serait probablement due l'exposition des plants à différentes inoculum provoquer une augmentation de la synthèse des protéines particulièrement des phytochélatines dont le rôle est la détoxification, indiquent que ce dernier bénéficiant à la plante lorsque l'impact de ces phénomènes augmente anormalement dans la partie aérienne.

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., 2009)**. C'est une composante importante de l'ajustement osmotique observée chez l'orge et de nombreuses espèces cultivées.

Nos résultats ont également montré que le présence des rhizobactéries, entraine une forte augmentation (très hautement significative) de le teneur en sucres solubles des feuilles et des racines dans les deux traitement étudiées, cela justifié que les bactéries influence l'accumulation des certains solutés tels que les sucres pour ajuster leur potentiel osmotique interne, cette accumule des métaux par des pompes et des canaux ioniques, endocytose ou par une perméation lipidique à travers la membrane externe **(Satyapal et al., 2016)**.

Nos résultats sont donc en adéquation avec ceux de **(Wingler, 2002 ; Leatherwood, 2005; Ottow et al., 2005 ; Basia., 2005)** Les sucres totaux solubles incluent les sucres simples comme le saccharose, le glucose, le fructane, le fructose et le tréhalose et les sucres complexes comme la famille des raffinose oligosaccharides (RFOs) et les polyols qui ont les propriétés d'osmoprotecteur et d'antioxydant Les sucres solubles peuvent jouer un rôle dans la protection des chlorophylles et des caroténoïdes contre l'agressivité du

## Résultats et discussion

---

stress métallique (**Azouz et al., 2011**). Ceci est prouvé par la corrélation significative entre la teneur en sucre.

par contre enregistrée une légère diminution non significative de la teneur en sucre par les plantules inoculés et en absence de métal, ceci pourrait être indiquent que le manque de polluant inhibe l'activité de certains bactéries et augmenté au niveau élevé de pollution, était probablement dû à la structure génétique de la bactérie Les résultats de (**KERMANSHAHI et al. (2007)**).

Ces résultats de diminution sont en concordance avec des plusieurs études diminution est causée par la toxicité de cadmium et de Plomb car ils manifestent principalement à travers la rhizotoxicité (**Woolhouse., 1981 ; Kabataz et al ., 1992 ; Marschner 1995**), parce qu'ils empêchent le transport des nutriments à partir des cotylédons, réduit le taux d'acides aminés dans les cotylédons par l'inhibition de la protéolyse, diminue le transport des sucres et des carbohydrates vers les cellules en croissance, et inhibe les amylases et phosphatases (**Chatterjee et al., 2004 ; Sharma et Dubey et al., 2005 ; Mihoub et al., 2005 ; Gopal et al 2008**). D'autre étude réalisée par **Ialelou et al., (2013)** montre que la diminution des taux de sucres solubles pourrait être due par la capacité des plantes de stocker des sucres simples sous forme de sucres complexes dans des conditions de stress.

Parallèlement à la diminution de la teneur en malondialdehyde (MDA) du feuille sous l'effet du stress métallique (diminue significative), une augmentation de la teneur a été enregistrée chez les racines.

Nos résultats montre qu'au niveau foliaire, peut-être que les bactéries capable de tolérer la toxicité de ces produits par son système antioxydant. Il ressort que l'augmentation du stress oxydatif, évalué par le taux de l'MDA, tandis que l'accumulation de ce dernier varie selon le traitement et type de métaux lourds .

Le MDA, est l'un des produits finaux de la peroxydation des lipides membranaires (**Ohkawa et al. 1979 ; Guichardant et al. 1994**). Cette peroxydation est le symptôme le plus attribué aux dommages oxydatifs ; il est souvent employé comme indicateur du stress (**Zhang & Kirkham 1994**). Le dosage de la MDA est un moyen efficace pour évaluer les dommages du stress sur la membrane (**Katsuhara et al. 2005**).

## Résultats et discussion

---

La peroxydation des lipides membranaires serait associée à un défaut de fonctionnement du système de détoxification, qui pourrait mener aux dommages des composants cellulaires principaux (**Monk et al. 1989 ; Jiang., 2001**). Une telle réponse est rapportée sous l'effet du déficit hydrique chez la luzerne (**Irigoyen et al. 1992**), le blé (**Zhang.,1994**) et quelques graminées (**Jiang.,2001**).

ceci est en parfait accord avec les résultats suivant Il a été pendant longtemps que les MDA jouaient un rôle d'indicateur de stress abiotique par conséquent il peut être utilisé comme bio marqueur du stress (**Ladhar chaabouni et al.2007 ; Funes et al., 2005 ; Giguère et al., 2003**). Comparativement à la littérature les stress environnementales provoquent une accumulation de MDA qui permet de monté cette dernière soit racinaire pour certains auteurs (**Dixit et al .; 2001 ; Mishra etr al .; 2006**) soit foliaire (**Yannarelli et al .; 2006 ; lui et al .; 2007**).

En conclure que La teneur en MDA varie d'une variété a une autre et d'un organe a un autre (**Pourrut.,2018**).

Les résultats obtenus dans ce travail révèlent une augmentation de la teneur en polyphénols dans la partie aérienne qui est sous l'influence de métal Pb et cd (feuille) du plantule de blé dur traitées par les bactéries isolées au niveau du sol et de racine (*Peganum harmala*). Cela nous s'expliquant que L'accumulation de polyphénols est expliquée par la stimulation de la production de polyphénol-oxydase qui est une enzyme clé de la voie métabolique conduisant à la formation des polyphénols (**Tuna et al., 2008**).

Ces résultats sont en conformité avec plusieurs travaux enregistrent une augmentation de la teneur en polyphénols chez *Latuca sativa* (**Sofo et al., 2018**), l'*Atriplex halimus* (**Belarbi, 2018**), *Vallisneria natans* (**Chao Wang et al., 2011**) sous l'action de plomb, chez *Echuim Vulgare L.* sous stress de Pb et Zn (**Slowomir Dresher et al., 2017**), chez *Ginsing Pnanax* sous l'effet de Cu (**Ali et al., 2006**), chez *Kandelia obovata* après 7 jours de traitement avec le plomb et le Mg (**Zhong zheng et al., 2011**), et chez *Vaccinium corymbosum L.* sous l'effet d'Al et Cd (**Manquián-cerdaa et al., 2016**). Une augmentation de la teneur en polyphénols est marquée aussi chez *Raphanus sativus* stressé par Cu et Pb (**Tomislav et al., 2008**), *Aeluropus littoralis* sous stress de Pb, Co, Cd, Ag (**Rastgoo et al., 2011**), et chez *Vicia faba* soumis à différentes concentrations de Hg (**Benahmed., 2010**).

## Résultats et discussion

---

En parallèle, en enregistré une diminution dans la racine sous l'effet de métaux lourds en présence ou absence des PGPR (effet sévère de l'élément très métallique). Cela pourrait être dû par le niveau de stress déclenché dans les différents organes de la plante ; ce qui montre que l'effet des métaux lourds n'est pas seulement dose-dépendant, mais aussi organo-dépendant. (**Waśkiewicz et al., 2013**).

d'autres travaux ont signalé aussi la diminution des composés phénoliques chez *Mesembryanthemum edule* L. (**Fallah et al., 2012**), Romaine lettuce (**Chisari et al., 2010**), *Solanum pennellii* (**Frery et al., 2010**) et *Lunaria scolumus* L. (**Rezazadeh et al., 2012**)

Ainsi, dans certaines études, il n'est pas totalement prouvé que l'accumulation des composés phénoliques pour les plantes stressées résulte effectivement d'une augmentation de la synthèse des métabolites, elle peut être due à une augmentation supposée de la concentration qui est un effet de la réduction de la biomasse végétale (**Khan et al., 2011**).

Les flavonoïdes interviennent en tant que molécules antioxydantes qui assurent la fixation des ERO (**Lovdal et al., 2010**). Ces derniers sont considérés par (**Morris., 1995**) comme des bons chélateurs de métaux lourds. Il a été observé que les gènes responsables de la biosynthèse des flavonoïdes sont également induits par le stress (**Winkel-Shirley., 2002 ; Gill., 2010**).

Les résultats obtenus dans ce travail révèlent une augmentation de la teneur en flavonoïdes dans la partie aérienne sous stress métallique. Cela s'expliquerait également par l'un des mécanismes bactériens pour éliminer le polluant. L'accumulation d'un excès de radicaux libres et d'espèces réactives de l'oxygène induite par le stress métallique pourrait être une raison de la production massive des polyphénols et flavonoïdes afin de maintenir le stress oxydatif déclenché par la présence de ces ERO dans les plantes (**Shahid et al., 2014**) Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par **Rahim Guealia (2019)**, cette augmentation est enregistrée aussi chez *Sesuvium portulacastrum* (**Ines et al., 2016**), *Zea mays* (**Lépengué et al., 2012**), *Prosopis strombulifera* (**Reginato., 2014**).

Au niveau racinaire, nous remarquons que la teneur en flavonoïdes diminue en présence de métaux lourds, qui peut être inhibée l'activité des PGPR et diminue la synthèse des osmorégulateurs et des composés antioxydants.

**Conclusion**

**Et perspective**

## Conclusion et perspective

---

### CONCLUSION

Devant l'impossibilité et les limites des techniques classiques (physiques et/ou chimiques) dans les processus de dépollution, le recours aux potentialités microbiennes existantes dans le sol est une voie salubre qui pourra participer, même à titre partiel, dans l'atténuation des niveaux de la pollution. Les micro-organismes notamment les bactéries ont élaboré plusieurs mécanismes de résistance aux métaux lourds.

Cette étude expérimentale a été entreprise dans le but d'étudier l'effet de la bioremédiation sur les propriétés morphologiques-physiologique et biochimique de blé dur dans un sol contaminé. Les résultats obtenus nous permettent de tirer les conclusions suivantes.

◇ L'efficacité du traitement suite à une diminution de polluant dans le sol. Cette efficacité se traduit, d'une part, qui est exprimée par l'augmentation du taux de germination du blé dur, qui est passé de 98% dans le sol traité.

◇ en absence de les bactéries rhizosphérique l'exposition du plomb et cadmium provoque une perturbation qui affecte les processus biochimiques des blé dur.

◇ la bioremediation permette de connaître des microorganismes (GPR) qui sont capables de survivre dans des milieux naturels contaminés par les métaux lourds à effet toxique (Cadmium/ Plomb), même à une forte exposition (12ppm) (800ppm).

◇ les PGPR sont des agent de biocontrôle et de Bioremediation.

◇ la présence de PGPR rendre Le pouvoir de blé dur (plante hyper accumulatrice) sous l'influence de métaux lourds.

◇ l'efficacité du traitement avec les consortium varie selon l'impact des élément tracs métallique, d'une part, possédant un avantage de spécificité sur les paramètre étudié durant les stress abiotiques.

◇ ces résultats suggèrent que ces souches posséderait un potentiel intéressant d'utilisation dans des essais appliqués l'inoculation dans des endroits extrêmement contaminés par les métaux lourds.

- D'étudier l'effet combiné des bactéries, vu que:

## Conclusion et perspective

---

◇ taux de germination, nombre de feuille, poids frais, surface foliaire, chlorophylle, teneur en sucre, MDA, phénols totaux, flavonoïde: **fortement influencé par les bactéries isolées des racines de (Peganum harmala).**

◇ taux de germination, poids frais, TRE, surface foliaire, teneur en sucre, protéine, MDA : **fortement influencé par bactéries isolées du sol de Peganum harmala.**

◇ taux de germination, poids frais, TRE, surface foliaire, teneur en sucre, protéine, MDA.

◇ nombre de feuille n nombre de racine, poids sec,, chlorophylle, phénol totaux : **fortement influencé par l'interaction entre bactéries du sol et racine.**

◇ nous avons constaté que la bioremédiation (méthode de traitement biologique) peut être une solution optimale pour le problème de la contamination des sols par les métaux lourds et à l'avenir, il est permis d'espérer que la compréhension du fonctionnement de la rhizosphère apporté par ce type d'études permettra d'identifier plus précisément les effets feed-back sur la plante induits par l'activité de la microflore rhizosphérique.

## Conclusion et perspective

---

### Perspectives

Pour la continuité de ce travail, nous pouvant proposer quelques perspectives afin d'apporter de nouvelles informations sur le comportement des plantes vis-à-vis les différentes contraintes environnementales, pour cela il est nécessaire :

Des essais à l'échelle moléculaire sont nécessaires pour sélectionner des gènes de résistances aux métaux lourds, afin de favoriser leur transfert horizontal entre les bactéries du sol.

très important aussi d'utilisé le pouvoir génétique pour améliorer les capacités des plantes à tolérer les contraintes environnementaux, et ce par l'étude de plusieurs espèces qui est connus par leurs pouvoir phytoremédiateur et leurs tolérances au stress abiotiques, et ce par l'hybridation entre ces espèces, et l'intégration des gènes responsable à la tolérance d'une espèce dans l'autre.

- Il serait important d'augmenter les concentrations en Cd pour évaluer la réponse de cette espèce potentiellement phytoremédiate vis-à-vis des sols très polluants.
- De déterminer le pouvoir phytomremédiateur de *Triticum durum* . aux autres métaux lourds les plus toxiques pour les êtres vivants tel que : e Cr, le Ni, et l'U.
- Engager des études de suivi de l'efficacité et des possibilités de la bioremédiation à long terme
- Il serait aussi souhaitable de sélectionner et d'identifier et tester les capacités de souches bactériennes sélectionnées au préalable sur des critères génétiques, écologiques, métaboliques et fonctionnelles en bioremédiation.
- Identification de la meilleure combinaison entre les différents microorganismes symbiotiques (rhizobium-mycorhize-bactérie à effet PGPR) pour une une meilleure tolérance aux facteurs abiotiques et biotiques qui peuvent perturber le rendement du blé dur.
- améliorés Les mécanismes métaboliques de dégradation des polluants notamment en utilisant le potentiel de bioremédiation des microorganismes génétiquement modifiés
- Penser au jumelage d'autres techniques de bioremediation en appliquant notamment la phytoremédiation comme technique de finition.
- L'identification avec précision des souches bactérienne par séquençage à l'ARN 16s.

## Conclusion et perspective

---

- une étude du profil protéique de ces isolats bactériens avec la technique du SDS-PAGE en présence et en absence de ces métaux lourds serait d'un grand intérêt pour la révélation de l'effet de ces métaux lourds sur l'expression des protéines bactériennes.
- Une application de ces souches dans des sites pollués afin d'évaluer leur potentiel en bioremédiation (in vivo).

**Références**  
**bibliographie**

**Références bibliographie**

**A**

**Abou-Elwafa et al., 2019 ; SF., AA., Amin, T., Shehzad. 2019.** Genetic mapping and transcriptional profiling of phyto remediation and heavy metals responsive genes in sorghum. *Ecotox. Environ. Safe*, 173, pp. 366-372.

**Adriano, DC. 2001.** Trace elements in terrestrial environments: biogeochemistry, bioavailability and risks of metals. Springer-Verlag, New York, Berlin, Heidelberg.

**Akbar, S., Sultan, S. 2016.** Soil bacteria showing a potential of chlorpyrifos degradation and plant growth enhancement. *Brazilian Journal of Microbiology*, 47(3), DOI:10.1016/j.bjm.2016.04.009.

**Almansouri, M., Kinet, JM., and Lutts, S. 1999.** Compared effects of sudden and progressive impositions of salt stress in three durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivars. *J. Plant Physiol.* 154, 743–752.

**Arab, J., Chem. 2019.** Remediation of metalliferous soils through the heavy metal resistant plant growth promoting bacteria: paradigms and prospects, 12 (7), pp. 1365-1377 DOI: 10.1016/j.arabjc.2014.11.0.

**Aradshaw , M., Mcneilly, T., and Alice, AD. 1987.** Selection and heritability of tolerance to sodium chloride in four forage species. *Crop Sci.* 27, 232–234.

**Assmio, and Rao. 2020.** Accumulation of metals, antioxidant activity, growth and yield attributes of mustard (*Brassica juncea* L.) grown on soil amendments with fly ash together with inorganic nitrogen fertilizer *Acta Physiol. Plant.*, 42 (9) (2020), pp. 1-13, 10.1007/s11738-020-03139-4.

**Azubuiké, CC., Chikere, CB., Okpokwasili, GC. 2018.** Bioremediation techniques–classification based on site of application: Principles, advantages, limitations and prospects. WorldJ. Microbiol. Biotechnol.32, e180.

**B**

**Bergseng, E., Xia, J., Kimn, CY., Khosla, C., and Sollid, LM. 2005.** Main chain hydrogen bond interactions in the binding of proline- rich gluten peptides to the celiac disease-associated HLA-DQ2 molecule. J. Biol. Chem. 280:21791-21796.

**Bezzala. 2005.** Essai d'introduction de l'arganier (*argania spinosa*(L)Skeels) dans la zone de M'doukel et évaluation de quelques paramètres de résistance à la sécheresse . Thèse Magistère en Sciences Agronomiques, Foret et conservation des sols . Université EL HADJLAKHDAR , p 143.

**Biomnis. 2012.** Cadmium. Précis de biopathologie analyses médicales spécialisées, pp 01.

**Bonjean, A., et Picard, E. 1991.** « Les céréales à paille. Origine - histoire - économie - sélection », Ligugé, Poitiers AUBIN imprimeur.

**Bouaziz, A., and Hicks, DR. 1990.** Consumption of wheat seed reserves during germination and early growth as affected by soil water potential. Plant Soil 128, 161–165.

**Bozzini, A. 1988.** « Origin, distribution, and production of durum wheat in the world » Dans Fabriani G. et Lintas. C., éd. Durum: Chemistry and Technology. AACC (Minnesota), Etats-Unis, pp: 1-16.

## . Références bibliographie

---

**Bradford, M. 1976.** A rapid and sensitive method for the quantification of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Anal. Biochem.* 72, 248–254.

**Brian, A. 2013.** Heavy Metals in Soils : Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability, Environmental Pollution 22.BJ Alloway, UK, 613p.

**Brown, LD., Cologgi, DL., Gee, KF., Ulrich, AC. 2017.** Bioremediation of Oil Spills on Land. *Elsevier Inc.* Amsterdam, Pays-Bas  
Banerjee A., Roy A., Dutta S., Mondal S., 2016 -*Bioremediation of hydrocarbon.* 4 :1303–1313.

**Burd, GI., Dixon, DG., and Glick, BR. 1998.** A plant growth promoting bacterium that decreases nickel toxicity in plant seedling appel *Environ. Microbiol.* 64:3663-3668.

### C

**Charissou, AM., Lejeune, PH. 2009.** Etat de l'art sur les potentialités des techniques de bioaugmentation dans le traitement des déchets, sédiments et sols pollués. pp .100.

**Chesnokova, MG., Shalaj Kraus, YA., Cherkashina, NV., Mironov, A. 2016.** Analysis of corrosion defects on oil pipeline surface using scanning electron microscopy and soil thionic and sulfate- reducing bacteria quantification. *Procedia Engineering*, 152, 247 -250.

**Christophe, M. 2020.** Les métaux lourds ou éléments trace métalliques [en ligne ].Disponible sur :< [https://www.notre-planete.info/environnement/metaux\\_lourds.php](https://www.notre-planete.info/environnement/metaux_lourds.php)> (consulté le 15/04/2020).

**D**

**D'Egidio, MG., E De Stefanis, S., Fortini, G., Galterio, BM., Mariani, S., Nardi, D., Sgrulletta., and M., Volpi. 1983.** Untersuchung der an die Qualität der Teigwaren gebundenen Eigenschaften – Veränderungen in der Stärkezusammensetzung während der Herstellung und des Kochens der Teigwaren. *Getreide Mehl und Brot* 37, 55–60.

**Dalbon, GM., Pagani, R., Resmini, and M., Lucisano. 1985.** Einflüsse einer Hitzebehandlung der Weizenstärke während des Trocknungsprozesses. *Getreide Mehl und Brot* 39, 183–189.

**Datta, R., Selvi, MT., Seetharama, N., and Sharma, R. 1999.** Stressmediated enhancement of  $\beta$ -amylase activity in pearl millet and maize leaves is dependent on light. *J. Plant Physiol.* 154, 657–664.

**Dexter, JE., and RR., Matsuo. 1979.** Effect of starch on pasta dough rheology and spaghetti cooking quality. *Cereal Chem.* 56, 190–195.

**E**

**Elias, EM. 1995.** « Durum wheat products», Crop and weed sciences department, Options Mediterranean's, North Dakota State University. Fargo. USA, Zaragoza (ESP), N°22, pp: 23-31

**Elkhawaga. 2011.** Mayak, S., Tirosh, T., and Glick, B. R. Plant growth-promoting bacteria that confer resistance in tomato and pepper to salt stress. *Plant Physiol. Biochem.*

**Etesami, 2018; Järup. 2003.** Health risks of heavy metal exposure through vegetable consumption near a large-scale Pb/Zn smelter in central China *Ecotoxicology and Environmental Safety* Erratum to “Census Ethnobotanical Study of Some Plants Used in Traditional Medicine in the

City of Meknes” [American Journal of Plant Sciences 5 (2014) 2480-2496 Volume 161, 15 October 2018, Pages 99-110.

**Etesami. 2018.** Lead toxicity induced phytotoxic effects on mung bean can be relegated by lead tolerant *Bacillus subtilis* (PbRB3)Chemosphere Volume 234, November 2019, Pages 70-80.

## F

**Fabrégat, S. 2010.** Les métaux lourds : une pollution de long terme[en ligne].Disponible sur :< <https://www.actu-environnement.com/ae/dossiers/air/metaux-lourds.php4>> consulté le 22/06/2021.

**Fadila Moussaoui, Tajelmolk Alaoui, Saadia Aoudry. 2016.** American Journal of Plant Sciences Vol.7 No.1, January 21.

**Fargašová, 2001 ; Sharma et Dubey. 2005 ; Fargašová, A. 2001.** Phytotoxic effects of Cd, Zn, Pb, Cu and Fe *Sinapis alba* L. seedlings and their accu-mulation in roots and shoots. Biologia Plantarum 44: 471–473.

**Fatarna, L. 2007.** Culture in vitro d'*Atriplex halimus* L. et étude de l'impact des éléments traces métalliques (plomb, zinc et cuivre) sur la germination et la croissance. Thèse de Magister en Biotechnologie végétale. Université de Mostaganem, 86-52. fruiting bracts on the germination of *Atriplex halimus* and *Salsola vermiculata*. Expl.

**Feillet, P. 1988.** Protein and enzyme composition of durum wheat, in: Durum, Chemistry and Technology. Eds. G. Fabriani and C. Lin- tas. American Association of Cereal Chemists, St. Paul, MN, pp. 93–120.

**Fernández, S., Cotos-Yáñez, T., Roca-Pardiñas, J., Ordóñez, C. 2018.** Geographically Weighted Principal Components Analysis to assess

## . Références bibliographie

---

diffuse pollution sources of soil heavy metal: Application to roughmountain areas in Northwest Spain. *Geoderma* , 31, 120-129.

**Fortini, S. 1988.** Some specific aspects of durum wheat and pasta cooking quality evaluation in Europe, in: *Durum, Chemistry and Technology*. Eds. G. Fabriani and C. Lintas. American Association of Cereal Chemists, St. Paul, MN, pp. 229–233.

**Fourest, E. 1993.** Etude des mécanismes de biosorption des métaux lourds par des biomasses fongiques industrielles en vue d'un procédé d'épuration des effluents aqueux contaminés (thèse) [en ligne]. Disponible sur <http://www.theses.fr/1993GRE10142>.

**Francou, C. 2004.** Stabilisation de la matière organique au cours du compostage de déchets urbain influence de la nature des déchets et du procédé de compostage recherche indicateurs pertinents :290.

**Francou, C. 2004.** Stabilisation de la matière organique au cours du compostage de déchets urbain influence de la nature des déchets et du procédé de compostage recherche indicateurs pertinents :290.

**Frey, A. 1970.** Ph.D. Thesis, ETH Züri

### G

**Gadd, et GM. 1990.** Heavy metal accumulation by bacteria and other microorganisms. *Experientia* 46: 834–840.

**Gate, PH. 1995.** « Ecophysiologie du blé », ed. Tec & doc, LAVOISIER, Paris, 429 p. **Ghnaya, T., I. Nouairi, I., Slama, D., Messedi, C., Grignon, C., Abdely & MH., Ghorbel. 2005.** Cadmium effects on growth and mineral nutrition of two halophytes: *Sesuvium portulacastrum* and *Mesembryanthemum crystallinum*. *J. Plant Physiol.*, 162, 1133-1140.

**Ghoreishi, G., Alemzadeh, A., Mojarrad, M., Djavaheiri, M. 2017.** Bioremediation capability and characterization of bacteria isolated from petroleum contaminated soils in Iran. *Sustainable Environment Research*, 27, 195-202.

**Glick *et al.*, 1994; Mayak *et al.*, 2004; Glick, BR. 1995.** The enhancement of plant growth by free-living bacteria. *Can. J. Microbiol.* 41:109-117.

**Godheja, J., Modi, DR., Kolla, V., Pereira, AM., Bajpai, R., Mishra, M., Sharma, SV., Sinha, K., Shekhar, SK. 2019.** Environmental remediation: Microbial and nonmicrobial prospects. In *Microbial Interventions in Agriculture and Environment*. Springer. Singapore, 1 :379–409.

**Godheja, J., Modi, DR., Kolla, V., Pereira, AM., Bajpai, R., Mishra, M., Sharma, SV., Sinha, K., Shekhar, SK. 2019.** Environmental remediation: Microbial and nonmicrobial prospects. In *Microbial Interventions in Agriculture and Environment*. Springer. Singapore, 1:379–409.

**Grzybowski, RA., and BJ., Donnelly. 1977.** Starch gelatinisation in cooked spaghetti. *J. Food Sci.* 42, 1304–1305; 1315.

**Grzybowski, RA., and BJ., Donnelly. 1979.** Cooking properties of spaghetti: factors affecting cooking quality. *J. Agric. Food Chem.* 27, 380–384.

## H

**hariri, K. 2004.** Etude de faisabilité de l'utilisation de molécules « cage » dans la dépollution des sols : solubilisation et extraction de polluants

## . Références bibliographie

---

organiques par les cyclodextrines. Thèse doctorat. Université Lyon. France, P 59.

**Heikal, MMD., and Shaddad, MA. 1982.** Alleviation of osmotic stress on seed germination and seedling growth of cotton, pea and wheat by proline. *Phyton* 22, 275–287.

**Hien, E., Favre-Bonte, S., Masse, D., et Nazaret, S. 2010.** Impact de l'épandage de déchets urbains sur les communautés bactériennes de sols agricoles dans la périphérie de Ouagadougou, Burkina Faso. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 4, (5), 1721-1729.

**Huamain, C., Chunrong, Z., Cong, and T., Yongguan, Z. 1999.** Heavy Metal Pollution in Soils in China: Status and Countermeasures. *Ambio*, 28, 130-134.

### I

**Imtiaz, MR., Mujawara, LH., Shahzade, T., Almeelbia, T., Ismaila, I., Oves, M. 2016.** Bacteria and fungi can contribute to nutrients bioavailability and aggregate formation in degraded soils. *Microbiological Research*, 183, 26-41.

**Imtiaz, MR., Mujawara, LH., Shahzade, T., Almeelbia, T., Ismaila, I., Oves, M. 2016.** Bacteria and fungi can contribute to nutrients bioavailability and aggregate formation in degraded soils. *Microbiological Research*, 183, 26-41.

### J

**Jouhao *et al.*, 2020.** Co-metabolic enzymes and pathways of 3-phenoxybenzoic acid degradation by *Aspergillus oryzae* M-4 *Ecotoxicol. Environ. Saf.*

**Jordan Vacheron, 1., Guilhem Desbrosses, Marie-Lara, Bouffaud, Bruno Touraine, Yvan Moëgne-Loccoz, Daniel Muller, Laurent Legendre, Florence Wisniewski-Dyé, Claire Prigent-Combaret. 2017.** Plant growth-promoting rhizobacteria and root system functioning.

**Junes, W., Jian, L., Leiming, L., Xiuyun, M., Yongming, L. 2018.** Pollution, ecological-health risks, and sources of heavy metals in soil of the northeastern Qinghai-Tibet Plateau. *Chemosphere*, 201, 234- 242.

**Jussiaux , C. 1980.** « Cours d'agriculture moderne », ed. La maison rustique, Paris, 9ème ed, 1980, pp: 84-90.

## K

**Katembe, WJ., Ungar, IA., and Mitchell, JP. 1998.** Effect of salinity on germination and seedling growth of two *Atriplex* species (Chenopodiaceae). *Ann. Bot.* 82, 167–175.

**Kezih, R. 1998.** « Galettes de blé dur : Mise au point de méthodes de fabrication et d'évaluation de la qualité », Thèse de Magister, INATAA, Univ. Constantine, Algérie.

**Kumar, V., Shahi., SK., Singh, S. 2018.** Bioremediation: Aneco-sustainable approachfo rrestoration of contaminated sites. In *Microbial Bioprospecting for Sustainable Development*. Springer: Singapore, pp. 115–136.

## L

**Lyoune, D., Vogel., TM., 2001.** Bioaugmentation as a strategy for the tratement of persistent pollutants in : Moo-Young,M(Ed), *Comprehensive Biotechnology* (Second Edittion ) , Academic Press , Burlington , pp.69-81.

M

**M Mohsen et al., 2019.** Microplastic ingestion by the farmed sea cucumber *Apostichopus japonicus* in China Environ. Pollut.

**Maire, R. ,1943.** Contribution à l'étude de la Flore des montagnes du Sahara méridional. Bulletin de la Société d'Histoire Naturelle de l'Afrique du Nord 34 : 134- 141.

**Marmouri , mesnoua., 2016.** Effet des métaux lourds et caractérisation des biomarqueurs et bioindicateurs. Thèse de doctorat. Université de Mostaganem. Algérie.

**Monchy, S. ,2007.** Organisation et expression des gènes de résistance aux métaux lourds chez *Cupriavidus metallidurans CH34*. Thèse de Sciences. UNIVERSITE LIBRE DE BRUXELLES,19 p.

**Muschitz, A., 2009.** Réponses physiologiques des végétaux supérieurs aux stress métalliques. Caractérisation du rôle des parois cellulaires dans les stratégies défensives des cellules de tomate (*Solanum lycopersicum* Mill.) face aux éléments traces métalliques ).

N

**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.

**Namoune, H., et Kezih, R. 2000.** « Utilisation du blé dur en Algérie et Méthodes d'évaluation de la qualité », Symposium Blé : enjeux et stratégies / Alger 7-9 février, 2000 pp: 341-345.

**Namoune, H., et Kezih, R. 2000.** « Utilisation du blé dur en Algérie et Méthodes d'évaluation de la qualité », Symposium Blé : enjeux et stratégies / Alger 7-9 février, pp: 341-345.

**Nugroho, Nugroho, DM., Z., Samani, AT., Hanson, and B., Rudd. 2006.** Remediation of lead contaminated soil by EDTA. I. Batch and column studies. *Water, Air and Soil Pollution* 113: 77–95.

### O

**Ortega, MF., Guerrero, DE., García, Martínez, MJ., Bolonio, D., Llamas, JF., Canoira, L., Gallego, JLR. 2018.** Optimization of landfarming amendments based on soil texture and crude oil concentration. *Water Air Soil Pollut.* 229.

**Ozdemir, G., Ceyhan, N., Manav, E. 2005.** Utilization of an exopolysaccharide produced by TEM05 in alginate beads for adsorption of cadmium and cobalt ions. *Bioresource Technology* 96, 1677-1682.

### P

**P Sharma et al., 2021.** Bioremediation of heavy metals from industrial effluents by endophytes and their metabolic activity: recent advances *Bioresour. Technol.*

**Peng et al., 2005; Kosobrukhov, A., Knyazeva, I., Mudrik, V. 2004.** *Plantago major* plants responses to increase content of lead in soil: growth and photosynthesis. *Plant Grow Regul.* 42:145-151.

**Pengyan, Z., Chengzhe, Q., Xin, H., Guohua, K., Mingzhou, Q., Dan, Y., Bo, P., Yanyan, L., Jianjian, H., Richard, PD. 2018.** Risk assessment and source analysis of soil heavy metal pollution from lower reaches of Yellow River irrigation in China. *Science of the Total Environment*, 633, 1136- 1147.

**Pereira *et al.*, 2010; Pereira, LB., Mazzanti, CMA., Gonçalves, JF., Cargnelutti, D., Tabaldi, LA., Becker, AG., Calgaroto, NS., Farias, JG., Battisti, V., Bohrer, D., Nicoloso, FT., Morsch, VM., Schetinger, MRC. 2010.** Aluminum-induced oxidative stress in cucumber. *Plant Physiology and Biochemistry*. 48,683-689.

**Pour, 2008; Pourrut, BG., Perchet, J., Silvestre, M., Cecchi, M., Guisresse, and E Pinelli. 2008.** "Potential role of NADPH-oxidase in early steps of lead-induced oxidative burst in *Vicia faba* roots." *Journal of Plant Physiology* 165(6): 571-579.

**Prabha, K., Padmavathiamma, and Loretta, Y. 2007.** Phytoremediation Technology: Hyper- accumulation Metals in Plants. *Water Air Soil Pollut. P*.184, 105–126.

## Q

**Qi, W., Zhiyi, X., Fangbai, L. 2015.** Using ensemble models to identify and apportion heavy metal pollution sources in agricultural soils on a local scale. *Environmental Pollution*, 206, 227-235.

## R

**Chakraborty *et al.*, 2012.** Systems biology approach to bioremediation *Curr. Opin. Biotechnol.*

**Rask, OS., and CL, Alsberg. 1924.** A Viscometric study of wheat starches. *Cercal Chem.* 1, 7–26.

**Remon, 2006; Ramon Kumar, NPBA., Dushenkov, V., Motto, H., Raskin, I. 2006.** Phytoextraction: the use of plants to remove heavy metals from soils. *Environ. Sci. Technol.* 29:1232-1238.

**Resmini, P., and MA., Pagani. 1983.** Ultrastructure studies of pasta. A review. *Food Microstructure* 2, 1–12, 98.

**Ritchie, M., Raina, R. 2016.** Effects of herbivores on nitrogen fixation by grass endophytes, legume symbionts and free-living soil surface bacteria in the Serengeti. *Pedobiologia*,59(5),pp. 233-241.  
doi.org/10.1016/j.pedobi.2016.09.001.

S

**Salehi, MA., Hakimghiasi, N. 2017.** Hydrodynamics and mass transfer in three-phase airlift reactors for activated carbon and sludge filtration. *Adv. Environ. Technol.* 2 : 179–184.

**Seregin et Ivanov, 2001 ; Sharma et Dubey. 2005.** « Origin, distribution, and production of durum wheat in the world » Dans Fabriani G. et Lintas. C., éd. *Durum: Chemistry and Technology*. AACC (Minnesota), Etats-Unis, 1988, pp: 1-16.

**Sharma et Dubey, 2005; Sharma, P., and Dubey, RS. 2005.** Lead Toxicity in Plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 17, 1-19.

**Shixue, W., Xinran, L., Min, L., Xing, C., Sai, L., Chenga, L., Xianbiao, L., Ye, L. 2018.** Sources, influencing factors and environmental indications of PAH pollution in urban soil columns of Shanghai, China. *Ecological Indicators*, 85, 1170-1180.

**Souahi, 2017 ; Nadjah, 2015 ; Aoumeur, 2012 ; Belarbi. 2018.** 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.** Physiological responses to lead exposure in wheat, barley and oat. *Environmental challenge*, 4: 100079.

## . Références bibliographie

---

**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.

### T

**Tafforeau, 2002 ; Parida et Das, 2005 ; Martinez et al., 2007; Brugnoli et Lauteri, 1991 ; Attia. 2007.** « Amélioration des espèces végétales cultivées objectifs et critères de sélection », ed. INRA, Paris, 1992, 768 p.

**Tchounwou, PB., Yedjou, CG., Patlolla, AK., et Sutton, DJ. 2012.** Heavy metal toxicity and the environment. In: *LUCH A* (ed) *Molecular, clinical and environmental toxicology, Environmental toxicology*, vol 3. Basel, Springer

### U

**Umme, A., Adeel, M., Sidra, W., Riffat –Naseem, M. 2016.** Enrichment, geo accumulation and risk surveillance of toxic metals for

## . Références bibliographie

---

different environmental compartments from Mehmood Booti dumping site, Lahorecity,Pakistan. Chemosphere, 144, 2229-2237.

### V

**Vavasseur, A., Peltier, G., et Bourguignon, J. 2003.** Biodépollution, Bioremediation. Des plantes pour nettoyer les sols et les eaux. CLEFS CEA., Vol. 48: 85-88.

**Verma, S., et Dubey, RS. 2003.** Lead toxicity induces lipid peroxidation and alters the activities of antioxidant enzymes in growing rice plants. Plant Science, Vol. 164: 645-655.

**Vessey, JK. 2003.** Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers.Plant Soil, 255: 571– 586.

**Vodyanitskii, YN. 2016.** Biochemical processes in soil and groundwater contaminated by leachates from municipal landfills (Mini review). Annals of agrarian science, 14, 249 -256.

### W

**Wang et al., 2000; Wang, Y., Waghorn, GC., McNabb, WC., Barry, TN., Hedley, MJ., and Shelton, ID. 1999.** Effect of condensed tan- nins in *Lotus corniculatus* upon the digestion of methionine and cysteine in the small intestine of sheep. J. Agric. Sci. 127: 413–421.

**Wenyou, H., Huifeng, W., Lurui, D., Biao, H., Ole, KB., Hans Christian, BH., Yue, H., et Peter, EH. 2018.** Source identification of heavy metals in peri-urban agricultural soils of southeast China: An integrated approach. Environmental Pollution , 23 , 650-661.

**Whelan, MJ., Coulon, F., Hince, G., Rayner, J., McWatters, R., Spedding, T., Snape, I. 2015.** Fate and transport of petroleum hydrocarbons in engineered biopiles in polar regions. Chemosphere, 131 : 232–240.

**Z**

**Zouaoui, A., et Bensaïd, R. 2007.** « Determination of the climatic requireme

