



République Algérienne Démocratique et Populaire



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Larbi Tébessi -Tébessa

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

Département des Etres Vivants

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

Science biologique

Option : Ecophysiologie Végétale

Thème

**Stress abiotique sur *Atriplex halimus*L :
Effet des métaux lourds et
caractérisation des biomarqueurs.**

Présenté par:

FARES Randa

SÉDAIRIA Loubna

Soutenu le 15-06-2021, devant le jury composé de:

Président	Dr. DEKAK Ahmed	M.C.A Université de Tébessa
Rapporteur	Dr. SOUABI Hana	M.C.A Université de Tébessa
Examinatrice	M ^m . MACHROUM Amel	M.A.A Université de Tébessa

Année universitaire : 2020/2021

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

1438

Résumé

La contamination par les métaux a des conséquences importantes sur les écosystèmes. Ces éléments par nature non biodégradables, présente une forte écotoxicité et pourraient être impliqués dans de nombreuses pathologies. *Atriplex halimus* est bien adapté à des conditions environnementales extrêmes et présente des propriétés accumulatrices de métaux lourds. Dans ce contexte, nous avons étudié l'effet des métaux lourds sur une espèce halophiles de la famille chénopodiacées, *Atriplex halimus*, cette espèce est cultivée sous une serre contrôlée pendant une période de 30 jours, arrosée avec l'eau distillée et la solution nutritive de Hogland, puis traitées pendant 15 jour avec une solution métallique à base de plomb, cadmium et zinc à des concentrations croissantes: 0, 2000; 4000, 6000, 8000 ppm.

L'étude du comportement morphologique et biochimique consiste à analyser les paramètres suivantes; la longueur de la partie aérienne et racinaires, la teneur en proline, la teneur en protéine totale et l'activité enzymatiques.

Les résultats montrent une diminution de la longueur de la partie racinaire jusqu'à 5 cm et une augmentation de la teneur en proline, de protéine totale et de et l'activité enzymatiques.

Les résultats obtenus sont en faveur de l'implication de l'*Atriplex halimus* en un projet de phytoremédiation pour dépolluer les sols contaminés.

Mots clés: *Atriplex halimus*, métaux lourds, paramètres morphologiques, paramètres biochimiques.

ملخص

للتلوث بالمعادن الثقيلة عواقب وخيمة على النظم البيئية، هذه العناصر بطبيعتها غير قابلة للتحلل البيولوجي، وتمثل سمية بيئية عالية يمكن أن تشارك في العديد من الأمراض. يتكيف *Atriplex halimus* جيداً مع الظروف البيئية القاسية وله خصائص تراكم المعادن الثقيلة. في هذا السياق قمنا بدراسة تأثير المعادن الثقيلة على الأنواع المحبة للملوحة من عائلة *chénopodiacee* القطف الملحي *L. Atriplex halimus*. زرع تحت المراقبة في بيت بلاستيكي لمدة 30 يوماً، سقي بالماء المقطر والمحلول المعدني هوغلاند، ثم عولج لمدة 15 يوماً بمحلول معدني يعتمد على نترات الرصاص والزنك والكاديوم بتركيزات متزايدة: 0، 2000، 4000، 6000، 8000 جزء في المليون. دراسة السلوك المظهري و البيوكيميائي للقطف الملحي يعتمد على تحليل المعايير التالية: طول الأجزاء الهوائية و الجذرية، محتوى البرولين، محتوى البروتين الكلي، ونشاط الأنزيم. أظهرت النتائج نقص في طول الأجزاء الجذرية تصل أدناه الى 5 سم و زيادة في تراكم البرولين، ونشاط الأنزيم. النتائج التي تم الحصول عليها تؤهل نبات *Atriplex halimus* أن يكون ضمن مشروع المعالجة النباتية لتطهير التربة الملوثة.

الكلمات المفتاحية: قطف ملحي، المعادن الثقيلة، الخصائص المرفولوجية، الخصائص البيوكيميائية.

Abstract

Heavy metals pollution affected the ecosystems. Indeed, these elements, which are non biodegradable, are highly ecotoxic and could be implied in different diseases. In this context, we are study the effect of lead, cadmium and zinc carried out on halophytic species of the family chenopdiaceae, *Atriplex halimus L.* adapts well to harsh environmental conditions and has heavy metal accumulating proprties.

These specie under controlled in a plastic house for a period of 30 days, watered with distilled water and Hoagland nutrient solution, then treated for tow week with a metal solution based on lead, zinc and cadmium in inceasing concentration : 0,2000,4000,6000,8000,ppm.

The study of morphological and biochemical parameters consists of analyzing; the length of aerial and root part, proline content, total protein content and enzyme activity.

The results show a decrease in the length of root part up to 5 cm, and an increase in the content of proline, total protein and enzymatic activity.

The results obtained are in favor of the involvement of *Atriplex halimus* in a phytoremediation project to clean up contaminated soils.

Key words: *Atriplex halimus*, heavy metals, morphological parameters, biochemical parameters.

Remerciement

Tout d'abord, nous tenons à remercier **ALLAH**, qui nous a donné la force pour terminer Ce travail

Nous tenons à remercier en particuliers l'encadreur **M^{me}. Hana SOUABI** Maître de conférences à l'université de Tébessa pour nous avoir proposé ce sujet de recherche, sa présence, sa patience, ces conseils scientifiques, pour sa compréhension et son aide.

Nous tenons à remercier les membres de jury **Mr Ahmed DEKAK** et **M^{me}. Amel MACHROUM** qui ont bien voulu accepter de lire et juger ce travail.

Nous remercions tous les enseignants du département des êtres vivants qui ont suivi notre formation pendant les 5 années d'études, et à tous qui nous ont aidés, de près ou de loin, nous disons.

Merci

DIDICAS

Tout d'abord, je remercie dieu, d'avoir me donner le courage et la force pour achever ce travail.

Je dédie ce travail à :

elle qui m'a toujours aimer soutenue dans toutes les situations, forte et tendre et douce tu n'espérer que nous voir réussir Je T'aime **Maman** , que dieu te protège et te garde pour moi.

Vos bénédictions ont été pour moi le meilleur soutien durant ce long parcours, mon chér **papa**

A ma deuxième mère, au grand et tendre coeur Ma chère sœur **loubna**

A celui qui m'a appris à tenir le stylo, Celui qui ma accorder tant d'Attention, d'Amour, d'Aide et d'Encouragement, tout ce que je peux te dire ne peut jamais te décrire, ni te remercier assez pour tout ce que tu m'apportes en continue, car a mes yeux tu es le Meilleur **frère** au monde, et le plu beau cadeau de ma vie, que dieu te protège et te garde pour moi.

A la source de la joie et du rire dans la maison mon frere **Hamza**

A tous mes chers frères **Slimen, Bilel, Dodo, Mohamed** qui ont tant fait pour moi et qui sans leurs encouragements, soutien et amour, je n'aurais jamais pu mener à terme ce travail.

A mes tres cher sœurs **boutheina** juste pour te lire que je t'aime ...est plus qu'une soeur, tu es ma boîte à mes secrets, tu es ma vie.

A la soeur énergique, **Zina**.

A mon fiancée **Iheb** pour l'encouragement et l'aide qu'il m'a toujours accordé.

Sans oublier mon binôme **Loubna**.

A toutes mes amies sans exception.

A tous ceux qui nous ont aidées de près ou de loin pourpouvoir réaliser ce travail.

A vous cher lecteur

Dédicace

Avant tout c'est grâce à ALLAH je suis arrivé à Ce stade

وقالوا الحمد لله الذي هدانا لهذا وما كنا لنهتدي لولا أن هدانا الله

*Je dédie Ce modeste travail avec toute l'ardeur de mes
sentiments:*

**A Mon très Cher papa que dieu le bénisse et fait dans son
paradis**

**Mon plus haut exemple et Mon modèle de persévérance
pour aller toujours de l'avant et ne jamais baisser les bras**

A ma très chère Maman

**Aucune dédicace ne saurait exprimer la reconnaissance, le
respect et l'amour que je vous porte**

Mes belles sœurs et beaux frères

À tous les membres de ma famille sans aucune exception

A tous mes Amis

Loubna

Table des matières

Titre	N°
Résumé	
ملخص	
Abstract	
Remerciement	
Dédicace	
Table des matières	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste d'abréviation	
Introduction Générale	1
Partie I: Synthèse Bibliographique	
<i>Chapitre 01: Généralité sur les Métaux Lourds</i>	
1. Définition	6
2. Catégorie de stress	6
2.1. Stress biotique	6
2.2. Stress abiotique	6
3. Stress métalliques	7
3.1. Généralité sur les éléments trace métallique	7
3.2. Définition d'élément trace métallique	7
4. Origine des éléments trace métallique	8
4.1. Origine naturelle	8
4.2. Origine anthropique	8
5. Différents types d'éléments trace métallique	9
5.1. Les métaux toxiques	9
5.2. Les métaux essentiels ou oligoéléments	9
6. Propriétés physico-chimiques d'élément trace métallique	10
6.1. Cadmium	10
6.2. Zinc	11

6.3. Plomb	11
7. Toxicités des éléments traces métalliques	11
7.1. Cadmium	12
7.2. Plomb	12
7.3. Zinc	13
8. Interaction des métaux lourds et les plantes	13
8.1. Phytodisponibilité	13
8.2. Absorption, transport, accumulation et excrétion des ETM par plantes	13
8.2.1. Pénétration des éléments traces par les parties aériennes	14
8.2.2. Absorption racinaire	14
8.2.3. Translocation	15
8.2.4. Accumulation	15
8.2.5. Les excréations des ETM par la plante	16
9. Les principaux effets toxiques des ETM sur les plantes	16
9.1. Effet sur la germination	16
9.2. Effet sur la photosynthèse	16
9.3. Effet sur la croissance et nutrition	17
10. Classification des plantes selon leur interaction avec ETM	17
11. Stratégies et mécanismes de tolérances des plantes	18
11.1. Membrane plasmique et paroi cellulaire	18
11.2. La chélation et la compartimentation cellulaire	19
11.2.1. La Chélation	19
11.2.2. La Compartimentation	20
11.3. Autres système de tolérance au stress métallique	20
• Les protéines de choc thermique (Hsp)	20
• La biosynthèse d'éthylène	20
12. Pollution des sols	20
12.1. Métaux lourds dans le sol	20
12.1.1. Formes du cadmium, zinc, plomb dans le sol	21
• Cadmium	21

• Zinc	21
• Plomb	21
13. Origines de la contamination des sols par les métaux lourds	21
14. Spéciation et mobilité des métaux lourds	22
14.1. Spéciation	22
14.2. Mobilité	22
14.3. Facteur modifiant la mobilité des éléments métalliques	22
14.3.1. Le pH	22
14.3.2. Le potentiel redox (Eh)	23
14.3.3. Capacité d'échange cationique (CEC)	23
14.3.4. La Température	23
15. Méthodes biologique	23
15.1. Phytoremédiation	24
15.2. Historique	24
15.3. Types des plantes utilisée dans la phytoremédiation	24
15.4. Différentes techniques de phytoremédiation	25
• La Phytoextraction	25
• La Phytostabilisation	25
• La rhizodégradation	25
• La Phytovolatilisation	26
• La phytodésalinisation	26
16. Avantages et limites de la phetoremédiation	27
16.1. Avantages	27
16.2. Limites	27
16.3. Les espèces phytopremédiantes	28
<i>Chapitre 02: Stress Oxydant et notion de Biomarqueurs</i>	
1. Stress oxydant et notion de biomarqueurs	30
1.1. Définition de stress oxydant	30
1.2. Nature des espèces réactives de l'oxygène	30
1.3. Les principales espèces réactives de l'oxygène	31

1.4.	Sources endogènes des espèces réactives de l'oxygène	31
1.5.	Sources exogènes des espèces réactives de l'oxygène	31
2.	Production des ERO	32
2.1.	Les métaux lourds induisent la production d'ERO	32
3.	Mécanismes de tolérance	32
3.1.	Notion des biomarqueurs	32
3.2.	Les antioxydants	33
	3.2.1. Système antioxydant enzymatique	33
	3.2.1.1. Les catalases (CAT)	33
	3.2.1.2. Les peroxydases (POX)	33
	3.2.1.3. Les superoxydes (SOD)	34
	3.2.2. Autres enzymes et molécules antioxydants	35
	3.2.2.1. Glutathion	35
	3.2.2.2. proline (pro)	36
	3.2.2.3. vitamine C	36
	3.2.2.4. Vitamine E	36
	3.2.2.5. Les caroténoïdes	36
	3.2.2.6. les oligoéléments	37
<i>Chapitre 03: Atriplex halimus L</i>		
1.	<i>Atriplex halimus L</i>	40
1.1.	Description de la famille de Chénopodiacées	40
1.2.	Définition	40
1.3.	Systématique	39
1.4.	Noms vernaculaire	40
1.5.	Description botanique et morphologique de genre <i>Atriplex halimus</i>	40
2.	Morphologie	43
2.1.	Feuilles	44
2.2.	Graine	44
2.3.	Fleur	44
2.4.	Racine	45

2.5. Tige	45
3. Répartition géographique et habitat	45
3.1. Répartition dans le monde	45
3.2. Répartition en Afrique	46
3.3. Répartition en Algérie	47
4. Intérêts de l' <i>Atriplex halimus</i>	49
5. Résistances d' <i>Atriplex halimus</i> aux différent stress	49
5.1. Résistance aux salinités	49
5.2. Résistance aux froids	50
5.3. Résistance aux métaux lourds	50
5.4. Résistance aux sécheresses	50
II. Partie Expérimentale	
<i>Chapitre 01: Matériel et Méthodes</i>	
1. Matériel et méthodes	53
1.1. Matériel végétal	53
1.1.1. Localisation et région de site	53
1.1.2. Décorticage des grains	55
1.1.3. Stérilisation des grains	55
1.2. Préparation du substrat (sol)	56
1.3. Mise en germination et repiquage	56
1.4. L'arrosage	57
1.5. Protection de semis	59
1.6. Préparation de la solution de stress	59
1.7. Application du stress	60
1.8. Dispositif expérimental	60
2. Méthode	64
2.1. Prélèvement et préparation du matériel végétale pour les analyses	64
2.2. Paramètres étudiés	64
2.2.1. Croissance en longueur des tiges et racines	64
2.2.2. Dosage des protéines totales	65
2.2.3. Dosage de proline	65

2.2.4. Dosage enzymatique	67
3. Traitement de donnés et analyse statistique	67
<i>Chapitre 02: Résultats et Discussion</i>	
1. Résultats et Discussion	70
1.1. Résultats	70
1.1.2. Effet du stress par les métaux lourds sur la longueur des tiges et racines chez l'<i>Atriplex halimus</i>	70
1.1.3. Effet du stress par les métaux lourds sur la teneur en protéines totale chez l'<i>Atriplex halimus</i>	73
1.1.4. Effet du stress par les métaux lourds sur la teneur en proline totale chez les feuilles l'<i>Atriplex halimus</i>	75
1.1.5. Effet du stress par les métaux lourds sur les activités des enzymes antioxydantes chez l'<i>Atriplex halimus</i>	78
2. Discussion	81
Conclusion	86
Référence Bibliographique	89

Liste des Figures

N°	Titre	Page
Figure N°01	Transport latéral dans les racines	14
Figure N°02	Structure d'une phytochélatine	19
Figure N°03	Les déférentes techniques de phytoremediation	26
Figure N°04	Représentation <i>Atriplex halimus</i>	38
Figure N°05	Touffes d' <i>Atriplex halimus</i> de la région de Tébessa	42
Figure N°06	Grain et plantes d' <i>Atriplex halimus.L</i>	50
Figure N°07	Carte de situation des sites de récolte des graines d' <i>Atriplex halimus</i> (Tébessa, Morsott)	51
Figure N°08	Décorticage des graines d' <i>Atriplex halimus</i>	52
Figure N°09	Les grains ayant des radicules plus de 2 mm de longueur	53
Figure N°10	Plantule d' <i>Atriplex halimus</i> après L'arrosage l'eau distillée et solution nutritive	55
Figure N°11	Protection des semis (installation d'un sous serre)	56
Figure N°12	Dispositif expérimental des plantes <i>Atriplex halimus</i> traités par Cd	57
Figure N°13	Dispositif expérimental des plantes <i>Atriplex halimus</i> traités par Pb	58
Figure N°14	Dispositif expérimental des plantes <i>Atriplex halimus</i> traités par Zn	59
Figure N°15	Prélèvement des échantillons d' <i>Atriplex</i>	61
Figure N°16	Croissance en longueur des tiges et racines de la plante après stress métalliques	62
Figure N°17	Dosage de proline	64
Figure N°18	Spectrophotomètre UV à une longueur d'onde de 528 nm	64
Figure N°19	Broyage de feuille dans un tampon phosphate et centrifugation du broyat à 14000 g pendant 20 min	65
Figure N°20	Le protocole expérimental	66
Figure N°21	Effet des métaux lourds sur la longueur de la partie racinaire chez l' <i>Atriplex halimus</i>	69
Figure N°22	Effet des métaux lourds sur la longueur de la partie racinaire chez l' <i>Atriplex halimus</i>	70
Figure N°23	Teneur en protéines totales (mg. g ⁻¹ de poids frais) des racines de l' <i>Atriplex halimus</i> stressée au zinc, plomb et cadmium	71
Figure N°24	Teneur en protéines totales (mg. g ⁻¹ de poids frais) des feuilles de l' <i>Atriplex halimus</i> stressée au zinc, plomb et cadmium	72
Figure N°25	Teneur en prolines (mg. g ⁻¹ de poids frais) des feuilles de L' <i>Atriplex halimus</i> stressée au zinc, plomb et cadmium	73
Figure N°26	Teneur en prolines (mg. g ⁻¹ de poids frais) des feuilles de L' <i>Atriplex halimus</i> stressée au zinc, plomb et cadmium	74
Figure N°27	Effet du stress par les métaux lourds sur l'activité du polyphénoloxidase chez l' <i>Atriplex halimus</i>	75
Figure N°28	Effet du stress par les métaux lourds sur l'activité du catalase chez l' <i>Atriplex halimus</i>	76

Liste des Tableaux

N°	Titre	Page
Tableau N°01	Classification périodique des éléments métalliques	8
Tableau N°02	Contribution de différentes sources à l'enrichissement moyen annuel des terres émergées en ETM	9
Tableau N°03	Classification de quelques métaux lourds selon leur densité et leur toxicité	10
Tableau N°04	Quelques exemples des plantes hyper accumulatrices pour témoigner des niveaux seuils d'accumulation des ETM dans les feuilles	16
Tableau N°05	Méthodes de traitement biologique des sols contaminés	23
Tableau N°06	Les principales ERO	31
Tableau N°07	Classification botanique d'espèce <i>Atriplex halimus</i> L.	39
Tableau N°08	Répartition des espèces d' <i>Atriplex</i> dans le monde	43
Tableau N°09	Les <i>Atriplex</i> en Afrique du nord	44
Tableau N°10	Répartition des différentes espèces d' <i>Atriplex</i> dans l'Algérie	45
Tableau N°11	Coordonnées géographiques de site de récolte	51
Tableau N°12	Composition de la solution nutritive de Hoagland	54
Tableau N°13	Solutions des stress	56
Tableau N°14	Dispositif expérimental	60
Tableau N°15	Analyse de la variance de la longueur des tiges et racines d' <i>Atriplex halimus</i> stressée au zinc, plomb et cadmium	68
Tableau N°16	Analyse de la variance de la teneur en protéines totales des feuilles et des racines d' <i>Atriplex halimus</i> stressée au zinc, plomb et cadmium	71
Tableau N°17	Analyse de la variance de la teneur en prolines des feuilles et des racines d' <i>Atriplex halimus</i> stressée au zinc, plomb et cadmium	73
Tableau N°18	Analyse de la variance des activités des enzymes antioxydantes des feuilles d' <i>Atriplex halimus</i> stressée au zinc, plomb et cadmium	75

Liste des Abréviations

% :	<i>Pourcentage</i>
(NO₃)₂ Ca 4H₂O :	<i>Nitrate de calcium</i>
CaCO₃ :	<i>Carbonate de calcium</i>
CAT :	<i>Catalase</i>
Cd:	<i>Cadmium</i>
Cu SO₄ 5H₂O :	<i>Sulfate de cuivre</i>
Zn SO₄ 7H₂O :	<i>Sulfate de zinc</i>
DO:	<i>Densité Optique</i>
KNO₃ :	<i>Nitrate de potassium</i>
Na₂ SO₄:	<i>Sulfate de Sodium Oxydé</i>
H₃PO₄:	<i>D'acide Orthophosphorique</i>
Na₂ SO₄:	<i>Sulfate de Sodium Oxydé</i>
EDTA:	<i>Ethane-1,2-diyl dinitrilo tetraacetic acid</i>
Km:	<i>Kilomètre</i>
BSA:	<i>l'albumine de sérum de bœuf</i>
ABA:	<i>Acide Abscissique</i>
Cm :	<i>Centimètre</i>
C° :	<i>Degré Celsius</i>
** :	<i>Différence hautement significative</i>

* :	<i>Différence significative</i>
*** :	<i>Différence très hautement significative</i>
ETM :	<i>Eléments Traces Métalliques</i>
H :	<i>Heure</i>
H :	<i>Hydrogène</i>
HCl :	<i>Acide chlorhydrique</i>
L, ml, µl, µm :	<i>Litre, Millilitre, Microlitre, Micromètre</i>
LR :	<i>Longueur de la racine</i>
LT :	<i>Longueur de la tige</i>
g, mg, kg :	<i>Gramme, Milligramme, kilogramme</i>
Mg :	<i>Mili gramme</i>
Mn :	<i>Minute</i>
Mm :	<i>Millimétré</i>
Mf :	<i>Materre Fraiche *</i>
MF :	<i>Matière fraîche</i>
Mg :	<i>Magnésium</i>
mg. g-1 :	<i>Milligramme par gramm.</i>
mg/kg :	<i>Milligramme par kilogramme</i>
Ppm :	<i>Partie par million</i>
PA :	<i>Partie Aérienne</i>
Pb :	<i>Plomb</i>

<i>Ppo :</i>	<i>Polyphenoloxidase</i>
<i>Pr :</i>	<i>Protéine</i>
<i>uM :</i>	<i>Nonomole</i>
<i>PR :</i>	<i>Partie Racinaire.</i>
<i>T :</i>	<i>Témoin</i>
<i>T:</i>	<i>Temps</i>
<i>V :</i>	<i>Volume</i>
<i>Z :</i>	<i>Zinc</i>
<i>UV:</i>	<i>Ultra-Violet</i>



Introduction
Générale

Introduction Générale

La pollution de l'environnement par les métaux lourds est l'un des problèmes croissant dans le monde (**Elkhawaga, 2011**). Les activités humaines constituent la source principale de pollution, (métallurgiques par exemple) le transport ont été à l'origine de pollution de la biosphère par les métaux (comme le cadmium). Certains métaux, tels que : Cu, Zn, Co, Fe et Mn, sont essentiels pour le métabolisme cellulaire, ils agissent en tant que cofacteurs des enzymes (**Clarkson, 1995 ; Grotz et al., 1998 ; Kägi et Schaffer, 1988**). Certains autres comme Cd, Pb, Hg (mercure) et Ag (argent) sont toxiques pour les organismes vivants, Ils inhibent l'activité enzymatique (**Golan-Goldhirsh et al., 2004 ; Thomine et al., 2000**).

À la différence des polluants organiques, le plomb, le cadmium, le cuivre, le zinc, et le mercure ne peuvent pas être biodégradés et donc persistent dans l'environnement pendant de longues périodes (**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 humains et des animaux (**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 les acides aminés (**Remon, 2006**). Les plantes possèdent de nombreux systèmes de détoxification qui leurs permettre de diminuer les effets néfastes des métaux lourds qui endommagent les acides nucléiques et pigments des chloroplastes. L'un de ces systèmes le système antioxydant, les plantes produisent des enzymes antioxydants ainsi que des composés non enzymatiques (**Somashekaraih et al., 1992**), qui limitent les dégâts des ERO et la chélation intracellulaire, empêchant l'activité de l'ion métallique (**Remon, 2006**).

Ces dernières années, le développement de techniques efficaces pour décontaminer les sites pollués est devenu indispensable. L'une d'elle, la phytoremédiation, utilisant les plantes chlorophylliennes pour accumuler, transformer, dégrader, concentrer, stabiliser ou volatiliser des polluants contenus dans des sols ou des eaux contaminé (**Rufus et al., 1997 ; Salt et al., 1998 ; Prabha et al., 2007**). Cette technique de remédiation des sols pollués est basée sur la

Introduction générale

capacité de certaines plantes d'extraire les polluants de leur substrat puis de les accumuler dans leur biomasse.

La compréhension des mécanismes de tolérance des plantes au stress métallique peut constituer un apport majeur au développement des biomarqueurs (**Weeks, 1995**). Un biomarqueur est une réponse biologique à un produit chimique (comme les métaux lourds) qui induit un stress et peut donner une estimation de l'exposition ou une mesure des effets toxiques potentiels (**Lagadic et Caquet, 1996**).

Atriplex halimus L appartient à la famille des chénopodiacées (**Le Hourérou, 1992**). Ce sont des espèces halophytes (**Ben Salem et al., 2005**) très répandue en Algérie surtout dans les régions à climats aride et semi-aride et utilisée pour l'alimentation humaine et animale, elle résiste bien aux conditions environnementales comme la salinité et la sécheresse (**Bajji et al., 1998a ; Le Hourou, 2000**). Bien adaptées à des conditions environnementales extrêmes et peuvent présenter des propriétés accumulatrices de métaux lourds (**Martinez et al., 2003**). Des études récentes ont rapporté que cette espèce est présente dans des sols pollués par les métaux lourds, et elle est capable de tolérer des concentrations élevées de cadmium, de zinc et de cuivre (**Lefèvre et al., 2009 ; Lotmani et Mesnoui, 2011 ; Lotmani et al., 2011 ; Mateos-Naranjo et al., 2013 ; Nedjimi et Daoud, 2009**).

L'objectif de travail

L'objectif principal de ce travail consiste à étudier l'effet de stress métalliques de Zn, Cd et Pb à différente concentration (0, 2000, 4000, 6000 et 8000 ppm) sur la longueur des tiges et racines des plantules d'*Atriplex halimus L.* et analyser quelques paramètres biochimiques et enzymatiques (proline, protéine, polyphenoloxidase et la catalase) au niveau des feuilles et les racines de la plante.

Notre travail comporte deux grandes parties:

Une partie théorique (synthèse bibliographique) qui est composée de trois chapitres:

✎ **Le premier chapitre:** données générales sur les métaux lourds et leur interaction avec les plantes.

✎ **Le deuxième chapitre:** le stress oxydant et le système antioxydant.

✎ **Le troisième chapitre:** *L'Atriplex halimus L.*

Une partie expérimentale qui est subdivisée en deux chapitres, le premier présente le matériel et les méthodes utilisés dans notre travail.

Les résultats obtenus et leur discussion sont présentés dans le deuxième chapitre.

Partie 01

Synthèse Bibliographique

A decorative border resembling a scroll, with a black outline and grey shaded areas at the top and bottom corners, suggesting the unrolled ends of a scroll.

Chapitre 01

Généralité sur Les Métaux

Lourds

1. Définition du stress

Le stress signifie la déviation dans le développement et les fonctions normaux de la physiologie des plantes, causant ainsi des dommages aux plantes (**Benkoli et Bouzeghaia, 2016**). Le stress est défini comme étant une force ou influence hostile qui tend à empêcher un système normal de fonctionner (**Jones et al., 1989**). C'est le dysfonctionnement (rupture d'un équilibre fonctionnel) produit dans un organisme ou dans un système vivant, par exemple par une carence de performance de la physiologie de l'être vivant (**Dutuit et al., 1994**). On appelle stress toute pression exercée par un paramètre, perturbant le fonctionnement habituel de la plante. Ce concept est trop restrictif pour certains physiologistes qui étudient le stress car il soulève des questions sur les mécanismes adaptatifs qui permettent la croissance de plante dans un environnement stressant (**Hopkins, 2003**).

2. Catégories de stress

Le stress est l'ensemble des perturbations physiologiques ou pathologiques provoqués dans un organisme par des agents biotiques ou abiotiques (**Marouf et Reynaud, 2007**).

2.1. Stress biotique

Le stress abiotique déclenché par d'autres organismes (des champignons, des insectes, des bactéries, des adventices...), afin d'y faire face, la plante met en place un système de défense qui fait intervenir une chaîne de réactions. Les protéines végétales défensives produites font office de rempart contre les agents nuisibles (**Shilpi et Narendra, 2005**).

2.2. Stress abiotique

Les facteurs abiotiques sont ceux liés à l'action du non-vivant sur le vivant (**Iezzar et Meziani, 2015**) tel que: les inondations, la sécheresse, les basses ou hautes températures, la salinité excessive des sols ou des eaux, la présence d'un minéral inadéquat dans le sol, cas des métaux lourds, l'excès de lumière qui stimule la photo inhibition, le cas de faible éclaircissement, les facteurs de stress abiotique, naturels ou anthropique, influent négativement sur la performance de la population ou la physiologie des individus (**Vinebrooke et al., 2004**).

3. Stress métallique

3.1. Généralité sur les éléments trace métallique

L'activité industrielle métallique consiste à une source importante de contamination de l'environnement par les métaux lourds (**Ramade, 1992**).

Les métaux lourds sont généralement des éléments traces métalliques (ETM). Cependant, la classification en métaux lourds est souvent discutée car certains éléments toxiques ne sont pas des métaux (c'est le cas de l'arsenic qui est un métalloïde) tandis que certains métaux toxiques ne sont pas particulièrement «lourds» (par exemple le zinc), ce terme générique désigne donc indistinctement des métaux et métalloïdes réputés toxiques. Pour ces différentes raisons, l'appellation « éléments traces métalliques » est préférable à celle de métaux lourds (**Burnol et al., 2006**).

3.2. Définition d'élément trace métallique

Le terme de métaux lourds est imprécis, il recouvre des éléments ayant des propriétés métalliques (ductilité, conductivité, densité, stabilité des cations, spécificité de ligand...) et un numéro atomique >20 (**Raskin et al., 1994**). Les métaux lourds sont définis comme étant des éléments chimiques toxiques ayant une densité supérieure à 5 g/cm³ (**Elmsley, 2001**). Ceux-ci sont présents le plus souvent dans l'environnement sous forme de traces : mercure, plomb, cadmium, cuivre, arsenic, nickel, zinc, cobalt, manganèse etc...(**Arris, 2008**).

A des concentrations normales, certains sont utiles voire indispensables aux végétaux mais ils deviennent tous toxiques à partir d'un certain seuil. Les ETMs sont réputés toxiques alors que certains sont des oligo-éléments (Cu, Zn, Fe, Co...), d'autres sont des métalloïdes (Se, As) ou qu'ils ne sont pas lourds (Be, Al), d'où ils sont plus désignés par l'appellation «éléments traces métalliques» (ETMs) que celui de «métaux lourds» (**Anne et Isabelle, 2005**).

Tableaux 01. Classification périodique des éléments métalliques (Fourest, 1993).

Bloc S												Bloc p						
H		■ Métaux lourds de densité > 5															He	
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	
Na	Mg	Bloc d										Al	Si	P	S	Cl	Ar	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Te	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
Fr	Ra	Ac	Bloc f															
Lanthanides			Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu		
Transuraniens			Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Cf	Bk	Es	Fm	Md	No	Lr		

4. Origine des éléments trace métallique

Les ETM sont naturellement présents dans les sols en faibles quantités, provenant de l'altération de la roche mère, Leur présence dans les sols peut être naturelle ou anthropogénique (Muschitz, 2009).

4.1 Origine naturelles

Dans les écosystèmes non perturbés, la source principale pour la majorité des métaux lourds est le fond pédogéochimique (Peterson, 1978; Adriano, 1986) comme tout minerai (Miquel, 2001) présent naturellement à l'état de trace (Alloway et Steinnes, 1999).

L'origine naturelle est le résultat de processus géogéniques comme l'érosion, les précipitations géochimiques de roches et de l'eau de source, l'activité volcanique et bactérienne, les embruns marins (Baize et Sterckeman, 2001). Ils sont en partie libérés lors de l'altération de la roche mère, par l'altération des minéraux primaires et secondaires comme les argiles. Résultant de l'évolution géologique et pédologique, à l'exclusion de tout apport d'origine anthropique, et sont diffusés vers l'atmosphère lors de processus naturel (Baize et Tercé, 2002).

4.2 Origine anthropique

Ces deux derniers siècles, les activités humaines ont largement contribué à l'enrichissement des sols en ETM, les principaux sources de contamination sont l'épandage agricole, et surtout les activités industrielles, les fertilisants et les pesticides, ... (Muschitz, 2009).

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 (Kckenzie, 1997).

Concernant les métaux lourds qui font l'objet de cette étude à savoir le Cd, Pb, Zn et, leurs différentes sources potentielles sont mentionnées ci-dessous.

Tableau 2 : Contribution de différentes sources à l'enrichissement moyen annuel des terres émergées en ETM (Miquel, 2001).

	Zinc	Cadmium	Plomb
Total (milliers de tonnes)	760	20	382
Déchets agricoles	61%	20%	12%
Déchets urbain	20%	38%	19%
Engrais	1%	2%	1%
Retombées atmosphériques	18%	40%	68%

5. Différente type d'éléments trace métallique

Il existe deux types qui dépendent de leurs effets physiologiques et toxiques d'un point de vue biologique, ce sont des métaux essentiels et des métaux toxiques (Huynh, 2009).

5.1. Les métaux toxiques

Tout élément est toxique quand il est absorbé en excès par rapport à la capacité d'assimilation de l'organisme. La toxicité des métaux lourds pour un même organisme dépend du type de sol, de sa disponibilité de chaque métaux de l'état physiologique d'un organisme (Baath, 1992).

5.2. Les métaux essentiels ou oligoéléments

Les métaux essentiels sont des éléments indispensables à l'état de trace pour de nombreux processus cellulaires et qui se trouvent en proportion très faible dans les tissus biologiques (Loué, 1993). Certains peuvent devenir toxiques à fortes concentrations. C'est le cas du cuivre (Cu), du nickel (Ni), du zinc (Zn).

Par exemple, le zinc (Zn), à la concentration du milli-molaire, est un oligo-élément qui intervient dans de nombreuses réactions enzymatiques (déshydrogénases, protéinase, peptidase) (Kabata-Pendias et Pendias, 2001).

Tableau 03: Classification de quelques métaux lourds selon leur densité et leur toxicité
(Adriano, 2001)

ETM	Plantes	Animaux	Densité
Cd	T	T	8.65
Cr	-	E	7.20
Cu	E	E	8.92
Ni	T	E	8.90
Pb	T	T	11.34
Zn	E	E	7.14

T : toxique / E : essentiel.

6. Propriétés physico-chimique d'ETM

6.1. L'élément cadmium

Le cadmium découvert en 1817 par le chimiste allemand Stohmeyer, qui présente une grande résistance à l'oxydation et une bonne conductibilité électrique (Juste et al., 1995). C'est un métal chimique blanc argenté (légèrement bleuté), mou et ductile, de numéro atomique 48 et appartenant à l'élément du groupe 12 du bloc d et de la période 5 entre le zinc (Zn) et le mercure (Hg), de masse atomique 112,411 g.mol⁻¹, La configuration électronique du cadmium est [Kr] 4d¹⁰ 5s², a 8 isotopes six sont stables, ¹⁰⁶Cd, ¹⁰⁸Cd, ¹¹⁰Cd, ¹¹¹Cd, ¹¹²Cd et ¹¹⁴Cd et deux radionucléides primordiaux, ¹¹³Cd et ¹¹⁶Cd, la concentration de cadmium dans la croûte terrestre est de 0,15 ppm et le minéral de cadmium le plus courant est la Greenock ite (CdS), il se trouve souvent associé dans les roches aux éléments du même groupe, comme le zinc et le mercure (McLaughlin et Singh, 1999). 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 (Pokorny et al., 2004).

Chez les plantes, le cadmium n'a aucune fonction biologique connue (Pokorny et al., 2004). Les principaux composés du cadmium sont l'oxyde de cadmium, le chlorure de cadmium et le sulfure de cadmium (Brignon et Malherbe, 2005).

6.2. L'élément zinc

Le zinc est un élément chimique, de symbole Zn et de numéro atomique 30, de couleur bleu-gris moyennement réactif, qui se combine avec l'oxygène et d'autres non-métaux, et qui réagit avec des acides dilués en dégageant de l'hydrogène (Mahan, 1987). Son état

d'oxydation le plus commun est +2 (appelé ion zincique), (Baize, 1997). Sa configuration électronique est [Ar] 3d¹⁰ 4s² (DalCorso, 2012). Le zinc possède cinq isotopes stables ⁶⁴Zn, ⁶⁶Zn, ⁶⁷Zn, ⁶⁸Zn et ⁷⁰Zn (Holden, 1994).

6.3. L'élément plomb

Le plomb est un métal gris bleuâtre malléable, flexible, moins biodisponible que les autres métaux (van der Perk, 2006), qui se ternit à l'air, de symbole Pb et de numéro atomique 82, sa configuration électronique est [Xe] 4f¹⁴ 5d¹⁰ 6s² 6p², avec deux électrons non appariés sur la dernière couche, cette configuration électronique autorise les degrés d'oxydation +2 et +4, en plus de la forme métal (0) (Sposito et al., 1982). On le trouve à l'état naturel, sous forme de minerai, il appartient au groupe 4 de la classification périodique des éléments, Il existe 20 isotopes, 4 naturels **204pb**, **206pb**, **207pb**, **208pb** et 16 sont radioactifs (OMS, 2000 ; Djebbar, 2013).

7. Toxicités des Eléments Traces Métalliques

Avec la croissance économique mondiale rapide, les polluants contenant des métaux lourds peuvent pénétrer dans le sol par diverses méthodes, certains éléments métalliques sont essentiels aux organismes vivants à de faibles concentrations. Ils agissent à de fortes concentrations comme un facteur de stress qui entraîne une modification de la réaction physiologique. Le terme «sensibilité» décrit les effets du stress, qui peuvent aller jusqu'à la mort de la plante. Par opposition, le terme «résistance» fait référence à la réaction de la plante qui lui permet de survivre face au stress métallique (Levitt, 1980).

La toxicité des métaux manifester de façons très différentes par exemple le cadmium ne rentre dans aucune fonction biologique connue alors que le Fe et le Cu sont les métaux essentiels au métabolisme cellulaire, pourtant le Cu peut se révéler très nocif malgré son caractère indispensable à faible concentration (Bérail, 1991).

Les symptômes de toxicité associés aux métaux lourds sont peu différents de ceux produits par différents types de stress (Cseh, 2002).

7.1. Toxicités de Cadmium

En 1998, la directive *eau potable* considéré le cadmium comme un élément trace toxique, tout comme l'arsenic, le nickel, le plomb, le chrome... (Blum et al., 2002).

On identifie le cadmium comme un polluant extrêmement toxique, il est un élément non essentiel pour le végétal qui affecte négativement la croissance et le développement des plantes, il est rejeté dans l'environnement par les centrales électriques, ou les industries

métallurgiques, (Godt et al., 2006). Le cadmium est relativement rare dans l'écosphère (McBride, 1995). Il fait partie des polluants les plus toxiques et les plus mobiles dans le système sol-plante. Par conséquent, son accumulation dans les tissus des végétaux constitués des vecteurs de contamination en cas de consommation animale ou humaine (Grant et al, 1995).

Il est toxique sous toutes ses formes (métal, vapeur, sels, composés organiques), chez l'homme, il provoque notamment des problèmes rénaux et l'augmentation de la tension (Plumlee et Ziegler, 2003). Les effets toxiques du Cd ne le sont pas seulement pour l'homme, mais aussi pour les végétaux et les animaux (Benito et al., 1999).

7.2. Toxicités de Plomb

Le plomb est le contaminant de métaux lourds le plus courant dans le sol. Il reste stable pendant de longues périodes dans le sol et il est difficile de se décomposer et de s'accumuler éventuellement dans le corps humain. Par exemple, lorsque les concentrations sanguines de plomb dépassent 40 microgrammes chez les nourrissons, la synthèse de l'hémoglobine s'arrête, entraînant une anémie sévère.

Le cadmium (Cd) et le plomb (Pb) sont inclus dans la liste des produits hautement toxiques, polluants environnementaux, car ils constituent tous deux une menace considérable à tous les organismes, y compris les plantes et les humains (Kabir et al., 2018).

Le plomb ne joue aucun rôle physiologique dans l'organisme (Kahloula, 2009). Mais il est toxique pour les systèmes hématopoïétiques, rénaux, cardiovasculaires et nerveux... (Karri et al., 2008). La toxicité du plomb dépend de sa concentration dans le milieu, des propriétés du sol, et enfin de l'espèce végétale concernée (Sharma etDubey, 2005).

7.3. Toxicités de Zinc

Le zinc est toxique pour la microflore, l'effet inhibiteur sur la végétation n'est pas à négliger. Les sels de zinc sont nocifs pour l'homme s'ils sont administrés par voie orale mais en faible dose, le danger d'intoxication est inexistant (Lauwery, 1982).

8. Interaction des métaux Lourds et les plantes

8.1. Phytodisponibilité

La phytodisponibilité d'un élément-trace peut être définie comme la quantité d'élément qui peut être transférée («prélevée») dans la plante durant son développement dans lequel il sera directement assimilable par une plante (Bourelrier et Berthelin, 1998).

Parmi les facteurs liés au sol, le pH, la capacité d'échange cationique (CEC) et le taux de matière organique sont les plus importants (Greger, 2004). Un pH faible augmente généralement la phytodisponibilité des ETM car les protons (ions H⁺) ont une plus grande affinité pour les charges négatives des colloïdes du sol (Greger, 2004).

Certaines plantes sont capables de modifier localement le pH du sol (c'est-à-dire au niveau de la rhizosphère) par sécrétion, via le système racinaire, d'acides organiques. (Dakora et Phillips, 2002).

8.2. Absorption, transport, accumulation, et exrétion les ETM par plantes

Les plantes absorbent les ETMs de sol par leurs racines, les transporter à travers le xylème et les accumuler dans les différents tissus. Ce transfert peut constituer un risque direct sur la santé humaine à travers les plantes alimentaires ou indirect par l'accumulation dans la chaîne alimentaire à travers le fourrage. Certains éléments sont classés comme non essentiel pour la vie des végétaux, parmi ces éléments le Cd, Pb, Hg, et Cr. Leur présence peut provoquer des symptômes de toxicité même lorsqu'elle est exposée à des très faibles concentrations (Nicholson et al., 2003). Les plantes sont exposées de deux façons aux ETM: par les parties aériennes (à partir de particules en suspension dans l'air ou de composés dissous dans l'eau de pluie ou d'arrosage) et par les racines (Muschitz, 2009).

8.2.1. Pénétration des éléments traces par les parties aériennes

Les métaux lourds sous forme de poussière ou de gaz peuvent entrer directement par les stomates des feuilles et les tiges, les fruits (Tremel-Schaub et Feix, 2005). Ils rentrent dans les feuilles à travers les stomates ; sous forme d'ions, ils rentrent surtout à travers les cuticules des feuilles (Prasad et Hagemeyer, 1999).

8.2.2. Absorption racinaire

Les métaux lourds peuvent circuler à l'intérieur des racines de deux façons, par la voie symplasmique (à l'intérieur de la cellule) et par voie apoplasmique (à l'extérieur de la cellule) (Barber, 1995).

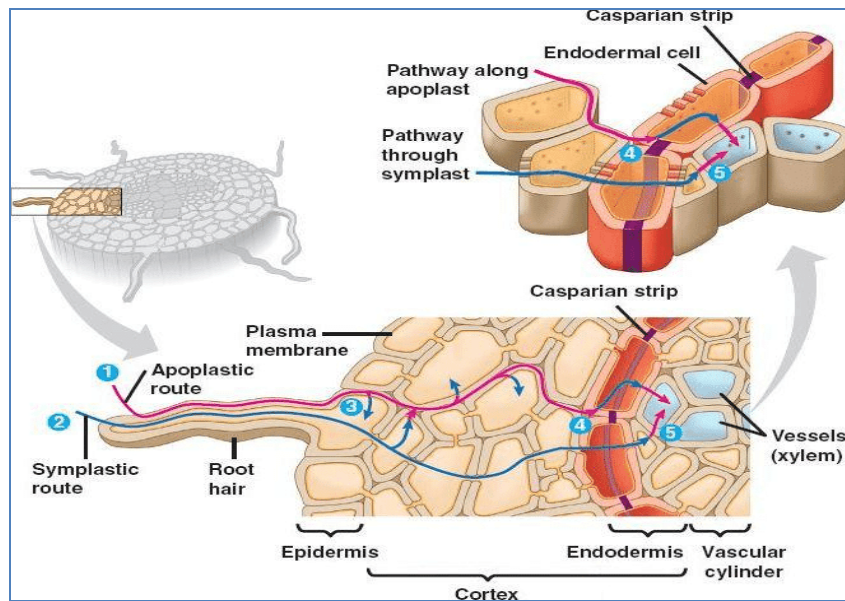


Figure 01: Transport latéral dans les racines (Mesnoui, 2016).

Les ETM en solution sont transférés vers la rhizosphère par deux processus, simple diffusion et/ou le flux de masse. La voie principale d'absorption des métaux se fait par simple diffusion au travers de l'apophase du cortex racinaire et de l'endoderme (Tremel-Schaub et Feix, 2005). Le transport des éléments métalliques à travers la paroi cellulaire se fait passivement (non métabolique et donc dans le sens du gradient de concentration), par les pores du réseau de la cellulose (Briat et Lebrun, 1999).

Les charges négatives de surface comme les acides polygalacturoniques des pectines peuvent agir comme des échangeurs d'ions, et adsorber une partie des ETM (Muschitz, 2009). Le transport des ETM vers les autres organes de la plante peut devenir actif pour qu'ils soient ensuite dirigés vers les vaisseaux conducteurs de sève brute (xylème) autorisant cette fois un transfert contre le gradient de concentration (Muschitz, 2009).

8.2.3. Translocation

Après leur absorption, le transport des éléments dans le xylème de la plante vers les parties aériennes, est appelé *translocation* (Tremel-Schaub et Feix, 2005). Le transport des éléments-traces dans le phloème est probablement difficile car ce dernier est constitué de cellules vivantes contenant des substances sur lesquels il est facile de se fixer (Tremel-Schaub et Feix, 2005). Toutefois, certains auteurs suggèrent que le nicotinamide, qui a des propriétés de chélation vis-à-vis des métaux, servir de médiateur pour le déchargement des éléments-traces dans le phloème et prévenir leur précipitation dans la sève alcaline du phloème, et ainsi faciliter le transport des éléments-traces (Prasad et Hagemeyer, 1999).

8.2.4. Accumulation

Généralement, les racines ont tendance à accumuler les ETM, les teneurs en ETM dans les plantes sont réparties selon le gradient d'accumulation: racines > tiges > feuilles > graines et fruits, leur prélèvement par la plante, les métaux se fixent largement sur les parois cellulaires, ce qui explique pourquoi une grande partie des métaux prélevés peuvent se retrouver dans les racines comme cela a été décrit pour le plomb, le cadmium (Morel, 1997 ; Lasat et al., 2000).

En effet, chez certaines espèces la translocation d'éléments traces est plus importante que chez d'autres, pouvant conduire à une véritable accumulation des éléments métalliques dans les parties aériennes, ces plantes sont qualifiées d'accumulatrices (Tang et al., 2009).

Les plantes herbacées dicotylédones accumulent plus d'éléments-traces dans leur biomasse aérienne que les plantes herbacées monocotylédones (Tremel-Schaub et Feix, 2005). Cette accumulation peut constituer un risque direct sur la santé humaine à travers les plantes alimentaires ou indirect par l'accumulation dans la chaîne alimentaire à travers le fourrage (Nicholson et al., 2003).

Tableau04: Quelques exemples des plantes hyper accumulatrices pour témoigner des niveaux seuils d'accumulation des ETM dans les feuilles (Reeves et Baker, 2000)

ETM	Concentration dans les feuilles (mg.g ⁻¹ MS)	Plantes hyperaccumulatrices (références)
Cd	≥ 0,1	<i>Arabidopsis halleri</i> s(Weber et al., 2004) <i>Solanum nigrum</i> (Wei et al., 2004)
Zn	≥ 1	<i>Sesbania drummondii</i> (Sahi et al., 2002) <i>Lemna minor</i> (McCutcheon et Schnoor, 2003)
Pb	≥ 10	<i>Thlaspi caerulescens</i> (Assunção et al., 2003) <i>Arabidopsis halleri</i> (Weber et al., 2004)

8.2.5. Les excréments des ETM par la plante

Les métaux peuvent être évacués de la vacuole vers le cytoplasme ou du cytoplasme vers l'apoplaste et à partir de là, leur relâchage est possible vers le milieu environnant. Les métaux relâchés dans la rhizosphère le sont sous forme complexée ou libre (Prasad et

Hagemeyer, 1999). Il peut se produire également dans les feuilles, ceci est dû à des phénomènes d'échange cationique entre les ions hydrogène et métalliques (**Prasad et Hagemeyer, 1999**).

9. Les principaux effets toxiques des ETM sur les plantes

La toxicité des ETMs dans les plantes peut comprendre plusieurs effets comme l'inhibition de la photosynthèse, la germination, la chlorose (inhibition de la synthèse de chlorophylle), la faible croissance des plantes qui peuvent être accompagnés d'une réduction de l'absorption d'eau et des nutriments et des troubles du métabolisme des plantes (**Dan et al., 2008 ; Clemens et al., 2002 ; Clijsters and Assche, 1985**).

9.1. Effet sur la germination

La germination et les plantules sont les stades physiologiques le plus sensible d'une plante, de plus, ces stades sont plus sensibles à la pollution métallique en raison du manque de certains mécanismes de défense (**Liu et al., 2012**).

9.2. Effet sur la photosynthèse

La photosynthèse est le processus bioénergétique qui permet aux plantes et à certaines bactéries de synthétiser de la matière organique en exploitant la lumière du soleil. faisant intervenir de nombreuses étapes qui sont affectées de manière différente par les facteurs de l'environnement comme la pollution par les ETM, s'accompagnent des perturbations de la machinerie photosynthétique, notamment la structure des chloroplastes et la biosynthèse de la chlorophylle (**He et al., 2008 ; Ran et al., 2014**). Ils agissent également sur les enzymes du système photosynthétique affectant les trois étapes clés du cycle de Calvin (carboxylation, réduction, régénération) (**Singh et al., 2005**).

9.3. Effet sur la croissance et nutrition

L'effet toxique des ETM sur la croissance de la plante se manifeste par une réduction de la croissance des parties aériennes et des racines (**Zorrig, 2011**). Ces effets s'accompagnent très souvent de nombreux autres indices de dysfonctionnement tel que la perturbation de l'équilibre de l'auxine, la perturbation de l'alimentation en éléments minéraux pour la croissance des plantes, chlorose foliaire, jaunissement progressif, dessèchement du feuillage (**Wang et al., 2009 ; Xu et al., 2012**). Il est toutefois important de noter que les ETM n'affectent pas la croissance de toutes les plantes avec la même sévérité. Certaines plantes dites hyper accumulatrices sont capables de croître, se développer, à la présence des concentrations élevées de ETM (**Zorrig, 2011**). Des perturbations de la nutrition potassique

en présence de cadmium ont été rapportées dans plusieurs études (**Küpper et Kochian, 2010** ; **Redondo-Gómez et al., 2010**).

10. Classification des plantes selon leur interaction avec métaux lourds

Parmi les végétaux tolérants, il est possible de caractériser trois grands types basés sur les rapports entre les teneurs en métaux lourds du sol et celles des organes aériens des plantes considérées (**Baker, 1981**).

Les excluantes: ces plantes sont capables de maintenir la concentration des métaux dans leurs parties aériennes à un niveau faible. Le métal est massivement transporté dans les parties aériennes de la plante et provoque des dégâts liés à sa toxicité (**Memon et al., 2001** ; **Vanobberghen, 2011**).

Les indicatrices: les ETM accumulent dans les tissus de leurs parties aériennes, et les concentrations internes reflètent exactement les concentrations externes (milieu) (**Memon et al., 2001** ; **Vanobberghen, 2011**).

Les accumulatrices: ces plantes sont capables d'accumuler des concentrations élevées des ETM dans leurs tissus aériennes, ces plantes sont largement utilisés dans la phytoremédiation (**Memon et al., 2001**; **Vanobberghen, 2011**). Selon la concentration des ETM dans les parties aériennes, ont classé les plantes en tant que des accumulatrices ou hyperaccumulatrices (**Brooks et al., 1979**). Le maïs cultivé accumule les métaux lourds tels que le plomb et l'or, les légumineuses sont des hyperaccumulateurs de césium, sélénium, et le mercure (**Jean et Yan, 2018**).

11. Stratégies et mécanismes de tolérance des plantes

Certains éléments métalliques sont essentiels aux organismes vivants à de faibles concentrations, mais ils agissent à de fortes concentrations comme un facteur de stress qui entraîne une modification de la réaction physiologique, le terme « sensibilité » décrit les effets du stress, qui peuvent aller jusqu'à la mort de la plante, et le terme « résistance » fait référence à la réaction de la plante qui lui permet de survivre face au stress métallique (**Levitt, 1980**).

Les plantes possèdent des systèmes de stockage ou de détoxification qui leurs permettent de diminuer les effets néfastes des ETM, il semble à l'heure actuelle que trois mécanismes, encore mal compris, soient largement prépondérants: la modification de la perméabilité membranaire, qui permet de réduire l'entrée des métaux dans la cellule, le système

antioxydant, qui limite les dégâts des espèces réactives de l'oxygène, et la chélation intracellulaire, qui empêche l'activité de l'ion métallique (**Remon, 2006**).

11.1. Membrane plasmique et paroi cellulaire

La paroi cellulaire contient des protéines, des polysaccharides, des pectines, et lipidiques. Ces diverses molécules possèdent des groupements hydroxyles, carboxyles, amines, aldéhydes, phosphates,... qui peuvent représenter des ligands assurent une complication et donc la détoxification de nombreux ETM (**Haynes, 1980 ; Meychik et Yermakov, 2001**). Ces différents groupements chimiques peuvent participer à différentes réactions incluant les échanges ioniques, l'adsorption, la complication, permettant ainsi la séquestration des ETM dans la paroi lors d'un stress métallique (**Mullen et al., 1992**).

La membrane plasmique peut limiter l'accumulation des ions toxiques, soit en modifiant l'ensemble du flux ionique, soit en employant des systèmes ultra spécifiques autorisant un flux ionique qui ne transporterait pas les ions toxiques (**Meharg, 1993**). La membrane plasmique constitue également une cible importante pour la toxicité métallique. En effet, il a été montré que le cuivre pouvait endommager la membrane par oxydation des protéines membranaires, ou inhibition des ATPases. Par conséquent, l'imperméabilité n'est plus assurée et l'entrée des métaux toxiques par diffusion est facilitée (**Kabata-Pendias et Pendias, 2001**).

Dès lors, la tolérance pourrait être due en partie à un renforcement de la protection de l'intégrité membranaire ou à la protection de la fonction des protéines associées au plasmalemma, tels que les transporteurs, les canaux ioniques (**Remon, 2006**).

11.2. La chélation et la compartimentation cellulaire

11.2.1. La chélation

Les métaux chélates peuvent être stockés dans les vacuoles des racines ou transportés vers la partie aérienne (**Clemens et al., 1999**).

La présence intracellulaire de ligands organiques, qui assurent une complication et donc la détoxification de nombreux ions métalliques, chez les plantes, il existe plusieurs types de ligands: acides aminés, acides organiques et polypeptides (**Remon, 2006**).

Les acides aminés libres, comme la proline, l'histidine et la cystéine, s'accumulent lors d'un stress métallique et pourraient être eux aussi impliqués dans la chélation de divers métaux lourds, notamment du zinc et du nickel (**Briat et Lebrun, 1999**).

Les acides organiques représentent un groupe de chélateurs naturels (**Ma et al., 1997**), tels que des acides dicarboxyliques (acides fumarique, malique, oxalique) ou des acides

tricarboxyliques (comme l'acide citrique). Ces molécules sont clairement impliquées dans les phénomènes d'hyper accumulation (Rauser, 1999 ; Callahan et al., 2006).

Les **phytochélatines (PC)** sont des composés chimiques (Masingue, 2003), représentent le deuxième groupe de chélateurs intracellulaires, uniquement rencontrés dans le règne végétal, sont de petits polypeptides possédant la séquence d'acides aminés (γ -Glu-Cys) $_n$ -Gly, avec $n = 2$ à 11, et une très grande affinité pour les métaux grâce à leurs fonctions thiol (SH) et carboxyle (COOH).

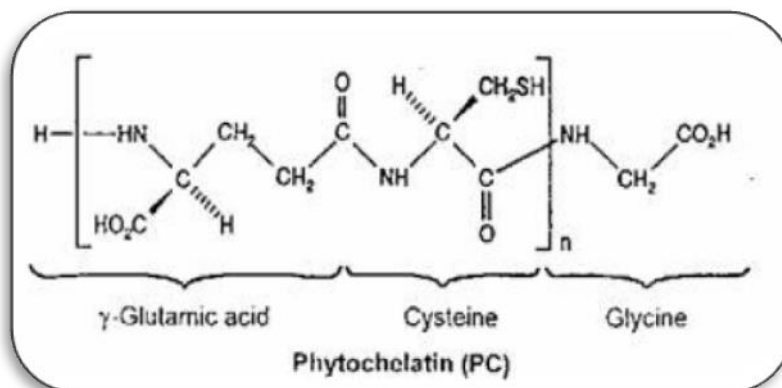


Figure 02: Structure d'une phytochélatine (Steffens, 1990).

Les **métallothionéines (MTs)** sont des protéines (polypeptides) (Sauge-Merle, 2003), caractérisées par leur richesse en cations métalliques (essentiellement Cu et/ou Zn) et par leur forte proportion de résidus cystéines (Shah et Nongkynrih, 2007). De nombreuses observations ont montré qu'elles pourraient être impliquées dans certains mécanismes de tolérance vis-à-vis différents ETM (Clemens, 2001 ; Guo et al., 2008).

11.2.2. La compartimentation

Les plantes peuvent opérer une détoxification en compartimentation accrue les métaux lourds en forme ionique et en les transportant vers la vacuole (Prasad et Hagemeyer, 1999). Grâce à des transporteurs comme le transporteur appartenant à la famille des protéines GTP il permet la détoxification du zinc (Chardonnens et al., 1999).

11.3. Autres systèmes de tolérance au stress métallique

- **Les protéines de choc thermique (Hsp):** sont capables d'induire cette réponse de type «choc thermique» (Remon, 2006). L'induction des HSP par le stress protérozoïque permet à la cellule de réparer les dommages protéiques, renaturation des polypeptides (Banzet et al., 1998).

- **La biosynthèse d'éthylène:** L'éthylène capable de limiter les flux de métaux dans les systèmes vasculaires et accélérant la réponse anti-oxydante par induction de l'activité acrobate peroxydase, ainsi que la synthèse de métallothionéines (**Sanita di Toppi and Gabbrielli, 1999**).

12. Pollution des sols

La pollution des sols et des sous-sols résulte des conséquences des diverses activités humaines (industrielles, agricoles...) cumulées au cours des temps (**Jeannot *et al.*, 2001**).

La pollution des sols par les éléments traces métalliques constitue depuis une vingtaine d'années un objectif de recherche et de remédiation (**Lecomte, 1995**). La contamination des sols par des métaux toxiques est l'un des plus grands problèmes environnementaux à l'échelle mondiale (**Janssen *et al.*, 2015**).

12.1. Les métaux lourds dans le sol

Les ETM dans les sols proviennent en partie de l'altération de la roche mère mais aussi de sources externes au sol: dépôts atmosphériques, épandages d'engrais et différentes activités humaines (**Baize et Tercé, 2002**).

Le sol ressource naturelle essentielle, est le support de nombreuses activités industrielles et urbaines, Le développement de ces activités entraîne une forte augmentation des teneurs en éléments trace métalliques (**Christelle Fernandez-Cornudet, 2006**).

12.2.1. Formes du cadmium, zinc, plomb dans le sol

➤ Cadmium

Dans les sols, le cadmium est considéré comme un élément relativement mobile par rapport à d'autres métaux en traces tels que le cuivre ou le plomb (**Bourrelier et Berthelin, 1998**). Les principales formes du cadmium présentes dans la solution du sol sont Cd^{2+} , $CdSO_4$, $CdCO_3$, $CdCl^+$ et $CdHCO_3^+$ (**Sposito, 1989**).

➤ Zinc

Dans le sol, le Zn est sous les formes chimiques suivantes: Zn^{2+} , $ZnSO_4$, $ZnHCO_3^+$, $ZnCO_3$, $ZnFe_2O_4$, Zn_2SiO_4 , $Zn_3(PO_4)_2$, la forme la plus courante et la plus mobile du zinc dans les sols est Zn^{+2} qui est facilement adsorbé sur les composants minéraux et organiques (**Ross, 1994**), le zinc est considéré comme facilement soluble par rapport aux autres ETM dans les sols, il est très mobile et disponible dans les sols légers et acides, et forme aussi des

complexes insolubles et stables avec des matières organiques particulières ou avec des ligands inorganiques (carbonates, phosphates, sulfates, etc.) (Clemente et al., 2006 ; Usman et al., 2004).

➤ Plomb

Dans le sol le Pb se trouve sous les formes chimiques suivantes: Pb^{2+} , $PbHCO_3^+$, $PbOH^+$, $PbSO_4$, $Pb(OH)_2$, $PbCO_3$, PbO , $Pb(PO_4)_2$, $PbCl^+$, les ions Pb^{2+} et $Pb(OH)^+$ + prédominent dans la solution du sol (Ross, 1995). Quand le PH augmente, ces formes sont remplacées par $Pb(OH)_2$, $Pb(OH)_3$. La concentration du plomb dans la solution du sol est extrêmement faible, comprise entre 10^{-8} et 10^{-9} M. Le plomb est l'un des ETM les moins mobiles du sol (Van der Perk, 2013).

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

Les éléments traces métalliques (ETM) présents dans les sols proviennent de différentes sources. La fraction d'origine endogène est héritée de l'altération de la roche-mère puis redistribuée dans les sols, (Baize, 1997).

Le problème principal des métaux lourds comme le plomb, le cadmium, et le mercure est qu'ils ne peuvent pas être biodégradés, et donc persistent pendant de longues périodes dans des sols, Certaines pratiques agricoles sont à l'origine de l'introduction de métaux lourds dans le sol (Robert et Juste, 1999).

14. Spéciation et mobilité des métaux lourds

14.1. Spéciation

Le terme de spéciation a été utilisé dans la chimie des sols et désigne la forme chimique et structurale sous laquelle se trouve un élément métallique (Hetland et al. 1991). Il définit comme la distribution des espèces chimiques d'un élément au sein d'un système, solide ou liquide (Templeton et al., 2000).

La connaissance de la spéciation des ETM dans les sols permet d'établir des perspectives de comportement et d'évolution des ETM en fonction des conditions de milieu et de leur modification (Bolan et al., 2003 ; Bolan et al., 2010).

14.2. Mobilité

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 (Juste, 1988). La

mobilité chimique est liée à la mobilité spatiale qui est l'aptitude de l'élément à se déplacer dans un profil de sol (Tremel-Schaub and Feix, 2005).

14.3. Facteurs modifiant la mobilité des éléments métalliques dans le sol

Il existe de multiples paramètres influençant la mobilité des métaux dans les sols dont les plus importants sont (Colinet, 2003).

14.3.1. Le pH

Le pH constitue un facteur important de la mobilité des métaux, la diminution du pH favorise la mobilité de la plupart des métaux par la mise en solution des sels métalliques, car il influence le nombre de charges négatives pouvant être mises en solution (Mclaughlin et al, 2000). D'une façon générale, lorsque le pH augmente, les cations sont moins solubles et les anions sont plus solubles (Blanchard, 2000).

14.3.2. Le potentiel redox (Eh)

Le potentiel redox (Eh) permet de caractériser les échanges d'électrons entre les espèces chimiques. Ainsi, les faibles valeurs d'Eh favorisent la dissolution des hydroxydes et entraînent une augmentation de la concentration des métaux associés avec des composants (Chaignon, 2001)

14.3.3. Capacité d'échange cationique (CEC)

La capacité d'échange cationique représente la quantité maximale de cation de toutes sortes qu'un poids déterminé du sol est capable de retenir, le transfert du Cu et du Ni vers les racines est principalement contrôlé par la CEC (Bargagli, R.1998). Les cations métalliques peuvent se fixer à la surface des particules d'argile par échange de protons H⁺, entraînant une baisse de leur disponibilité (Alloway, 1995 ; Impenset al., 1991).

14.3.4. La Température

La température a un impact direct sur la mobilité des éléments métalliques en déplaçant les équilibres des réactions de dissolution, précipitation et Co-précipitation, et un impact indirect, en modifiant la teneur en eau du sol, le pH ou l'Eh (Deneux- Mustinet al., 2003).

15. Méthodes biologiques

L'utilisation des méthodes biologiques permet de favoriser la dégradation des polluants, Les organismes utilisés lors de traitements biologiques ont la capacité de transformer les

polluants en des substances moins toxiques pour l'environnement, il ya plusieurs traitements biologiques pour les sols contaminés (FRTR, 2008).

Tableau05: Méthodes de traitement biologique des sols contaminés (modifié de: FRTR, 2008).

Méthode de réhabilitation biologique	Ex situ	In situ
Bioventilation		*
Bioremediation		*
Phytoremédiation		*
Biopiles	*	
Compostage	*	
Bioréacteur	*	
Atténuation naturelle contrôlée		*

15.1. Phytoremédiation

Le terme phytoremédiation est la combinaison du mot grec phyto (qui signifie plante) et du mot latin remedium (qui signifie rétablir de l'équilibre), la phytoremédiation est une technologie émergente qui utilise les plantes ou les microorganismes de rhizosphère pour extraire, transformer ou stocker les polluants contenus dans les sols, les sédiments (Susarla et al., 2002), utilisée pour le traitement de plusieurs classes de polluants tels que les solvants chlorés, les pesticides, encore les ETM (Vassilev et al., 2007).

15.2. Historique

L'idée d'utiliser des plantes pour extraire les métaux lourds et leurs composantes fut introduite en 1983 bien que le principe soit connu depuis 300 ans. C'est dans les années 1990 que le concept de la remédiation (bio et phytoremédiation) émerge comme une nouvelle technologie qui utilise les plantes vertes et des microorganismes associés (bactéries, champignons) pour le nettoyage d'un environnement pollué (Aoun, 2009).

Cette technique utilisée dès l'antiquité par les Grecs et les Romains, (Adolphe-Auguste Mille et Alfred-Durand Claye, 1871). Dans les années 1980-90, les techniques de phytoremédiation se perfectionnent et se développent à travers le monde avec la création de villes incluant in situ, l'agence de protection de l'environnement des Etats-Unis publie le premier guide de phytoremédiation (EPA, 2000).

15.3. Types des plantes utilisées dans la phytoremédiation

La phytoremédiation regroupe différentes méthodes qui sont appliquées selon la contamination et les objectifs de remédiation (Brooks, 1998 ; Bert et al., 2000). Les plantes dites «tolérantes aux métaux», appelées plantes métallophiles ou métalrophytes, sont potentiellement utiles pour la phytostabilisation et la phytovolatilisation (Baker et al., 1997).

En revanche, il existe des plantes dites « hyperaccumulatrices » qui sont capables de stocker dans les tiges et les feuilles de 10 à 500 fois plus d'éléments métalliques que les autres espèces végétales (Brooks et al., 1998). *Atriplex halimus* et d'autres espèces d'*Atriplex* sont connues pour leur capacité de phytoremédiation, en particulier pour leur capacité à accumuler des ETM (Manousaki et Kalogerakis, 2011).

15.4. Différentes techniques de phytoremédiation

Il existe plusieurs techniques de phytoremédiation, parmi celles-ci, celles qui s'appliquent le plus souvent aux sols sont (Bert et Deram, 1999 ; Mulligan et al., 2001).

➤ La phytoextraction ou phytoaccumulation

La phytoextraction utilise des plantes capables de prélever les éléments traces toxiques et de les accumuler dans les parties aériennes qui seront ensuite récoltées puis incinérées, les hyperaccumulatrices capables de tolérer et d'accumuler ces polluants (Jemal et Ghorbal, 2002).

On peut noter l'utilisation de plantes hyper accumulatrices présentant des capacités d'accumulation et un facteur de bioconcentration important, les parties aériennes concentrées en métaux sont ensuite retraitées par combustion, pyrolyse ou gazéification (Chalot et al., 2012 ; Bert et al., 2017).

La phytoextraction est influencée par les caractéristiques physiologiques et génétiques (Phieler et al., 2013).

➤ La phytostabilisation

Un autre mécanisme qui est utilisé dans le but de minimiser la dispersion des polluants dans le sol, réduisent la mobilité et la biodisponibilité des contaminants dans le sol ou la rhizosphère, par immobilisation chimique (McGrath, 1998). La phytostabilisation vise à végétaliser un sol pollué dans le but d'immobiliser les ETM dans le sol, de plus, la présence

du couvert végétal limite d'une part l'érosion hydrique et éolienne, et d'autre part le contact direct avec les animaux et les hommes (Mahar et al., 2006).

➤ **La rhizodégradation ou phytodégradation**

Dans la rhizodégradation, la décontamination est effectuée dans la rhizosphère par les micro-organismes dont la croissance et l'activité sont stimulées par les plantes (Pilon-Smits, 2005), repose sur l'effet rhizosphère qui stimule la dégradation des composés organique des sols (Chaudhry et al., 1998 ; Ann Peer et al., 2005).

Le but ici est de dégrader les polluants en substances moins toxiques, pour les réintégrer dans les cycles de matières. Les facteurs limitant sont les mêmes que pour la phytodégradation: la concentration en molécules toxiques et surtout la vie microbienne du sol (Bert, et al., 2013).

➤ **La phytovolatilisation**

Cette méthode concerne la pollution organique et non pas celle des éléments traces. Les plantes utilisées dans cette technique n'ont pas la capacité de stocker les polluants dans leurs organismes. Cependant, elles sont capables de dégrader les polluants organiques à l'intérieur des cellules de leurs appareils aériens et racinaires (Dabouineau, et al., 2005). Très controversée (Padmavathiamma et Li, 2007), la phytovolatilisation consiste en l'absorption de polluants par la plante qui rélargie ensuite sous forme volatile le polluant en question dans l'atmosphère (Zayed and Terry, 1994).

➤ **La phytodésalinisation**

Technique innovante et récemment mise en place au niveau expérimental qui consiste en l'extraction de sels contenus dans les sols par des plantes halophytes (Manousaki et Kalogerakis, 2011; Zorrig et al., 2012). Utilise les plantes pour transférer les ETM du sol vers l'atmosphère. Dans ce procédé, les ETM sont absorbés par les racines, transférés dans les parties aériennes où ils sont transformés sous leur forme volatile avant d'être émis dans l'atmosphère (Kabata-Pendias 2011).

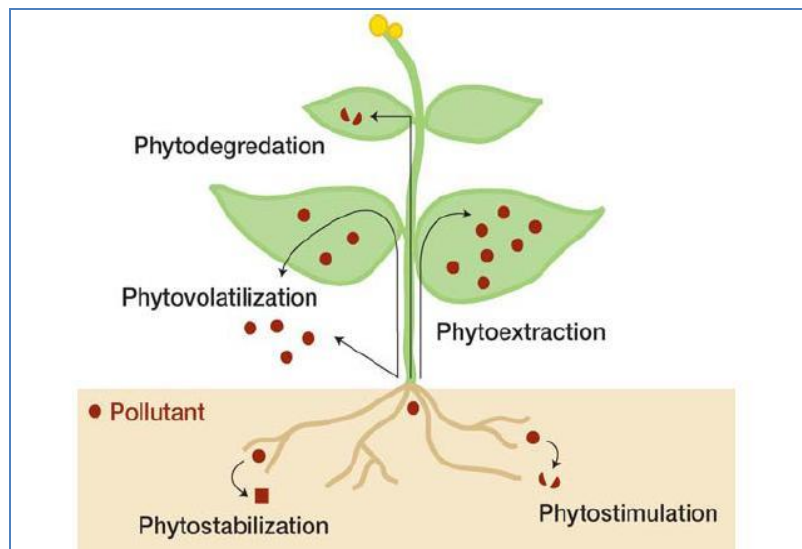


Figure 03: Les différentes techniques de phytoremediation (Moussavou, 2010)

16. Avantages et limites de la phytoremédiation

16.1. Avantages

La phytoremédiation est de plus en plus utilisée de nos jours puisqu'elle contribue au maintien de la structure des sols étant donné qu'elle ne nécessite aucune excavation (EPA, 2012).

- Le coût de la phytoremédiation est bien moindre que celui de procédés traditionnels in situ et ex situ.
- Les plantes peuvent être facilement surveillées
- une technique efficace et sûre
- utilise des organismes naturels et préserve l'état naturel de l'environnement (contrairement à l'emploi de procédés chimiques, il n'y a pas d'impacts négatifs sur la fertilité des sols)
- Durable
- Son avantage majeur reste son faible coût de dépollution d'un acre (4047m²) de sol argilo-sableux contaminé sur 50 cm de profondeur est quatre à six fois plus faible avec des plantes que par excavation classique (Henry, 2000 ; Ghosh et Spingh, 2005).
- Enrichissement de la biodiversité, conservation de la structure et propriétés des sols
- C'est une technique applicable à de vastes surfaces (Federal Remediation Technologies Roundtable).

16.2. Limites

Comme **Forget (2004)** l'a si bien dit dans un de ses articles «Comme toute technique de décontamination des sols, la phytoremédiation comporte certaines limites avec lesquelles il faut composer»

- Risque de contamination de la chaîne alimentaire.
- La toxicité et la biodisponibilité des produits de biodégradation ne sont pas toujours connues.
- La phytoremédiation est limitée à la surface et la profondeur occupées par les racines.
- Le niveau et le type de contamination influence la phytotoxicité des polluants, dans certains cas, la croissance ou la survie des plantes peut être réduite (**Federal Remediation Technologies Roundtable**).
- Processus lents, plusieurs années sont nécessaires pour dépolluer un site de déchets dangereux.

16.3. Les espèces phytoremédiantes

Ces espèces sont des métalphytes et appartiennent à la végétation naturelle des sols riches en métaux (**Ernst, 2000**).

La sélection des espèces des plantes pour la phytoremédiation se base sur leur potentiel d'évapotranspirer les eaux souterraines, les enzymes dégradative, leurs taux de croissance et de rendement, la profondeur de leur racines, et leur capacité de bio accumuler des contaminants (**Ernst, 2000 ; Glass, 2000**).

Les familles végétales qui dominent dans les accumulateurs et hyper accumulateurs de métaux, sont: Astéracée, Brassicaceae, Caryophyllaceae, Cyperaceae, Cunouniaceae, Fabaceae, Flacourtiaceae, Lamiaceae, Poaceae, Violaceae et Euphobiaceae, et les hyper accumulatrices de métaux que sont les Brassicaceae présentent plus le nombre de taxons, soit 11 genres et 87 espèces (**Prasad et Frietas, 2003**). Les plantes envisagées pour la dépollution doivent avoir une croissance rapide (**Meagher et Heaton, 2005**), un système racinaire et foliaire développé (**Viatcheslav Dushenkov et al., 1995**). Elles doivent aussi développer un système racinaire extensif (**Glebert et al., 2003**). Explorant la zone de sol polluée (**Kramer, 2005**), et accumuler les éléments traces dans leurs tissus aériens sans avoir développer des symptômes de toxicité (**Baker et Brooks, 1989**).



Chapitre 02

Stress Oxydant et

Notion de Biomarqueurs

1. Stress Oxydant et Notion des Biomarqueurs

1.1. Définition de stress oxydant

Le stress oxydant se définit par un déséquilibre entre la production d'espèces radicalaires (ou réactives) de l'oxygène (ERO) et les capacités cellulaires antioxydantes, SO se définit comme l'incapacité de l'organisme de se défendre contre les espèces réactives de l'oxygène (ERO) en raison de la perturbation d'équilibre endogène entre ces derniers et les agents oxydants (AO). Ce déséquilibre conduit potentiellement à des dégâts structuraux et fonctionnels (Sies, 1985).

1.2. Nature des espèces réactives de l'oxygène

Le terme espèce réactive de l'oxygène (ERO) est souvent associé au radical libre, ayant un ou plusieurs électrons non appariés, ce qui le rend extrêmement réactif (Halliwell, 2006). Les plantes utilisent l'oxygène, via le métabolisme aérobie pour obtenir l'énergie, cependant, la réduction de l'oxygène s'accompagne inévitablement d'une production de radicaux oxygénés, parmi lesquelles des radicaux libres comme le radical perhydroxyle ($\text{HO}_2 \cdot$), le radical peroxy ($\text{RO}_2 \cdot$), le radical superoxyde ($\text{O}_2 \cdot^-$). (Scandalios, 1993 ; Bartosz, 1997 ; Parent et al., 2008).

1.3. Les principales espèces réactives de l'oxygène

Les ERO comprennent l'oxygène singulet ($^1\text{O}_2$), le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) et l'ozone (O_3), et les radicaux peroxy ($\text{ROO}\cdot$) et alkoxy ($\text{RO}\cdot$) (Favier, 2003).

Tableau 06: Les principales ERO regroupée dans le tableau suivant selon (Gardès-albert et al., 2003; Koechlin-ramonatxo, 2006 ; Raccah, 2004 ; Goudable, et al., 1997)

Les ERO	Réaction de formation	Propriétés
Les radicaux superoxydes (O ₂ ^{•-})	Formé par la réduction mono électrique de l'oxygène : addition d'un seul électron (O ₂ + 1e ⁻ → O ₂ ^{•-})	c'est le radical le moins réactif mais le précurseur des autres ERO (Koechlin-ramonatxo, 2006)
Les peroxydes d'hydrogène (H ₂ O ₂)	Produit à partir de l'anion superoxyde, réaction catalysé par la superoxyde dismutase. (Raccah, 2004) $O_2 + O_2 \rightleftharpoons H_2O_2 + O_2$	la majeure partie de la toxicité de l'eau oxygénée provient de sa capacité à générer le radical hydroxyle (OH [•]) est une espèce stable, non radicalaire, mais toxique en raison de son pouvoir oxydant (Gardès-albert et al., 2003)
Le radical hydroxyle (OH [•])	Formé par la réaction de fenton à partir d'H ₂ O ₂ en présence de métaux de transition : l'ion ferreux réagit avec le peroxyde d'hydrogène (Goudable, et al., 1997) $H_2O_2 + Fe^{2+} \rightleftharpoons OH + Fe^{3+} + OH^-$	Le radical hydroxyle (°OH) est le radical le plus avide d'électron et le plus dangereux pour l'organisme et la plus toxique lors d'un stress oxydant (Gardès-albert et al., 2003)

1. 4. Sources endogènes des espèces réactives de l'oxygène

Chez les plantes, il existe de nombreuses sources cellulaires d'ERO, localisées à divers endroits de la cellule, des chloroplastes (photosynthèse) et mitochondries (respiration), certaines enzymes comme les peroxydases et oxydases, Les enzymes (NADPH-oxydases, les peroxydases extracellulaires...), le peroxydosome (la chaîne de transport des électrons), et les molécules photosensibilisatrices comme la chlorophylle (Pourrut, 2008).

1. 5. Sources exogènes des espèces réactives de l'oxygène

Les sources exogènes sont majoritairement des pro-oxydants environnementaux tels que les pesticides, Les ions de métaux lourds, tels que le fer, le cuivre, le cadmium, Mercure, peuvent induire la génération de radicaux réactifs et provoquent des lésions cellulaires (Birben et al 2012). Les polluants, trou d'ozone, la poussière (d'amiante, de silice), et les composés induits par la prise de certains médicaments, ou lors d'un coup de chaleur, alcool, tabac, alimentation déséquilibré (Favier, 2003).

2. Production des ERO

Même si les ERO sont formées au cours du métabolisme normal de la plante, En effet, de nombreux stress (la sécheresse, les UV, la salinité, ETM) sont capables d'induire une production accrue de ERO (**Noctor et Foyer, 1998 ; Dat et al., 2000 ; Van Breusegem et Dat, 2006**). Dans les chloroplastes, le processus photosynthétique est à l'origine de la formation directe d' 1O_2 et d' $O_2^{\bullet-}$ et indirecte d' H_2O_2 (par dismutation de l' $O_2^{\bullet-}$) et d' OH^{\bullet} (**Asada et al., 1974**). Les mitochondries constituent une source importante d'ERO chez les plantes, surtout dans les cellules non chlorophylliennes (**Pourrut, 2008**).

2.1. Les métaux lourds induisent la production d'ERO

Le rôle des métaux lourds dans la formation des ERO est lié à leur capacité à exister sous différents états d'oxydation, les cations d'éléments comme Fe, Cu, Cr ou Mn sont capables de céder un ou plusieurs électrons susceptibles de réduire l'oxygène La plus connue de ces réactions est la réaction de **Fenton** qui se produit en présence de fer ferreux et qui conduit à la réduction du peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) en radical hydroxyl (OH^{\bullet}) et en anion hydroxyl (OH^{\bullet}) (**Remon, 2006**).



Les métaux qui n'existent que sous un seul état d'oxydation, comme le cadmium et le zinc peuvent induire une accumulation de ROS en perturbant certaines voies métaboliques ou en inactivant des enzymes du système anti-oxydant, contribuant ainsi à l'épuisement de la réserve cellulaire de molécules anti-oxydantes (**Sanita di Toppi et Gabrielli, 1999**).

3. Mécanismes de tolérance

3.1. Notion des Biomarqueurs

Les Biomarqueurs sont définis comme les caractéristiques qui peuvent être objectivement mesurées et évaluées comme des indicateurs des processus biologiques normaux, des processus pathologiques, à une intervention thérapeutique (**Niki, 2008**).

Un indicateur biologique (ou bioindicateur) est un organisme ou un ensemble d'organismes qui par référence à des variables biochimiques, cytologiques, physiologiques, permet de façon pratique de caractériser l'état d'un écosystème et de mettre en évidence leurs modifications, naturelles ou provoquées (**Blandin, 1986**). Le biomarqueur peut donc aller de la simple liaison ligand-récepteur au niveau cellulaire, jusqu'aux effets sur un individu entier, L'intérêt des paramètres antioxydants en tant que biomarqueurs réside dans le caractère

aspécifique de leur réponse, ce qui peut être un avantage dans le contexte des contaminations multiples des écosystème (Cossu et al., 1997 ; Vigano et al., 1998).

3.2. Les antioxydants

Les antioxydants sont des substances capables de neutraliser ou de réduire les dommages causés par les radicaux libres dans l'organisme. Notre organisme réagit donc de façon constante à cette production permanente de radicaux libres et on distingue au niveau des cellules deux lignes de défense inégalement puissantes pour détoxifier la cellule (Favier, 2003)

3.2.1. Système antioxydant enzymatique

Pour se protéger des effets délétères des ERO, les organismes végétaux ont développé certains moyens de défense contre les atteintes des radicaux libres. Trois activités enzymatiques clefs occupent une place centrale dans les mécanismes de détoxification des ERO, il s'agit des superoxyde-dismutases (SOD), des catalases (CAT) et des peroxydases (POX). Ces enzymes ont une action complémentaire sur la cascade radicalaire au niveau de l'anionsuperoxyde $O_2^{\cdot -}$ et du peroxyde d'hydrogène, conduisant finalement à la formation d'eau et d'oxygène moléculaire (Muschitz, 2009).

3.2.1.1. Les catalases (CAT)

Les catalases sont des enzymes majoritairement peroxysomales catalysant la dismutation du peroxyde d'hydrogène, sont contenues dans les peroxysomes et dans le cytosol (Bartosz, 1997). Elles agissent en synergie avec les SODs puisque leur rôle est de catalyser la réduction du peroxyde d'hydrogène en eau et en oxygène moléculaire selon la réaction suivante (Remon, 2006).



3.2.1.2. Les peroxydases (POX)

Les peroxydases permettent, comme les catalases, la réduction de H_2O_2 en eau et en oxygène moléculaire. Cependant, à la différence des CAT, les POD nécessitent de l'énergie (NAD(P)H) et la présence d'un substrat particulier (cofacteur) pour réaliser leurs activités : l'ascorbate (Asc) et le glutathion (GSH) (Wu et al., 2003). La concentration en H_2O_2 est régulée par des enzymes telles que les peroxydases (POD) et les catalases (CAT) afin de protéger les cellules des effets nocifs du peroxyde d'hydrogène (Sánchez-Cassas et Klessig, 1994).



3.2.1.3. Les superoxydes (SOD)

Le SOD est l'une des plus importantes enzymes cellulaires possédant une fonction antioxydante. C'est l'enzyme antioxydante « anti-O₂^{•-} » la plus importante dans toutes les cellules vasculaires car elle catalyse la dismutation de l'anion superoxyde en eau oxygénée, l'absence de cette enzyme peut être létale, (Afonso et al., 2007). Il existe trois types de SOD chez les plantes: (FeSOD, chloroplastique), (MnSOD, mitochondriale) et (CuZnSOD, cytoplasmique) (Arora et al., 2002), sont responsables de la dismutation de l'anion superoxyde en peroxyde d'hydrogène (H₂O₂) selon la réaction:



3.2.2. Autres enzymes et molécules antioxydants

A côté des 3 principales enzymes antioxydants citées ci-dessus, on trouve d'autres enzymes, dont le rôle est moins important (Pourrut, 2008). Une autre catégorie de molécules anti-oxydantes non enzymatiques est représentée par des molécules telles que les pigments caroténoïdes, certains acides aminés comme la cystéine, l'hydroxyquinone, les vitamines C, E et A sont aussi capables de capter certaines ROS tels que l'anion superoxyde ou le radical hydroxyle dès leurs formation et ainsi éviter les effets du stress oxydant (Souguir, 2009). Certains flavonoïdes (anthocyanines) (Larson, 1988; Collin et al., 2008). L'oligoélément (cu) est un des cofacteurs essentiels de la SOD (Del corso et al., 2003). Le Zn joue un rôle antioxydant indirect en assurant la stabilisation de la Cu/Zn-SOD, il inhibe la production des ERO par les métaux de transition, en entrant en compétition avec eux dans la réaction de fenton (Powell, 2000).

3.2.2.1. Glutathion

Le glutathion est un tri-peptide (acide glutamique-cystéine-glycine), majoritaire au niveau intracellulaire, il est particulièrement important car c'est le substrat de plusieurs enzymes antioxydants (Halliwell and Gutteridge, 1999). Il est impliqué dans l'inactivation des ERO. Le GSH est le substrat indispensable aux réactions qui éliminent les peroxydes à partir de l'activité enzymatique de la GPx, de la GST et de la GR (Tessier et Marconnet, 1995).

3.2.2.2. Proline (Pro)

La proline est un acide aminé essentiel pour la synthèse protéique et le métabolisme primaire chez les êtres vivants, l'accumulation de la proline résulte d'une activation de sa biosynthèse

localisée à la fois dans le cytoplasme et dans le chloroplaste chez les plantes et de la répression de son catabolisme dans la mitochondrie (**Ben Rejeb, 2015**).

3.2.2.3. Vitamine C

La vitamine C ou acide L-ascorbique est, présent le plus couramment sous forme d'anion ascorbate (Asc-H^- : forme présente dans le milieu physiologique) il agit principalement en piégeant directement les ERO (majoritairement $\text{O}_2^{\cdot-}$ et le ONOO^-) (**Leverse, 2009**). La vitamine C permet le recyclage de Fe^{3+} en Fe^{2+} favorisant ainsi la réaction de Fenton et a donc de manière indirecte une action pro-oxydante. Capable de réagir directement avec tous les ROS réduisant ainsi la peroxydation lipidique (**Ames et al., 1981**).

3.2.2.4. Vitamine E

La vitamine E ou α -tocophérol (α -TOH), est le principal antioxydant de la famille des tocophérols. Leur caractère hydrophobe leur permet de s'insérer au sein des membranes riches en acides gras polyinsaturés, où ils jouent un rôle protecteur en réagissant avec les radicaux peroxy ($\text{ROO}\cdot$) (**Lopez et al., 2005**).

3.2.2.5. Les caroténoïdes

Les caroténoïdes sont des pigments que l'on trouve dans les plantes et les micro-organismes, il y'a plus de 600 caroténoïdes se produisant dans la nature, le plus important et le plus connu des caroténoïdes est le β -carotène, Leur potentiel antioxydant pour lutter contre la peroxydation lipidique a été démontré très tôt (**Monaghan and Schmitt, 1932**). Ils sont capables de bloquer les chaînes de réactions radicalaires.

Leur rôle protecteur dans les systèmes biologiques implique la désactivation d'espèces électroniquement activées et la désactivation d'espèces chimiques réactives telles les radicaux peroxy ($\text{ROO}\cdot$) et alkyles ($\text{R}\cdot$), ils sont également capables de régénérer la vitamine E et sont eux-mêmes régénérés par la vitamine C (**Hermes-Lima, 2005**). Jouent une multitude de fonctions dans le métabolisme des plantes y compris la tolérance au stress oxydatif (**Gill and Tuteja, 2010**).

3.2.2.6. Les oligoéléments

Le cuivre (Cu): Cet oligo-élément est un des cofacteurs essentiels de la SOD. il joue, en tant que métal dit de transition, un rôle important dans le déclenchement des réactions conduisant à la formation d'espèces oxygénées activées (**Del corso et al., 2000**).

Le sélénium (Se) : Au sein des oligoéléments essentiels, se l'apparait comme un micronutriment primordial comme cofacteur de la GPx dans le maintien des défenses antioxydantes (**Burk, 2002**).

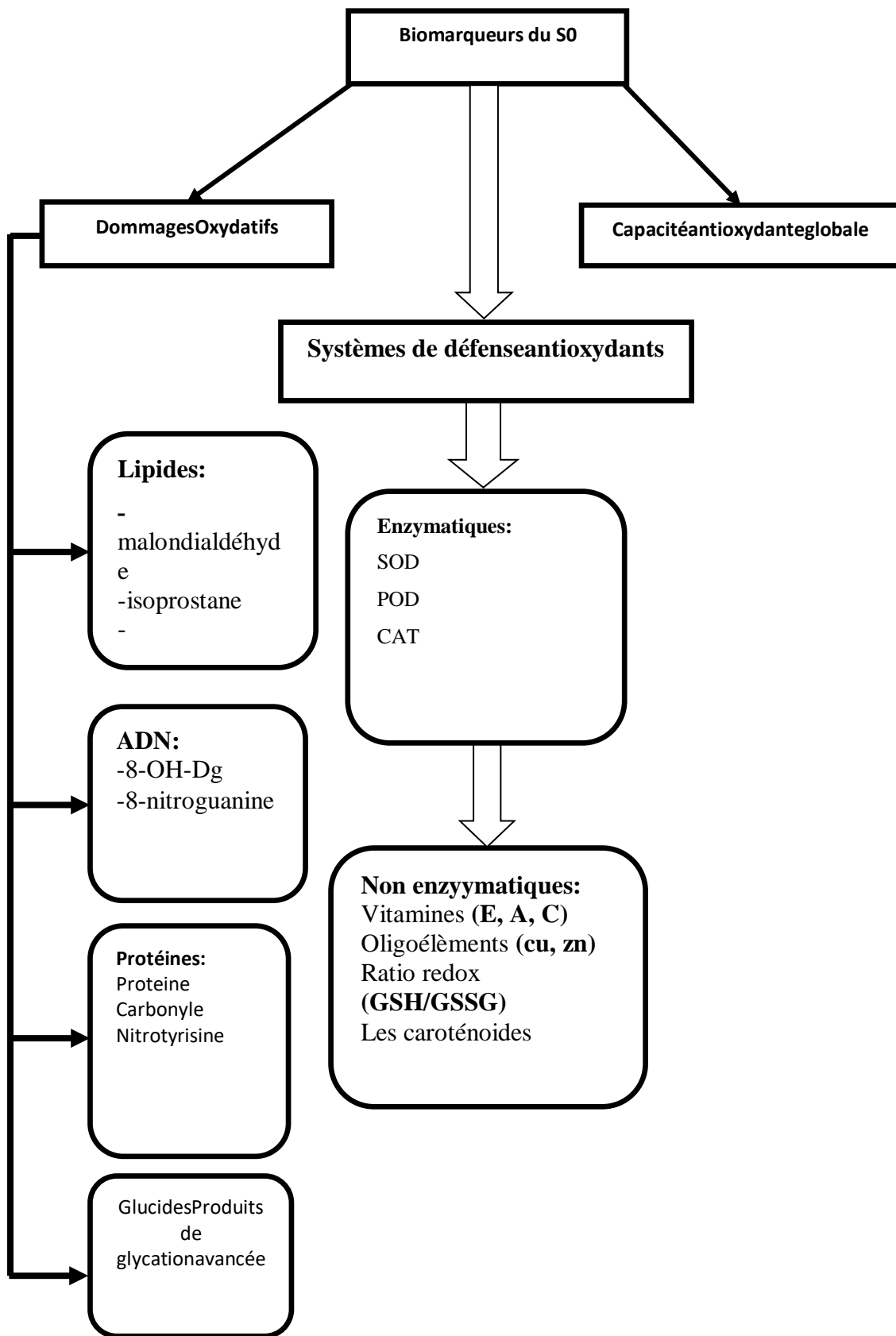


Figure 01: Marqueurs biologiques du stress oxydant (Levine et Stadtman, 2001)



Chapitre 03

Atriplex Halimus L.

1.1. Description de la famille des Chénopodiacées

La famille des Chénopodiacées reconnue depuis des années déjà pour ses capacités de résistance et d'adaptation aux stress abiotique (**Le Houérou, 1992**). Comprend environ cent genres.

Les Chénopodiacées sont largement répandues dans les habitats salins tempérés et subtropicaux, en particulier dans les régions littorales de la mer méditerranée, aux marges du désert du Sahara, Elles poussent également comme des herbacées sur les sols riches en sel (**Mulas, 2004**). Son système racinaire développé lui permet de se développer sur un sol pauvre en éléments minéraux essentiels et de mauvaise structure, son système aérien forme une bonne couverture végétale à feuillage dense. Du point de vue morphologique, les Chénopodiacées sont caractérisées par des racines profondes et pénétrantes, destinées à absorber la plus grande quantité d'eau possible, et par des feuilles alternées, petites et recouvertes de poils. (**Rosas, 1989**).

1.2. Définition d'*Atriplex halimus*

Atriplex halimus.L est un arbuste vivace (**Haddioui et Baaziz, 2001**) halophyte appartenant à la famille des Chénopodiacées possédant la voie métabolique C, il est largement répandu dans les sols non salins ainsi que dans les sols hautement salins, cette espèce est de loin la plus plantée d'espèces indigènes dans la région méditerranéenne (**Le Houérou 2000**). Natif d'Afrique du nord où il est très abondant (**Kinetet al., 1998**). Le genre *Atriplex* inclut 48 espèces et sous espèces dans le bassin méditerranéen (**Maâlem, 2002**). *Atriplex halimus* est une espèce méditerranéenne de xérohalophytes salines très résistantes à la sécheresse (**Le Houérou et al. 2000**), est une espèce monophanérophyte fleurissant et fructifiant à partir du mois d'avril jusqu'en novembre. Elle est extrêmement hétérogène et polymorphe (**Ben Ahmed et al, 1996**).

Le genre *Atriplex* appartient au groupe des plantes ayant un métabolisme photosynthétique de type C4 ce qui explique leur résistance au déficit hydrique (**Rozema, 1996**). Les feuilles des plantes en C4 contiennent deux types de cellules particulières, les cellules de la gaine fasciculaire autour des faisceaux et les cellules du mésophylle autour des cellules de la gaine fasciculaire (**Zhu et Meinzer, 1999**). Les plantes en C4 ont une meilleure efficacité d'utilisation de l'eau que les plantes en C3 en conditions d'illumination et de température élevées (**Broetto et al., 2007**).

Plusieurs espèces de ce genre sont bien adaptées aux conditions environnementales extrêmes telles que *A. Hortensis*, qui est tolérante haute salinité, qui est un arbuste résistant à la sécheresse, qui peut vivre dans l'irrigation par l'eau de mer et dans des conditions xériques .

Les espèces du genre *Atriplex* sont caractérisées par le haut degré de tolérance à l'aridité et à la salinité et de fournir des fourrages riches en protéines. Elles ont la propriété de produire une abondante biomasse foliaire (**Mulas et Mulas, 2004**)

Les espèces du genre *Atriplex* sont caractérisées par le haut degré de tolérance à l'aridité et à la salinité et de fournir des fourrages riches en protéines. Elles ont la propriété de produire une abondante biomasse foliaire même pendant les périodes défavorables de l'année (**Mulas et Mulas, 2004**). Pratiquement toutes les espèces appartenant au genre *Atriplex* sont dioïques; il existe cependant des arbustes monoïques (**Mullas, 2004**). Selon (**Mulas et Mulas, 2004**), *L'Atriplex halimus.L*, s'est bien adaptée aux terrains salino-argileux et aux milieux caractérisés par des précipitations annuelles inférieures à 150 mm, résiste très bien au froid même au-delà de -10°C .

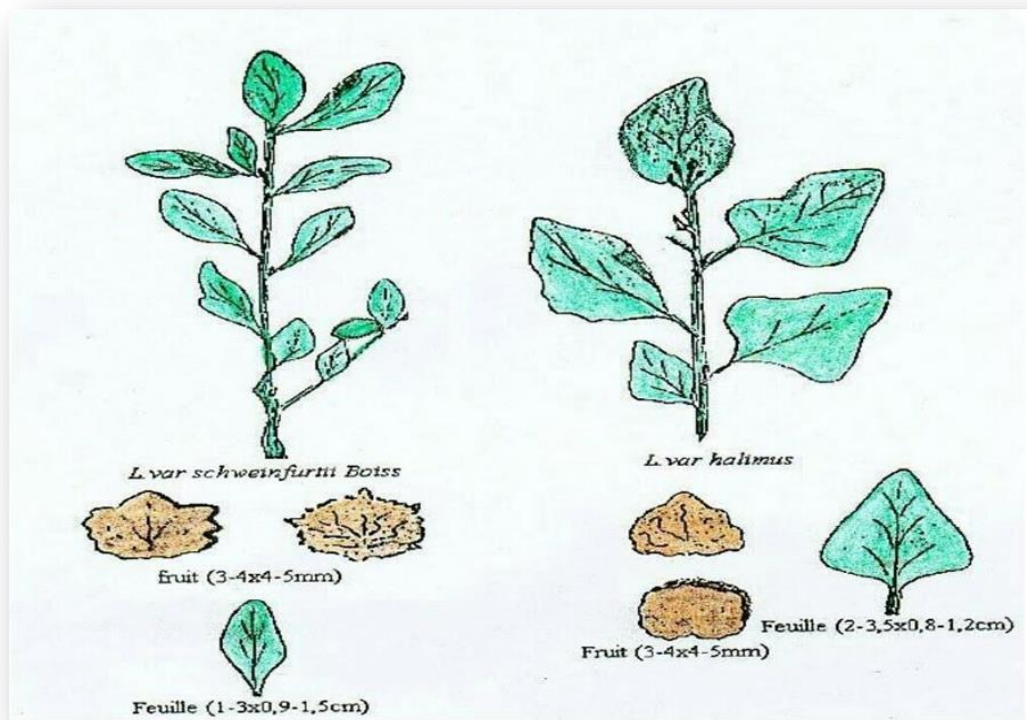


Figure04: Représentation *Atriplex Halimus* (Maalem, 2002).

1.3. Systématique

Atriplex halimu.L (nom usuels Guetaf, Arroche Halime, Pourpier de mer) (**Negre, 1961**) est le plus grand et le plus diversifié de la famille des Chénopodiacée (**Mulas.et Mulas,**

2004), présente deux sous espèces distinctes qui diffèrent par leur morphologie (densité de feuillage et longueur des rameaux florifères) et loge écologique (**Ben Ahmed et al., 1996**).

- *Atriplex halimus Subphalimus* : généralement plus feuillée se rencontre sur les zones du littoral semi-aride à humide.
- *Atriplex halimus Subpschweifurthi* : rameaux florifères dépourvus de feuilles; c'est une espèce des zones arides et désertiques (**Francllet et Le Houérou, 1971**).

Tableau07: Classification botanique d'espèce *Atriplex Halimus.L.* (**Quezel et Santa, 1962;** **Dupont et Guignard, 2007**)

Règne	Végétale
Embranchement	Spermaphytes
Sous embranchement	Angiospermes
Classe	Dicotylédones
Sous classe	Préastéridées
Ordre	Caryophyllades
Sous ordre	Amaranthacées
Famille	Chénopodiaceae
Genre	<i>Atriplex</i>
Espèce	<i>halimus</i> L

1.4. Noms vernaculaires

❖ En Arabe

G'ttaf, (legtaf) en algérie (**Longuo et al., 1989**), chanane en maroc (**Aboura,2005**), Aramass(**Quezel et santa,1962**), HachichatEzzaj, Ghassoul el Aachebi (**Halimi,1997**).

❖ En Français

Pourpier de mer, Arroche maritime, Arroche sauvage, Arroche halime (**Picard et al., 1982**). Epinard de mer, nommé localement dans le sud de la France « blanquette ».

❖ En Anglais

Saltbush. Mediterranean, Saltbush (**Ortiz-Dorda et al., 2005**), Roghaata, cape saltbush, Brakbos, Brakvaalbos, Soutbos, Vaalbosse, Aalbrak (**Anonyme, 2000**).

1.5. Description botanique et morphologique de genre *Atriplex halimus*.

Les plantes du genre *Atriplex* se rencontrent dans la plupart des régions du globe, plus de 400 espèces d'*Atriplex* identifiées sur tous les continents et compte environ 200 espèces réparties dans les régions tempérées et subtropicales; entre 20 et 50 de latitude nord et sud (**Le Houérou, 1992**). *L'Atriplex* est une plante arbustive de la famille des chénopodiacées avec environ 417 espèces, dont 48 dans le bassin méditerranéen (**Le Houérou, 1992**). monoïque et exogamie (**Le Houérou, 1992; Cibilis et al., 1998; Zervoudakis et al. 1998; Haddioui et Baaziz, 2001**). En Afrique du Nord, le genre *Atriplex* comprend 15 espèces spontanées et 2 espèces naturalisées, soit 07 espèces vivaces, 01 biennale et 09 annuelles. Le genre *Atriplex* appartient au groupe des plantes ayant un métabolisme photosynthétique de type C4 ce qui explique leur résistance au déficit hydrique (**Rozema, 1996**). L'ovaire est constitué par une seule loge, trois carpelles et deux étamines ; il produit un seul ovule qui en mûrissant produit un akène (**Chalandre, 2000**).

2. Morphologie

L'aspect de la plante peut varier d'un pied à l'autre, voir même d'une branche à une autre suivant l'état de développement et la saison (**Ozenda, 1983; Le Houérou, 1992**). *L'Atriplex* est un arbuste de 1 à 3 m de hauteur, très touffu à teinte argentée, à rameaux terminés par des grappes allongées et un peu ramifiées (**Ozenda, 1977**).

Atriplex halimus est une espèce pérenne ligneuse des zones steppiques et littorales atteignant 2m de hauteur, mais se présentant le plus souvent sous forme d'un buisson de 40 à 100 cm de haut pour une circonférence comprise entre 10 et 30 cm et pouvant aller parfois jusqu'à 70 cm.

2.1. Feuilles

La forme des feuilles varie selon la provenance de l'individu et selon l'état physiologique de la plante ou la position de la feuille sur un axe (**Dutuit, 1999**). Les feuilles est très variable dans la forme 10-30 mm de long et 5-20 mm de large (**Le Houérou 1992**). Elles sont alternes, pétiolées, plus au moins charnues, couvertes de poils vésiculeux blanchâtres, ovales, assez grandes et font 2 à 5 cm de longueur et 0,5 à 1 cm de largeur. La

graine est d'une teinte roussâtre (Franclet et Le Houérou, 1971, Quezel et Santa, 1962, Mesbah, 1998 ; Maalem, 2002). Elles sont arrondies, variables, diversement dentées, parfois encore sagittées (Burnie et al 2003), atténuées à la base, entières, alternes, linéaires-lancéolées, uninerviées (Welsh et al., 1987). Luisant couvertes de poils vésiculaires très riche en sel (Guillonnet et Huon, 1983 ; Duperat,1997).

2.2. Graine

Les graines sont rousses, de position verticale, lenticulaire de couleur brune foncée. Elle est terne et entourée de péricarpe membraneux (Negre., 1961). Les graines d'*Atriplex halimus* sont des akènes (Piotto et al., 2003) ont un diamètre 0.9 à 1.1 mm (cactroviejo et al., 1990).terne(negre, 1961). Elle sont d'une très grande légèreté (pitt.2004). Les graines d'*Atriplex halimus* présentent une grande habileté à germer sous les conditions fortement salines, (Zid et al, 1977).

2.3. Fleur

Les structures florales d'*A. halimus* présentent de grand polymorphisme. Elles sont de très petites tailles, de couleur jaunâtres, cachées entre les bractées, en long glomérule. Cette espèce a été considérée comme monoïque ou dioïque, elle porte des types floraux, morphologiquement et fonctionnellement hermaphrodites (Talamali et al., 2003).

2.4. Racine

Les racines sont grosses, d'abord étalées obliques, puis s'enfonçant verticalement jusqu'à une profondeur variable avec le sol et l'âge du plant (Negre, 1961). Son système racinaire est constitué d'une racine pivotante et les petites racines nourricières latérales. Le pivot se prolonge souvent plus de 6 m (Welsh et al., 1987). Elle peut atteindre 3 à 5 fois la longueur de la tige. Elle est formée de radicelles blanchâtres (Maire, 1962). La croissance racinaire est souvent un indicateur de la capacité de la plante à s'adapter à la sécheresse (Johnson et al., 1991).

2.5. Tige

Les tiges de cette plante sont très rameuses d'une couleur blanche grisâtre plus ou moins anguleuse entièrement feuillées (Negre, 1961), formé des touffes pouvant atteindre 1 à 3m de diamètre. Il est très polymorphe, son port peut être dressé, érige ou intriqué, les rameaux portent des grappes allongées portant des grains (Gougue, 2005).



Figure 05: Touffes d'*Atriplex Halimus* de la région de Tébessa (**Randa et Loubna, 2021**)

3. Répartition géographique et l'habitat

3.1. Répartition dans le monde

Les plantes du genre *Atriplex* sont présentes dans la plupart des régions du globe et se caractérisent par leur grande diversité, sont dominantes dans de nombreuses régions arides et semi arides du monde (**Osmond et al., 1980 ; Mc Arthur et Sanderson, 1984**). *A. halimus* pousse naturellement à travers le bassin méditerranéen jusqu'à l'Asie occidentale (**Al-Turki et al., 2000 ; Walker et al., 2014**). On trouve également des exemplaires de ce genre dans les régions polaires, bien qu'en nombre très réduit. Généralement, il est associé aux sols salins ou alcalins, désertiques ou semi-désertiques (**Rosas, 1989 ; Mulas, 2004**). Il a été planté pour le fourrage animal et la stabilisation physique du sol dans les zones arides et semi-arides de la Méditerranée et au-delà. *A. halimus* se produit naturellement dans toute l'Eurasie, de la Macaronésie à travers le bassin méditerranéen et dans le Moyen-Orient et l'Asie occidentale: y compris le Portugal, la France, l'Espagne, l'Italie, la Grèce, la Turquie, Chypre, Israël, la Syrie, le Liban, la Jordanie, la Tunisie, le Maroc, l'Algérie, la Libye, l'Égypte et l'Arabie saoudite (**Le Houérou, 1992 ; Al-Turki et al., 2000 ; Walker et al., 2005**).

3.2. Répartition en Afrique

En Afrique du Nord, le genre *Atriplex* comprend 15 espèces spontanées et 2 espèces naturalisées, soit 07 espèces vivaces, 01 biennale et 09 annuelles (**Francllet et Le Houérou 1971**).

Tableau 08: Répartition des espèces d'*Atriplex* dans le monde (Le Houérou, 1992).

Pays ou régions	Nombre d'espèces et/ou sous espèces	Pays ou régions	Nombre d'espèces et/ou sous espèce
Etats-Unis	110	Baja Californie (Mexique)	25
Australie	78	Afrique du Nord	22
B. méditerranéen	50	Texas	20
Europe	40	Afrique du sud	20
EX. URSS	40	Iran	20
Proche orient	36	Syrie	18
Mexique	35	Palestine/Jordanie	17
Argentine	35	Algérie / Tunisie	17
Californie	32	Bolivie / Pérou	16
Chili	30		

Tableau 09: Les *Atriplex* en Afrique du nord (Mâalem, 2011)

Espèces spontanées		Espèces naturalisées		Espèces Introduites
Annuelles	Vivaces	Annuelles	Biannuelles	Vivaces
A.chenopodioides	<i>A.colore</i>	A.inflata	A.semibaccata	<i>A.nummularia</i>
A.dimorphostegia	<i>A.coriacca</i>			<i>A.lentiformis</i>
A.hastata	<i>A.glauca</i>			
A.littoralis	<i>A.halimus</i>			
A.patula	<i>A.malvana</i>			
A.rosea	<i>A.mollis</i>			
A.tatarica	<i>A.portulacoides</i>			
A.tornabeni				

3.3. En Algérie

L'atriplex est spontané dans les étage bioclimatique semi-aride et arides les plus grandes superficies correspondent aux zones dites steppiques (tébessa, Batna, Biskra...) Particulièrement dans la région de Béchar (Benrebiha., 1987).

Tableau10: Répartition des différentes espèces d'*Atriplex* dans l'Algérie (Qezel et Sant 1962).

Espèces	Nom	Localisation
Annuelles (Diffèrent généralement par la forme des feuilles, du port et des valves fructifères)	<i>A. Chenopodioides</i> Batt.	Bouhanifia (Mascara) (très rare)
	<i>A.littoralis</i> L.	Environ d'Alger (rare).
	<i>A. hastata</i> L.	Assez commune dans le Tell et très rare ailleurs.
	<i>A. patula</i> L	Assez commune dans le Tell et très rare à Aflou.
	<i>A. tatarica</i> L.	Annaba et Sétif (très rare)
	<i>A. rosea</i> L.	Biskra et sur le littoral d'Alger et d'Oran (très rare)
	<i>A. dimorphostegia</i> Kar et Kir	Sahara septentrional (assez commune), Sahara central (rare).
	<i>A. tornabeni</i> Tineo.	Sahel d'Alger, Golfe D'Arzew (très rare).
Vivaces)Diffèrent généralement par la forme des feuilles, la taille de l'arbrisseau, le port des tiges et l'aspect du périanthe(<i>A. portulacoides</i> L.	Assez commune dans le Tel
	<i>A. halimus</i> L	Commune dans toutes l'Algérie.
	<i>A. mollis</i> Desf	Biskra et Oued-el-Khir (très rare).
	<i>A. coriacea</i> Forsk.	
	<i>A. glauca</i> L	Commune en Algérie.

4. Intérêts de *Atriplex halimus*

- C'est une source de minéraux, vitamines et protéines pour le bétail (**El-Shtnawi et mohawesh, 2000**).
- les *Atriplex* constituent une réserve fourragère importante, utilisable par les ovins, les caprins et les camélidés (**Castroviejo et al., 1990**).
- *Atriplex halimus* est particulièrement résistante au NaCl (**Ben Ahmed et al., 1996**). Les *Atriplex* sont utilisés avec efficacité pour la fixation des dunes grâce à leur forme en touffe (**Edmond, 1963**).
- La couverture d'*Atriplex* accroît considérablement la perméabilité des sols et l'augmentation de drainage dans les horizons superficiels (**Benrebiha, 1987**).
- *Atriplex* participe à la reconstitution d'un tapis végétal qui joue un très grand rôle dans la lutte contre l'érosion éolienne par la fixation des particules du sol (**H.C.D.S, 1996**).
- Certaines espèces d'*Atriplex*, sont largement connues pour leur intérêt médicinal traditionnel, à savoir dans le traitement digestif, respiratoire, et possèdent des propriétés antipyrétiques, (**DeFeo et Senatore, 1993**). Et antihyper glycémiante (**De Feo et Senatore, 1993 ; kambouche et al., 2011**).
- Selon (**Dutuit et al, 1991**) *Atriplex halimus.L* est utilisé comme plante médicinale dans la pharmacopée traditionnelle.
- Le repeuplement à base de buissons fourragers constitue une excellente solution pour la désertification (**Dutuit et al., 1991**).

5. Résistance d'*Atriplex halimus* aux différents stress

A. halimus est une espèce endémique des régions méditerranéennes arides et semi-arides fortement résistante aux différents stress tels que ; la salinité (**Wong et Jager, 1978; Bajji et al, 1998**), l'ensoleillement accru (**Streb et al., 1997**), la sécheresse (**Martinez et al, 2004**). Les métaux lourds (**Lutts et al, 2004 ; Nedjimi et Daoud, 2008 ; Lefèvre et al, 2009 ; Manousaki et Kalogerakis, 2009**). Et le froid (**Salahas et al., 2002 ; Walker et al, 2008**).

5.1. Résistance à la salinité

Comme d'autres halophytes, *Atriplex halimus* accumule les principaux ions de la salinité dans ses tissus en les stockant dans les vacuoles (**Walker et al., 2014**). Les halophytes sont

des plantes naturellement tolérantes au sel et poussent aussi bien, elles représentent la limite supérieure des capacités adaptatives des organismes végétaux à la salinité (**Khan et Duke, 2001**). *A. halimus* est particulièrement bien adapté aux régions arides affectées par la salinité. (**Bajji et al., 1998**).

5.2. Résistance au froid

Les espèces d'*Atriplex* sont relativement tolérantes au froid et leur voie photosynthétique demeure active de 4 à 10 °C (**Walker et al, 2008**). Les populations diploïdes de cette espèce ont montré une plus grande acclimatation au froid que les tétraploïdes, ceci est apparemment dû à un plus grand ajustement osmotique et à des teneurs faibles en eau dans les feuilles (**Walker et al, 2008**).

5.3. Résistance aux métaux lourds

La germination de *A.halimus* semble être résistant à des concentrations élevés d'ETM (**Martínez-Fernández et Walker, 2012; Mesnoua et Lormani, 2015**). *A. halimus* accumule de grandes quantités du Cd dans ses tissus (surtout dans les racines), suggérant la possibilité de leur utilisation dans la décontamination des sols pollués par le Cd (**Lutts et al, 2004; Nedjimi et Daoud, 2008**).

5.4. Résistance à la sécheresse

A. halimus possède des racines très longues qui lui permettent l'absorption de l'eau des horizons profonds (jusqu'à 5 m) (**Le Houérou, 1992**).

Partie 02

Partie Expérimentale



Chapitre 01

Matériels et Méthodes

1. Matériel et Méthodes

1.1. Matériel végétal

Le matériel végétal ayant fait l'objet de la présente étude concerne les graines de l'*Atriplex halimus* de la famille chénopodiacée. Il a été choisi en raison de son utilisation au laboratoire comme plante modèle pour ces capacités de résistance et d'adaptation aux stress abiotiques. L'espèce *Atriplex* a été utilisée en tant que matériel biologique expérimental. Des plantules ont été ramenées de la région de Tébessa de la commune de Morsott, Sud EST Algérien elles ont été prélevées au moins de mars 2021.



Figure 06: Grain et plantes d'*Atriplex halimus*.L site Tébessa (Randa et Loubna, 2021)

1.1.1. Localisation et région de site

Morsott est une commune sise à trente-quatre kilomètres au nord du chef-lieu de wilaya de Tébessa sur la route nationale 16, reliant Tébessa à Annaba. Morsott est situé à l'aval du plateau du Djebel Boukhadra sur le versant El Hodh.

Tableau11: Coordonnées géographiques de site de récolte

Coordonnées géographiques de Morsott	Latitude : 35.6683, Longitude : 8.00722 35° 40' 6" nord, 8° 00' 26" Est
Superficie de Morsott	29 600 hectares 296,00 Km ²
Altitude de Morsott	762m
Climat de Morsott	Climat méditerranéen avec été chaud



Figure 07: Carte de situation des sites de récolte des graines d'*Atriplex halimus*

1.1.2. Décorticage des graines

Dès la récolte, les graines des quatre provenances ont été soigneusement dépoussiérées, puis séchées dans l'étuve pendant 24 heures à 45°C pour faciliter leur décorticage manuel. Les graines sont séparées manuellement des valves fructifères ensuite trier. L'enlèvement des valves fructifères semble éliminer les inhibiteurs chimiques qui restreignent la germination (Osman et Ghassali, 1997).



Figure 08: Décorticage des graines d'*Atriplex halimus* (Randa et Loubna, 2021)

1.1.3. 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.

1.2. Préparation du substrat (sol)

Le substrat utilisé est constitué d'un mélange de sable et de terreau industriel à des proportions respectives de (1v/2v). Avant de l'utiliser, le sable subit plusieurs opérations de préparation, en premier lieu, il a été tamisé afin d'éliminer les débris végétaux et animaux, pour obtenir du sable fin. Puis rincé abondamment à l'eau de robinet, ensuite trempé dans une solution de HCl dilué dans l'eau distillé à raison de 1/5, pour éliminer les sels (chlorures, les carbonates). Le sable est ensuite rincé plusieurs fois à l'eau distillé, séché à l'air libre (Aoumeur, 2012).

1.3. Mise en germination et repiquage

Au laboratoire, nous avons préparé au préalable les graines en les décortiquant de leur bractée afin de faciliter la germination. Ensuite, les graines sont sélectionnées selon leur morphologie, leur taille, leur couleur (brune) et leur aspect sanitaire (absence de contaminations) puis elles sont rincées plusieurs fois à l'eau distillée.

Après la germination, les grains ayant des radicules plus de 2 mm de longueur ont été repiqués dans des pots. Elles sont ensuite mises en culture pendant 60 jours dans les mêmes conditions que pour la germination.

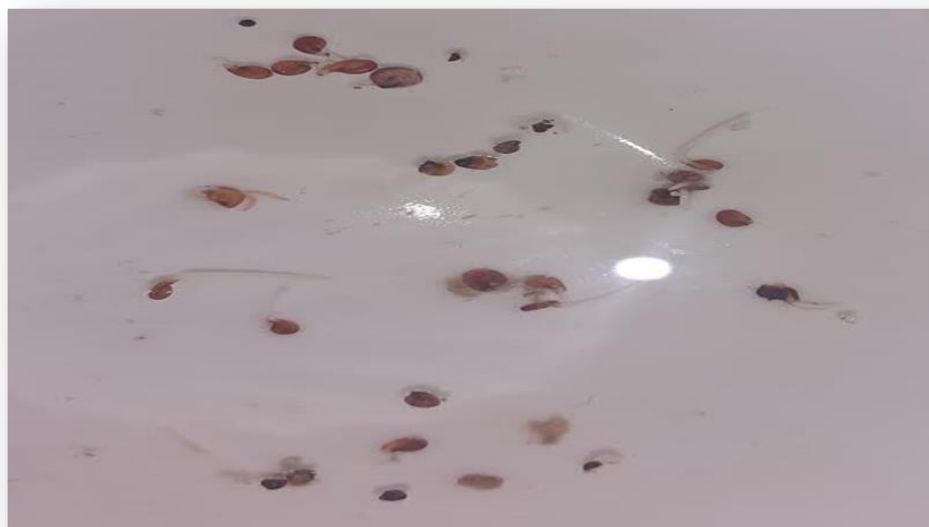


Figure09: Les grains ayant des racicules plus de 2 mm de longueur (**Randa et Loubna, 2021**)

1.4. L'arrosage

L'application des nutriments et l'irrigation sont des facteurs importants déterminant la croissance et le rendement de la plante (**Olympios, 1999**).

L'arrosage est effectué trois fois par semaine par l'eau distillée; substituée une fois sur trois par une solution nutritive de Hoagland jusqu'à l'obtention d'un végétal suffisant pour les analyses.

Tableau 12: Composition de la solution nutritive de Hoagland (**Hoagland and Arnon, 1950**)

Eléments minéraux	Concentration mg/L
$(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$	115,3
de $\text{B}(\text{OH})_3$	2,86
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	656,4
$\text{CuSO}_4 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$	0,08
$\text{Fe}(\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6)_3 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$	5,32
$\text{MgSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$	240,76
$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	1,81
MoO_3	0,016
KNO_3	606,6
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$	0,22



Figure10: Plantule d'*Atriplex Halimus* après L'arrosage à l'eau distillée et solution nutritive
(Randa et Loubna, 2021)

1.5. Protection de semis

Nous avons installé une sous serre en toile vert pour éviter toute menace de prédateurs (les insectes, oiseaux,...) comme elle est illustrée dans la figure ci-dessous :



Figure11: Protection des semis (installation d'un sous serre) (Randa et Loubna ,2021)

1.6. Application du stress

Le stress métallique a été appliqué à la plante après 60 jours de la culture pendant deux semaines. Cinq doses métalliques (0, 2000, 4000, 6000 et 8000 ppm) ont été choisis pour les métaux Zn, Pb et Cd, avec de trois répétitions pour l'ensemble des doses métalliques appliquées.

1.7. Dispositif expérimental

Pour l'installation de l'expérience dans la serre, on a choisi d'installer les plantes en randomisation totale répartie en 3 blocs, chaque bloc pour un métal avec cinq doses, chaque dose comporte trois répétitions.

Celui-ci a été obtenu après avoir réalisé un tirage aléatoire, nous permettant de nous affranchir des facteurs environnementaux pouvant fausser nos résultats.

2. Méthodes

2.1. Prélèvement et préparation du matériel végétal pour les analyses

Après deux semaines de l'application du stress, les plantes de l'*Atriplex* sont prélevées et amenées au laboratoire. Les feuilles et les racines sont séparées. Les feuilles sont prélevées en prenant le soin de les mettre dans des sachets de papier kraft de manière à les protéger de la lumière.

Les racines ont été rincées soigneusement à l'eau du robinet pour éliminer toute trace du substrat. Elles sont ensuite transvasées dans du papier aluminium.

Les échantillons sont alors conservés à -80°C . Ça ne modifie pas la quantité de protéines présentes dans les échantillons, ni le niveau d'activité de certaines enzymes, même après deux mois de conservation (Saint-Martin et Pourrut, 2005).



Figure 15: Prélèvement les échantillons d'*Atriplex* (Randa et Loubna, 2021)

2.2. Paramètres étudiés

2.2.1. Croissance en longueur des tiges et racines de la plante

La croissance en longueur de la partie aérienne et racinaire de la plante a été mesurée après l'application du stress métallique. La hauteur des tiges et la longueur racinaires ont mesurées en centimètres (cm).

2.2.2. Dosage des protéines totales

Les protéines foliaires et racinaires d'*Atriplex* sont dosées selon la méthode de Bradford, (1976) utilisant l'albumine de sérum de bœuf (BSA) comme standard (Merk). La gamme d'étalonnage est réalisée à partir d'une solution mère de BSA (1mg/ml).

Les densités optiques sont mesurées grâce à un spectrophotomètre, la mesure est réalisée à une longueur d'onde de 595 nm.

2.2.3. Dosage de la proline

La proline est dosée selon la technique utilisée par **Troll et Lindesly (1955)**, simplifiée et mise au point par **Dreier et Goring (1974)** et modifiée par **Monneveux et Nemmar (1986)**. Le principe est la quantification de la réaction proline-ninhydrine par mesure spectrophotométrique. La proline se couple avec la ninhydrine en formant un complexe coloré. L'intensité de la coloration est proportionnelle à la quantité de proline dans l'échantillon. L'extraction de la proline consiste à :

- Prélever 100 mg de matière fraîche foliaire et racinaire pour chaque répétition et les mettre dans des tubes à essai;
- Ajouter 2 ml de Méthanol à 40 %;
- Porter les tubes couverts (pour éviter la volatilisation de l'alcool) à l'ébullition au bain-marie à 85 °C pendant 60 min;
- Prélever, après refroidissement, 1 ml de l'extrait de chaque tube et mettre dans de nouveaux tubes auxquels on ajoute 1 ml d'acide acétique;
- Ajouter, dans chaque tube, 1 ml de mélange contenant 120 ml d'eau distillée, 300 ml d'acide acétique, 80 ml d'acide orthophosphorique (H_3PO_4 , densité 1,7) et 25 mg de ninhydrine;
- Porter le mélange à ébullition durant 30 min. La couleur de la solution vire vers le rouge;
- Extraire le chromatophore, après refroidissement des solutions, avec 5 ml de toluène; deux phases se séparent après agitation au Vortex;
- Prélever la phase supérieure contenant le chromatophore à laquelle on ajoute 5 mg du sulfate de sodium oxydé ($Na_2 SO_4$) à l'aide d'une spatule pour éliminer l'eau qu'elle contient;
- Lire la densité optique des échantillons à l'aide d'un Spectrophotomètre UV à une longueur d'onde de 528 nm et la concentration de la proline est exprimée en $mg.g^{-1}$ de MF.



Figure 17: Dosage de la proline (Randa et Loubna, 2021)



Figure18: Spectrophotomètre UV à une longueur d'onde de 528 nm (Randa et Loubna, 2021)

2.2.4. Dosage enzymatique.

L'extraction consiste à broyer 100 mg de feuille dans 2 ml de tampon phosphaté (0.1 M, pH 7) contenant 1mM acide éthylène diamine tétra acétique (EDTA). Le surnageant récupéré après agitation et centrifugation du broyat à 14000 g pendant 20 min, a constitué l'extrait enzymatique (**Latef et Chaoxing, 2011**).

L'activité catalasique est mesurée selon la méthode **d'Aebi (1984)**. Le mélange réactionnel contient 200 μ l de l'extrait enzymatique et 2 ml de H₂O₂ (10mM). La cinétique a été suivie par spectrophotométrie à 240 nm après 1 min toutes les 10 seconde.

Le milieu réactionnel conçu pour le dosage de l'activité des polyphenoloxidasés (PPO) contient 2ml de Catéchol (10mM). La réaction a été amorcée par addition de 100 μ l d'extrait enzymatique et s'est étendu durant 3 min à température ambiante, par la suite l'absorbance a été lue à 410 nm (**Hori et al., 1997**).

L'activité du catalase et polyphenoloxidase a été défini en étant la quantité d'enzyme utilisé pour l'oxydation de 1 μ mol de H₂O₂ ou du catéchol par mg de protéine par min.

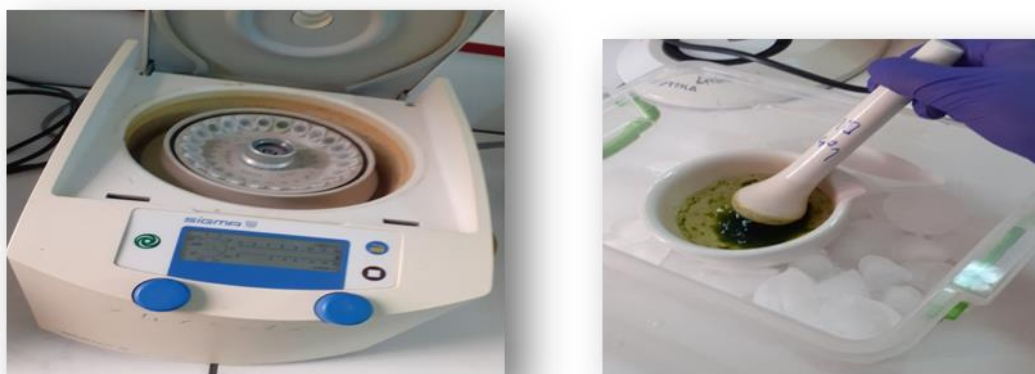
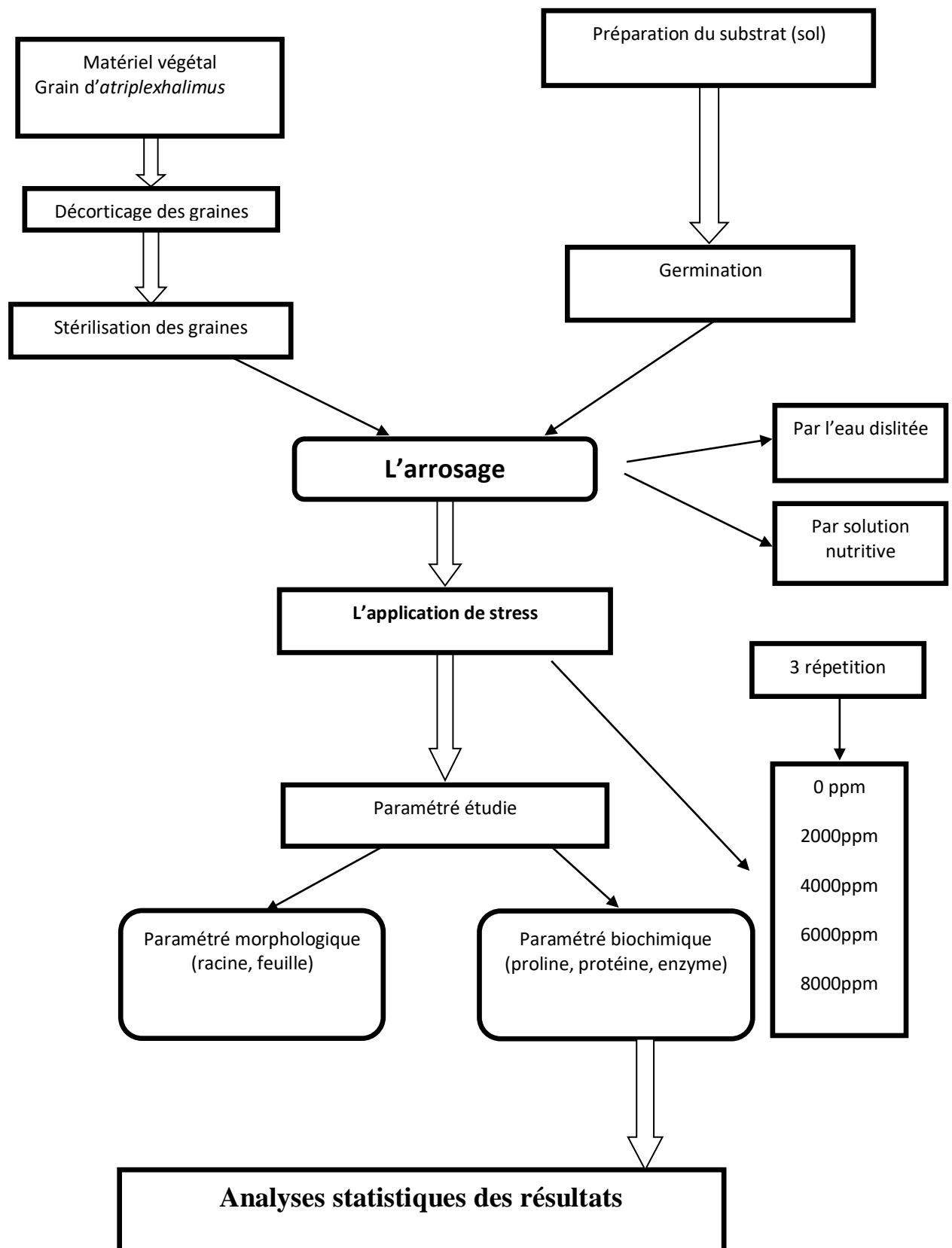


Figure 19: Broyage de feuille dans tampon et centrifugation du broyat à 14000 g pendant 20 min (**Randa et Loubna, 2021**)

2.3. 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). Les moyennes sont comparées à l'aide du test de Dunnett, lorsque cela est nécessaire (différences au moins significatives).



Chapitre 02

Résultats et Discussion

1. Résultats et discussion

1.1. Résultats

Dans notre travail, nous avons essayé de montrer en évidence les modifications morphologiques, physiologiques et biochimiques de plantules d'*A. Halimus* traitées par 0, 2000, 4000, 6000, 8000 ppm de Zn, Pb et Cd pendant 15 jours.

1.1.2. Effet du stress par les métaux lourds sur la longueur des tiges et racines chez l'*Atriplex halimus*

L'analyse de la variance (**tableau 15**), montre que les différentes concentrations influent de manière significative ($p < 0.013$) sur la longueur des partie aériennes d'*Atriplex halimus*, à hautement significative sur la longueur de la partie racinaire ($p < 0.007$).

Tableau 15: Analyse de la variance de la longueur des tiges et racines d'*Atriplex halimus* stressée au zinc, plomb et cadmium.

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
PA	12	648,859	54,072	2,815	0,013
PR	12	330,256	27,521	3,116	0,007





Figure16: Croissance en longueur des tiges et racines de la plante après stress métalliques

L'analyse des résultats obtenus (figure 21) montre une diminution de la longueur de la partie aérienne pour les concentrations 2000 et 4000ppm avec le Zinc comparativement au témoin (**14 cm**). Par contre la longueur augmente avec les concentrations 6000 et 8000 ppm jusqu' à 24 cm.

Alors que pour le **plomb** une augmentation a été enregistré (21, 23, 16 et 17 cm) pour toutes les concentrations comparativement au témoin.

Pour les plantes stressée avec le **cadmium** nous avons obtenus une augmentation remarquable par rapport les témoins (**15, 18 cm**) à faible dose, avec une diminution importante jusqu'à **13 cm** à forte dose.

En plus de ces effets observables, s'ajoute d'autres effets comme tâche blanche sur les feuilles et aussi jaunissement, suivi d'un flétrissement de feuille.

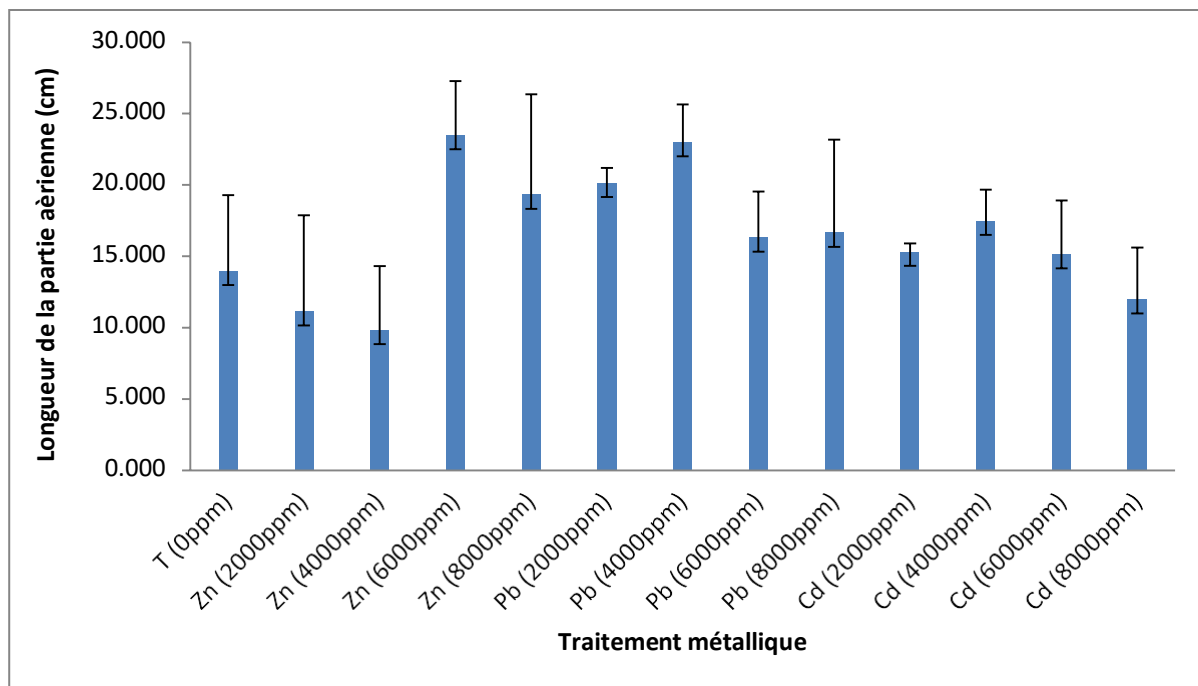


Figure 21: Effet des métaux lourds sur la longueur de la partie aérienne chez l'*Atriplex halimus*

Les résultats présentés dans les figures (22) montrent que la longueur de la partie racinaire diminue remarquablement sous l'effet des différents traitements appliqués avec une réduction nettement importante aux concentrations de Pb et Cd.

En présence de **zinc**, une diminution non significative de base de la longueur de racines pour toutes les concentrations a été observé, comparativement au témoin (**12, 10, 15, 13 cm**).

Tandis qu'en présence de **plomb** la longueur de racine a diminué substantiellement avec les concentrations appliquées, avec un effet hautement significatif sous le traitement à 2000ppm; et un effet significatif à 8000ppm.

Pour les concentrations de **cadmium** nous avons enregistré une diminution de la longueur de la racine, avec un effet hautement significative à 2000ppm, et très hautement significative à 6000ppm.

L'allongement des racines en milieu toxique par rapport à celui des racines en milieu normal permet d.oe remarquer que les racines de l'*Atriplex halimus* n'est tolérante qu'à la faible concentration chacun des métaux utilisés

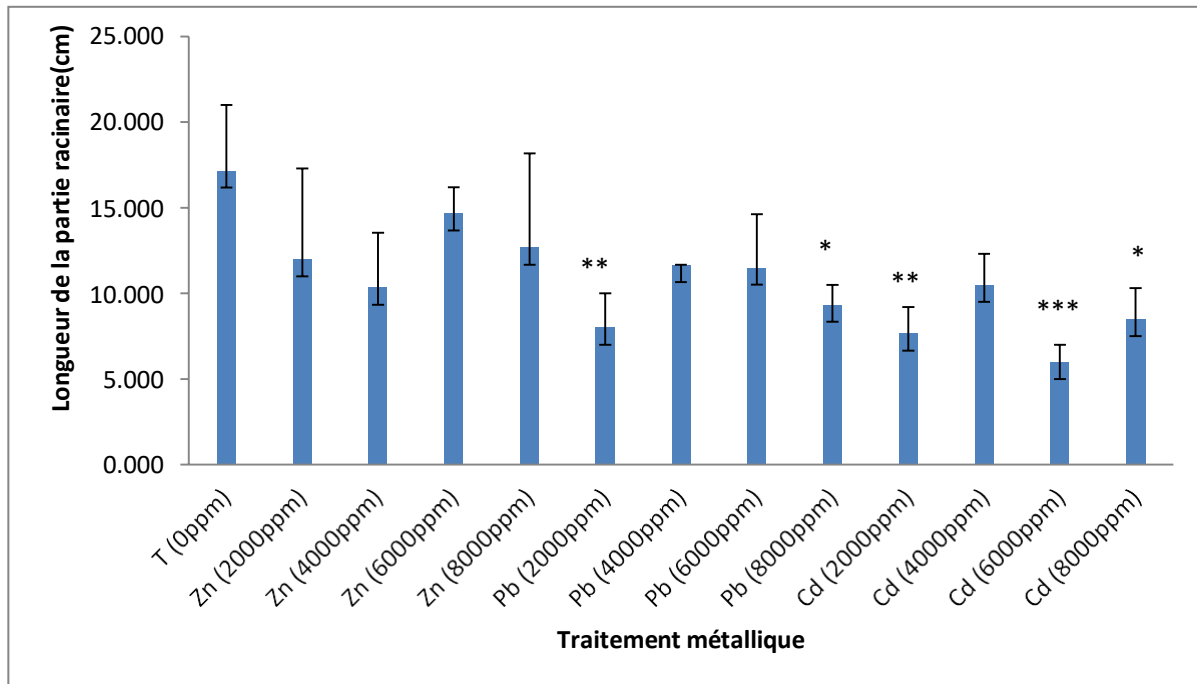


Figure 22: Effet des métaux lourds sur la longueur de la partie racinaire chez l'*Atriplex halimus*

*** Effet très hautement significatif; ** effet hautement significatif; * effet significatif

1.1.3. Effet du stress par les métaux lourds sur la teneur en protéines totale chez l'*Atriplex halimus*

Les résultats de l'analyse de la variance (**Tableau 16**), montrent que les différentes concentrations influent de manière hautement significative ($p < 0.004$) en protéine foliaire d'*Atriplex halimus* et aucun effet significatif (NS) pour les protéine racinaires (**p 0.114**).

Tableau 16: Analyse de la variance de la teneur en protéines totales des feuilles et des racines d'*Atriplex halimus* stressée au zinc, plomb et cadmium.

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Pro F	12	349,062	29,089	3,480	0,004
Pro R	12	200,375	16,698	1,744	0,114

La teneur des protéines totales des feuilles mesuré chez *Atriplex halimus* en présence à différentes concentration de zinc, plomb, cadmium est présenté dans la **figure 23**.

D'après les résultats obtenus la teneur en protéine foliaire augmente remarquablement sous l'effet des différentes concentrations de métaux. Cette augmentation est significative sous le traitement de Pb à 2000 ppm par rapport aux témoins

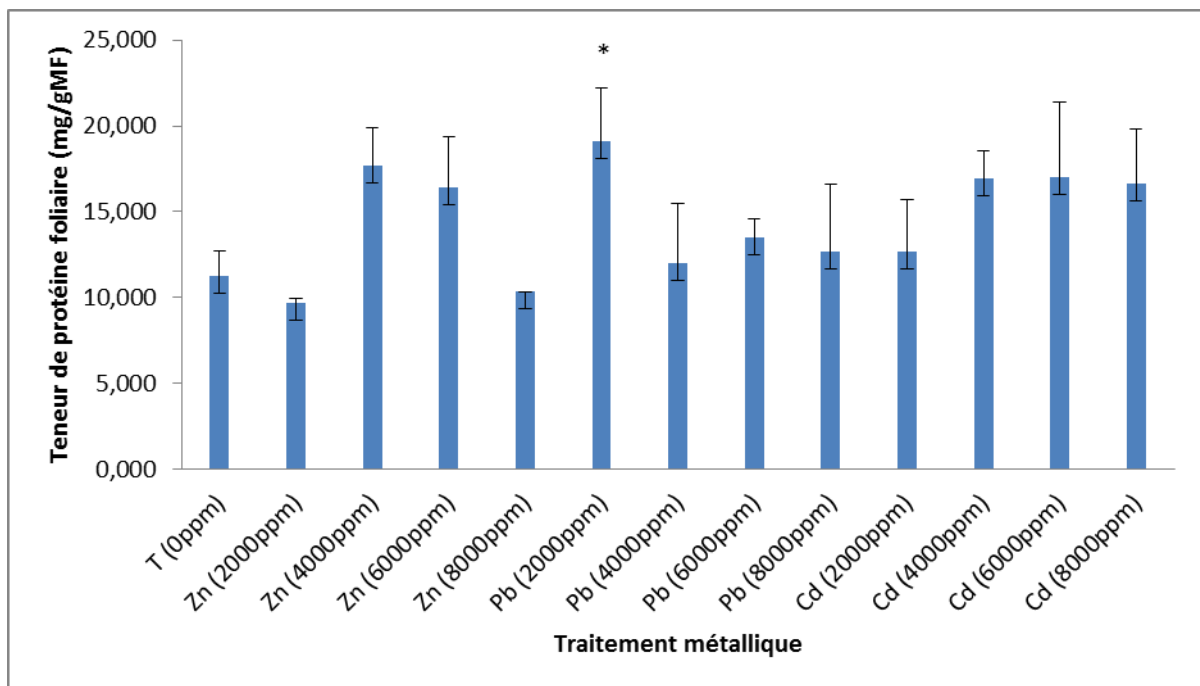


Figure 23: Teneur en protéines totales (mg. g⁻¹ de poids frais) des feuilles de l'*Atriplex halimus* stressée au zinc, plomb et cadmium. * significatif à 5%.

La teneur de protéine dans les racines sous le traitement de **Zn** à **2000 et 4000ppm** subit une légère diminution par rapport aux témoins, puis augmente lentement à 6000 ppm (**7mg.g-1**),

et 8000ppm. Pour le Pb on remarque une augmentation légère pour la teneur de protéine sous les traitements **2000, 4000 et 6000** ppm par rapport au témoin, et une diminution à **8000** ppm.

Les résultats montrent aussi une diminution légère sous les traitements **2000, 4000, 6000ppm** avec le **Cd** par rapport témoins, et une augmentation de la teneur en protéine est observée pour les plantes stressées à **8000 ppm**. La teneur en protéines totale tend à augmenter avec l'accroissement de la concentration de Cd.

D'une manière générale, les teneurs en protéines totales des feuilles chez *Atriplex halimus* sont supérieures par rapport les racines.

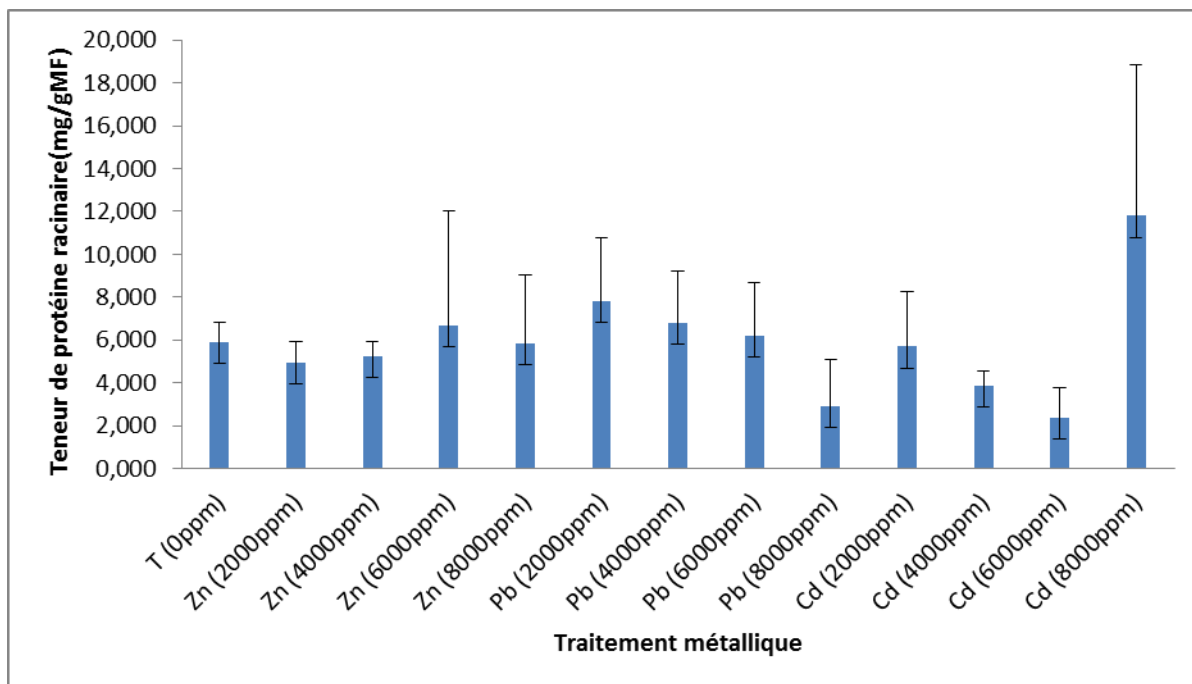


Figure 24: Teneur en protéines totales (mg. g⁻¹ de poids frais) des Racine de *Atriplex halimus* Stressée au zinc, plomb et cadmium.

1.1.4. Effet du stress par les métaux lourds sur la teneur en proline chez *Atriplex halimus*

La proline est un marqueur de la résistance aux contraintes abiotiques, est étudiée dans les organes des plantes d'*Atriplex halimus* L. Un dosage de proline a été réalisé, afin d'évaluer l'effet des métaux lourds sur les différents organes (racines, feuilles) des plantes d'*Atriplex halimus*.

Les résultats de l'analyse de la variance (**tableau17**), montrent que les différentes concentrations influent de manière hautement significative ($p < 0.004$) sur la teneur en proline racinaire d'*Atriplex halimus* et aucun effet significatif (NS) au niveau foliaire (**p 0.174**).

Tableau 17: Analyse de la variance de la teneur en prolines des feuilles et des racines d'*Atriplex halimus* stressée au zinc, plomb et cadmium.

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Proline F	12	2,102	0,175	1,715	0,174
Proline R	12	2,350	0,196	4,858	0,004

Les différentes concentrations de zinc et plomb provoquent une diminution notable de la teneur en proline foliaire. Tandis que cette teneur augmente avec la concentration plus élevée du Cd à 8000 ppm atteignant 1.400 mg.g⁻¹

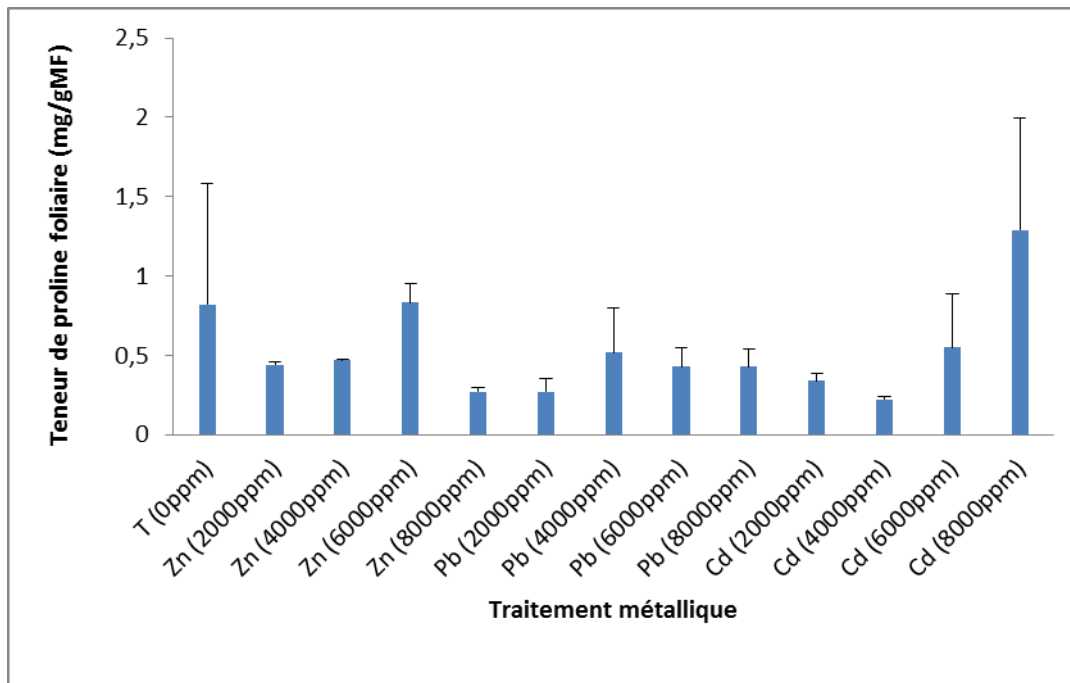


Figure 25: Teneur en prolines (mg. g⁻¹ de poids frais) des feuilles de L'*Atriplex halimus* stressée au zinc, plomb et cadmium.

La concentration de proline dans la racine augmente avec les doses croissantes des métaux (**figure 26**), surtout à 6000ppm et se trouve faible à Zn 8000ppm et Cd 4000ppm.

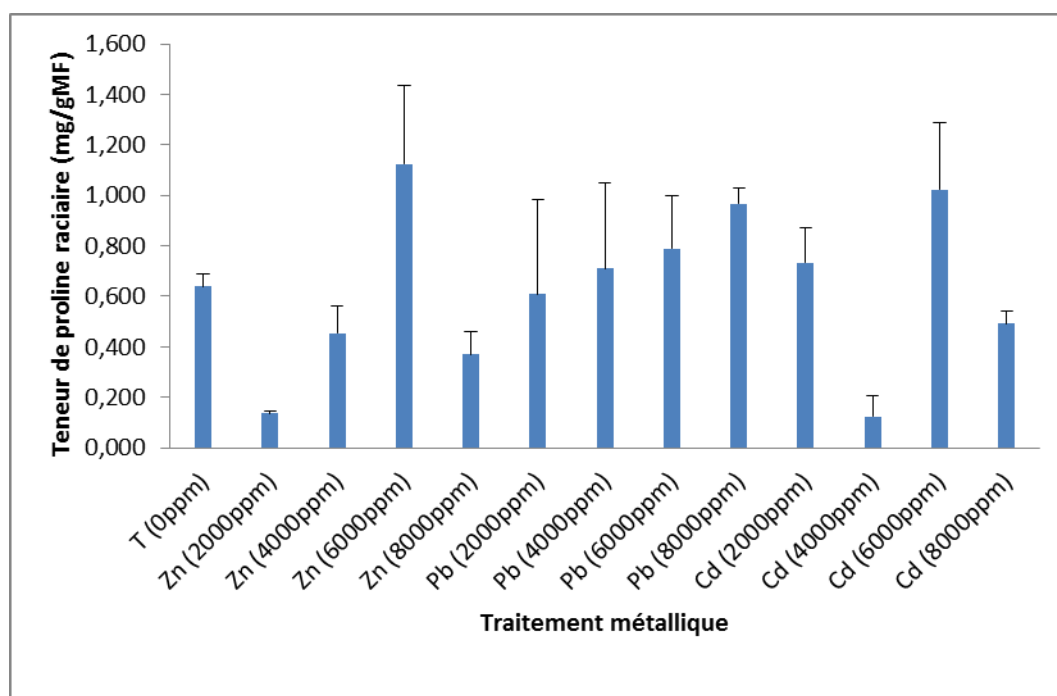


Figure 26: Teneur en prolines (mg. g⁻¹ de poids frais) des racines de l'*Atriplex halimus* stressée au zinc, plomb et cadmium.

1.1.5. Effet du stress par les métaux lourds sur les activités des enzymes antioxydants chez l'*Atriplex halimus*

Les résultats de l'analyse de la variance (tableau 18), montrent que le facteur métal à différentes concentrations influence de manière très hautement significative ($p < 0,0001$) sur l'activité de polyphénol oxydase dans les feuilles d'*Atriplex halimus* mais non pour la catalase ($p = 0,174$).

Tableau 18: Analyse de la variance des activités des enzymes antioxydants des feuilles d'*Atriplex halimus* stressée au zinc, plomb et cadmium.

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Catalase	11	2,102	0,175	1,715	0,174
PPO	11	17,164	1,560	8,088	< 0,0001

L'analyse des résultats présentés dans la **figure 21** montre que l'activité du PPO est très hautement significative à Cd **8000ppm** comparativement au témoin.

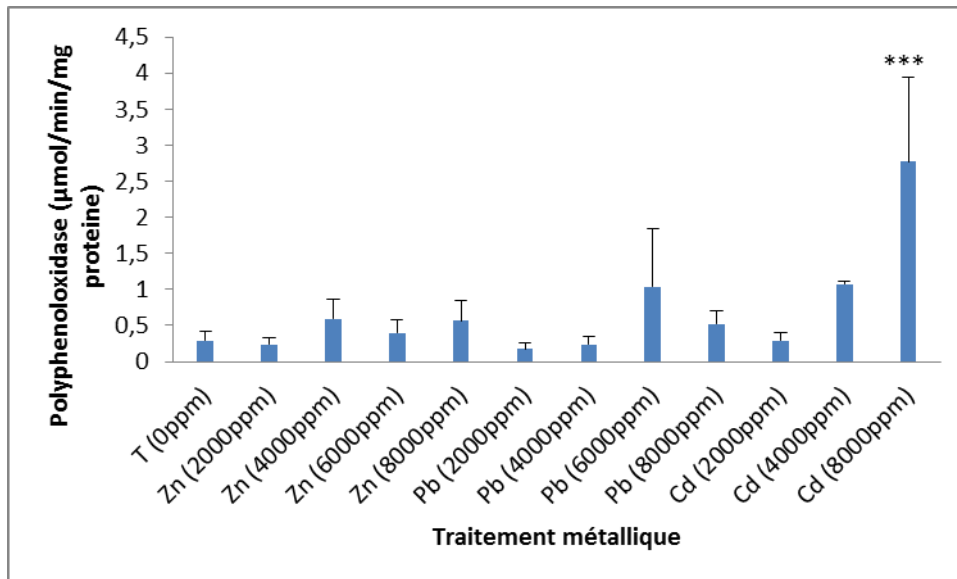


Figure 27: Effet du stress par les métaux lourds sur l'activité du polyphenoloxidase chez *Atriplex halimus*.

La figure 28 montre que l'activité catalase augmente progressivement par rapport au témoin avec la plus forte dose à 8000 ppm de façon non significative.

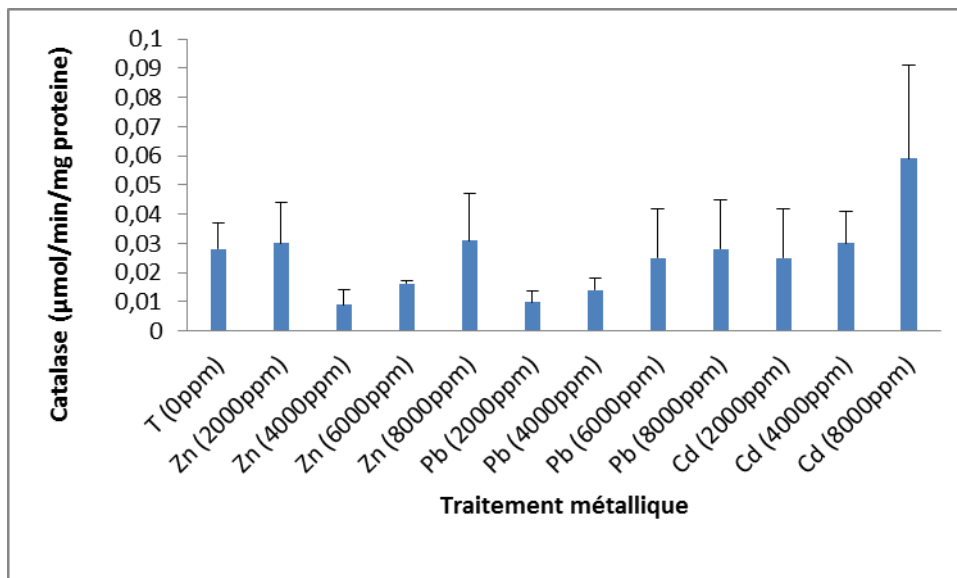


Figure 28: Effet du stress par les métaux lourds sur l'activité du catalase chez *Atriplex halimus*

2. Discussion

Dans le régné végétal, plusieurs stratégies sont observées pour faire face à un sol contaminé en métaux lourds (**Briat and Lebrun, 1999**). Les résultats obtenus montrent que le stress des métaux lourds induit des changements dans les plantes, inhibent l'allongement de la racine, (**Adriano, 2001; Sandialo et al., 2001; Sobkowiak et Deckert , 2003**). La réduction de croissance est généralement observée lorsque des plantes sont soumises au stress des élément traces métalliques (**Nada et al., 2007; Ran et al., 2014**).

L'Atriplex halimus se caractérise par la tolérance à la toxicité des métaux ce qui fait d'elle une vraie arme écologique devant la pollution (**Ortiz-Dorda et al., 2005**). Nos résultats Montrent que cette espèce est capable de tolérer de fortes concentrations de cadmium, plomb, zinc (**Mayer et Poljakoff-Mayber, 1982**). Les racines sont les principales cibles des ions métalliques et leur croissance est sévèrement affectés que celle des parties aériennes (**Márquez-García et al., 2013**).

La longueur des racines est souvent utilisée comme bioindicateur de phytotoxicité des métaux lourds (**Silvia et al., 2009**). Nos résultats sont donc en adéquation avec ceux de (**Márquez- García et al., 2013**).

Au niveau physiologique une exposition au plomb entraîne de nombreuses perturbations (**Souahi et al., 2021 ; Souahi et al., 2017**). Les résultats obtenus montrent une inhibition de la croissance qui résulta une réduction d'élongation des tiges à différentes concentrations du plomb cette réduction de la croissance a également été relevée chez plusieurs espèces soumises à la présence du plomb par exemple certaines espèces de fabacées (**Huang et Cunningham, 1996 ; Piechalak et al., 2002**).

En effet, notre étude montre que la teneur en proline augmente chez *L'Atriplex halimus* avec la concentration en nitrate de plomb. Cette accumulation affecte les feuilles et les racines de plantes stressées (**Hassani et al., 2008**). Le plomb n'est jamais considéré comme un élément essentiel à la croissance des plantes, mais il peut les stimulés (**Dou,**

1988). Les résultats obtenus indiquent que l'application de zinc aux différentes doses entraîne une augmentation de la surface foliaire par rapport à la plante témoin. Selon **Abassi et al. (2018)**. **Grejtovsky (2006)** a indiqué que le niveau d'addition du Zn dans le sol a causé une augmentation significative dans sa concentration dans les parties aériennes. Le zn agit comme un élément nutritif pour les plantes et est impliqué dans diverses

réactions métaboliques (**Broadley et al. 2007 Vaillant et al. 2005**), telles que l'activité des phytohormones, la synthèse des protéines, la photosynthèse (**Sadeghzadeh, 2013**).

Nos résultats montrent une accumulation de la proline, dans différents organes, feuilles et racines des plantes traitées aux métaux lourds, cependant, cette accumulation est importante au niveau des racines. La proline est un acide aminé souvent considéré comme un biomarqueur de stress (**Szabados et al., 2009; Djerroudi-Zidane et al., 2010; Boublenza., 2012**). L'effet du cadmium sur la croissance peut être lié à la perturbation de l'équilibre de certaines hormones de croissance (**Azevedo et al., 2005; Piotrowska et al., 2010**). à la perturbation de l'homéostasie des éléments minéraux essentiels (**Breckle et Kahle, 1992; Irfan et al., 2013**). Selon **Mile et al. (2002)**, l'accumulation de proline est une des stratégies Adaptatives déclenchées par la plante face aux contraintes de l'environnement.

Ce phénomène d'accumulation a été démontré chez de nombreuses espèces et dans différentes situations de stress (salins, osmotiques, hydriques, thermiques, métallique...) (**Panda, 2003; Leprince et al., 2004**). Selon **Silveira et al. (2002)**. Les mécanismes de tolérance au Cd peut se traduire par une précipitation de ce métal avec de l'oxalate dans la tige (**Lutts et al., 2004**). L'accumulation de la glycine bêtaïne, la proline, la spermine a été également observé en réponse au stress du cadmium (**Lefèvre et al., 2009; Lutts et al., 2004; Nedjimi et Daoud, 2009**). L'accumulation de la proline, un protecteur polyfonctionnel dans les cellules (**Nedjimi et Daoud, 2008**).

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

Cette accumulation protéique pourrait être la conséquence de la synthèse par la plante de protéines de défense contre ce stress métallique (**Gupta et al., 2010**). **Stolt et al. (2003)** indiquent que l'exposition des plantes à différentes concentrations de cadmium a tendance à provoquer une augmentation de la synthèse des protéines. 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, tel que le stress des métaux lourds, la première réponse observée est une diminution de ses activités métaboliques normales, avec

comme conséquence, une réduction dans la croissance.

Le système antioxydant enzymatique chez les cellules végétales dans les conditions de stress joue un rôle important dans la défense de ces organismes, une augmentation de l'activité de ces enzymes antioxydants est en général une réponse à la présence d'agents phytotoxiques (**Dong et al., 2006; Qiu et al., 2008**). Beaucoup d'études ont montré que cette activité s'accroissait sous l'effet d'un traitement au cadmium, notamment chez l'espèce *Lemna* (**Srivastava et Telor, 1992**). Plusieurs travaux montrent que le cadmium peut induire un stress oxydatif chez la plante (**Liu et al., 2007; Djebali et al., 2008; Gill and Tuteja, 2010; Gill et al., 2011**).

Les plantes soumises à un stress oxydatif font appel à des systèmes de défense enzymatiques et non enzymatique très efficaces, tels que la catalase (CAT), l'acrobate peroxydase (APOX), les peroxydases (POD) et le Glutathion (GSH). Ces systèmes de défense permettent d'éliminer et neutraliser les radicaux libres (**Noctor et Foyer, 1998; Ann Peer et al., 2005**). La catalase est une enzyme catalysant la dismutation du peroxyde d'hydrogène en molécule d'eau et d'oxygène (**Arora et al., 2002**). CAT parmi les principales enzymes piégeant les ROS dans les plantes, elle pourrait être responsable de l'élimination d'excès de ROS pendant le stress (**Perira, 2010**). Elle est requise pour la désintoxication des ROS dans la plante (**Bhaduri and Fulekar, 2012**).

L'enzyme PPO est une oxygénase oxydoréductase (**Papa et al., 1994**). Les polyphénols oxydases (PPO) sont des enzymes contenant du cuivre qui sont presque omniprésentes parmi les plantes (Mayer, 2006). a longtemps été suggéré que les OPP peuvent jouer un rôle dans les réponses de la défense (**Thipyapong et al., 2004**). Pourtant, les propriétés enzymatiques des PPO sont potentiellement capables de fournir des fonctions importantes dans le métabolisme spécialisé des plantes. L'oxydation des composés phénoliques par les PPO en o-quinones suivie de leur polymérisation non enzymatique ou de leur condensation avec des nucléophiles conduit à une décoloration indésirable des produits végétaux (**Mathew et Parpia 1971; VamosVigyazo 1981; Whitaker 1995; Yoruk et Marshall 2003**). Un rôle dans la défense des plantes est souvent suggéré pour les OPP végétales en raison de leur induction lors d'une blessure, d'une attaque d'agents pathogènes ou d'une infestation d'insectes en plus de divers stress abiotiques / biotiques ou de divers composés de signalisation (**Constabel et al. 1995; Thipyapong and Steffens 1997; Maki and Morohashi 2006**).



Conclusion

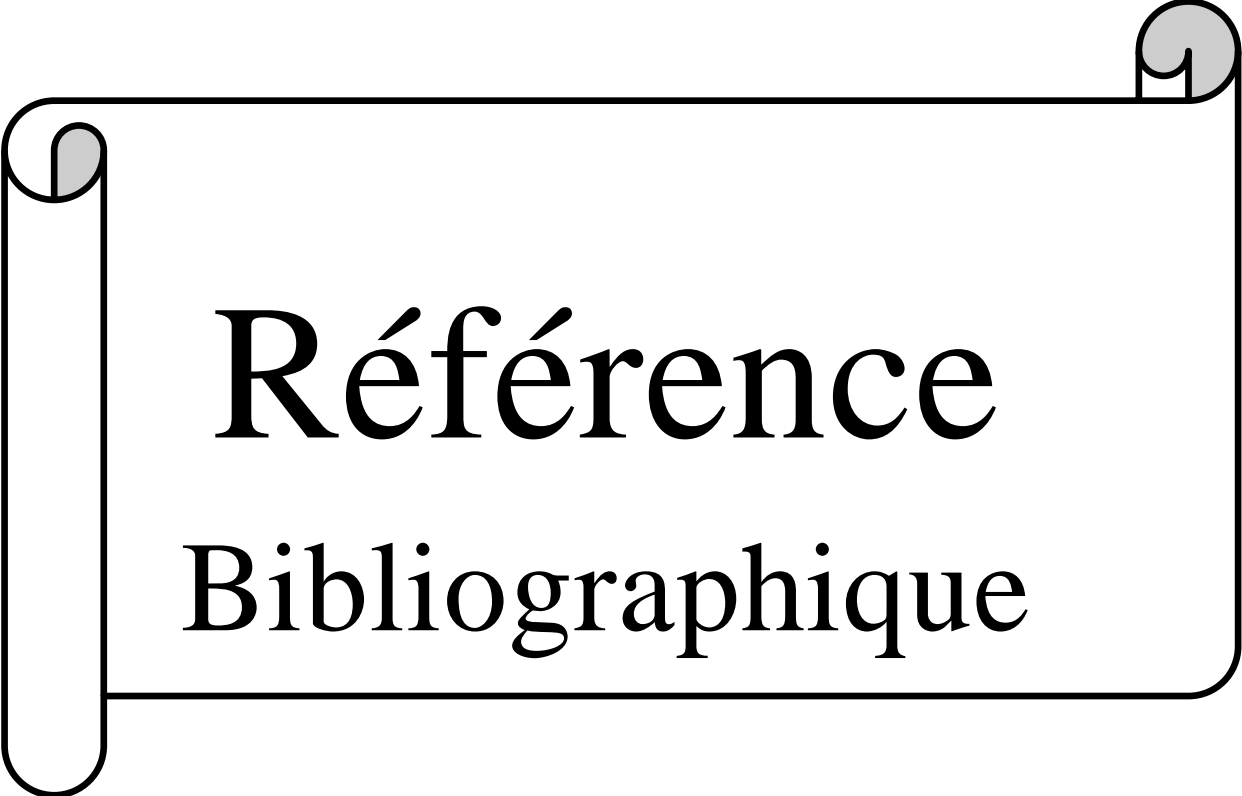
Conclusion

Dans notre travail de recherche on a analysé l'effet de trois métaux lourds, cadmium, zinc et plomb sur les jeunes plantules d'*Atriplex halimus*.

Afin de mieux connaître les mécanismes du transfert des métaux lourds du sol vers la plante, il est nécessaire de connaître les teneurs métalliques pouvant être accumulées par les organes végétatifs.

Les résultats obtenus montrent:

- Chez les végétaux, l'effet le plus directement visible des métaux lourds est une inhibition de la croissance qui s'accompagne très souvent d'une chlorose et nécrose.
- Nous avons remarqué que la longueur des racines est plus affectée par les métaux lourds, ceci est du phénomène d'absorption des racines, et peut constituer les racines de bon marqueur de phytotoxicité des métaux lourds.
- Les teneurs en proline, protéine enregistrent une accumulation importante chez les organes de l'espèce *Atriplex halimus* en présence des métaux lourds (Cd, Zn, Pb). Toutes ces modifications observées pourraient être prises comme biomarqueurs de toxicité des métaux lourds sur la plante.
- La réponse protéique et de proline des plantes d'*Atriplex halimus* vis-à-vis d'un stress métallique varie selon l'organe et l'intensité du stress.
- Lorsque les métaux lourds sont augmentés dans la plante, ce dernier augmente l'activité à la fois de la teneur enzymatique Catalase (CAT) et de la polyphénol peroxydase (PPO) pour les plantes, et on l'appelle le système enzymatique protecteur des plantes.
- L'*Atriplex halimus* dispose d'un système de défense qui implique la détoxification des espèces réactives de l'oxygène pour surmonter le stress provoqué par le cadmium, zinc et plomb, ces caractères peuvent être utilisés comme biomarqueurs au stress oxydant.
- Le cadmium est un élément non essentiel et toxique, sans aucune signification métabolique. Et leur toxicité la plus élevée entre les trois métaux utilisés.
- Enfin, la plante *Atriplex canescens* mérite d'être exploitée en vue de l'utiliser pour la dépollution des sols par les approches de la phytoremédiation. Ces plantes pourraient constituer un modèle intéressant pour l'étude des mécanismes d'exclusion du métal.



Référence
Bibliographique

Référence Bibliographique

A

1. **Adriano D.c. (2001).**Trace éléments in terrestrial environnement:Biochemistry, bioavailability and riskis of metals, 2nd Edution .new York : Springer- Varlag.
2. **Adriano, B.C. (1986).** Traces éléments in terres trial environnement. Springer-Verlag, New York., 533p.
3. **Afonso, V., Champy, R., Mitrovic, D., Collin, P., Lomri, A., 2007.** Radicaux libres dérivés de l'oxygène et superoxydes dismutases : rôle dans les maladies rhumatismales. Rev Rhum, Vol. 74: 636-643.
4. **Alloway, B.J. 1995.** Heavy Metals in Soils. Blackie Academic and Professional,
5. **Alloway, B.J. 1995.** Heavy Metals in Soils. Blackie Academic and Professional, Chapman and Hall, London, p 368.
6. **Alloway, B. J. et Steignes, E., 1999.** Anthropogenic additions of cadmium to soils. In: McLaughlin, M.J. and Singh, B.R., Eds. Cadmium in soils and plants, Kmuwer Academic Puplishers, Dordrecht, Netherlands,97-123.
7. **Al-Turki, T.A., Omer, S., Ghafoor, A., 2000.** A synopsis of the genus *Atriplex* L. (Chenopodiaceae) in Saudi Arabia. Feddes Repert. 111, 261\–293\n. doi:10.1002/fedr.20001110503.
8. **Ann Peer W, Baxter IR, Richards EL, Freeman JL, Murphy AS., 2005.** Phytoremediation and hyper accumulator plants. *Topics Current Genetic*.14, 299-340. hapman and Hall, London, p 368.
9. **Arora J., Sairam R.k., Srivastava G.C., 2002.**oxidativestress and antioxidative system in plants. Current science, Vol.82, NO.10, p83.
10. **Arora, a, Sairam, R.K., Srivastava, G.C., 2002.** Oxidative stress and oxidative system in plants. Curr. Sci. 82, 1227–1238.
11. **ARRIS S., 2008** «Etude expérimentale de l'élimination des polluants organiques et inorganiques par adsorption sous-produits de céréale» Thèse de doctorat de l'université de Constantine- Algérie.
12. **Asada, K., Kiso, K., Yoshikawa, K., 1974.** Univalent reduction of molecular oxygen by spinach chloroplasts on illumination. J. Biol. Chem. 249, 2175–2181.
13. **ATSDR. (2007).**Priority List of Hazardous Substances. Agency for Toxic Substances and Diseases Registry. Available at <http://www.atsdr.cdc.gov/> (accessed28 July 2009)

Référence Bibliographique

14. Arousseau B., 2002. Les radicaux libres dans l'organisme des animaux d'élevage: conséquences sur la reproduction, la physiologie et la qualité de leurs produits. INRA Prod. 15: 67-82.

15. Azevedo, H., Glória Pinto, C.G., Fernandes, J., Loureiro, S., Santos, C., 2005. Cadmium Effects on Sunflower Growth and Photosynthesis. J. Plant Nut doi:10.1080/01904160500324782.

16. Ames, B.N., Cathcart, R., Schwiers, E., Hochstein, P., 1981. Uric acid provides an antioxidant defense in humans against oxidant- and radical-caused aging and cancer: a hypothesis. Proc Natl Acad Sci USA 78, 6858-6862.

B

1. Baath, E. (1992). Measurement of heavy metal tolerance of soil bacteria using thymidine incorporation into bacteria extracted after homogenization-centrifugation. *Soil Biology and Biochemistry*, 24(11), 1167- 1172.

2. Baize D., Sterckeman T. (2001) Of the necessity of knowledge of the natural pedogeochemical background content in the evaluation of the contamination of soils by trace elements. *Sci. Tot. Environ.* 264: 127-139.

3. Baize, D. (1997) .Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France). Références et stratégies d'interprétation. INRA Éditions, Paris. 410 p.

4. Baize, D., 1997. Teneurs en éléments traces métalliques dans les sols. Editions INRA, Paris (France), 408 p.

5. Baize, D., et Tercé M. (2002). Les éléments traces métalliques dans les sols. Approches

6. Bajguz A. 2011. Suppression of *Chlorella vulgaris* growth by cadmium, lead, and copper stress and its restoration by endogenous brassinolide. *Archives of Environmental, Contamination and Toxicology.* 60, 406-416.

7. Baker AJM, Morel JL, Schwartz C. 1997. Des plantes pour dépolluer les friches.

8. Baker, A.J.M., 1981. Accumulators and excluders – Strategies in the response of plants to heavy metals. *Journal of Plant Nutrition* 3, 643-654.

9. Banzet, N., Richaud, C., Deveaux, Y., Kazmaier, M., Gagnon, J., Triantaphylides, C., 1998. Accumulation of small heat shock proteins, including mitochondrial HSP22,

Référence Bibliographique

induced by oxidative stress and adaptative response in tomato cells. *Plant Journal* 13, 519-527.

10. Barber, S. A. (1995). Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach. John Wiley and sons, 1st edition, New-York.

11. Bargagli, R.1998. Trace elements in terrestrial plants. An ecophysiological approach to biomonitoring and biorecovery. Springer. p324.

12. Bartosz G., 1997. Oxidative stress in plants. *Acta Physiologiae Plantarum* **19**: 47- 64.

13. Bartosz, G., 1997. Oxidative stress in plants. *Acta Physiol. Plant.* 19, 47–64. doi:10.1007/s11738-997-0022-9.

14. Ben Ahmed H, Zid E, El Gazzah M, Grignon C. 1996. Croissance et accumulation unique chez *Y Atriplex halimus L.* *Cahiers Agriculture.* 5, 367- 372.

15. Benito, V., Devesa, V., Munoz, O., Suner, M.A., Montoro, R., Baos, R., Hiraldo, F., Ferrer, M., Fernandez, M. et Gonzalez, M.J., 1999. Trace elements in blood collected from birds feeding in the area around Donana National Park affected by the toxic spill from the Aznalcollar mine. *Science of the Total Environment*, 242(1-3): 309-323.

16. Benkolli M et Bouzeghaia B., (2016). Etude biochimique de dix variétés de blé dur (*Triticum durum Desf.*) Sous l'effet d'un stress oxydatif génère par un stress hydrique. Mémoire. Université. M'entourai. Constantine:1-5-23

17. Benrebiha FZ. 1987. Contribution à l'étude de la germination de quelques espèces d'*Atriplex* locales et introduites. Thèse de Magister. Université d'Annaba, Algérie. P 119.

18. Bert V, Allemon J, Sajet P et al 2017. Torrefaction and pyrolysis of metal-enriched poplars from phytotechnologies: Effect of temperature and biomass chlorine content on metal distribution in end products and valorization options. *Biomass and Bioenergy*;96:1–1.

19. Bert, V., et Deram, A., (1999). Guide des phytotechnologies: utilisation des plantes dans la dépollution et la réhabilitation des sites contaminés par les métaux lourds, France, Environnement et Développement alternative.

20. Bert, V., Macnair, M.R., de Laguérie, P., Saumitou-Laprade, P. et Petit, D., 2000. Zinc tolerance and accumulation in metal-tolerant and non metal-tolerant populations of *Arabidopsis thaliana* (Brassicaceae). *New Phytol.*, Vol. 146: 225– 233).

21. Blanchard, C., 2000. Caractérisation de la mobilisation potentielle des polluants inorganiques dans les sols pollués. Thèse Chimie, spécialité Sciences et Techniques du Déchet. L. France : INSA de Lyon, p301

Référence Bibliographique

22. **Blandin, P., 1986.** Bioindicateurs et diagnostic des systèmes écologiques. Bull. d'Ecologie 17, 215–307.
23. **Blum A., Barbier J., Chery L., Petelet-Girard E., 2002.** *Contribution à la caractérisation des états de référence géochimique des eaux souterraines. Outils et méthodologie.* Rapport BRGM/RP-51093-Fr, Orléans, pp 57-68.
24. **Bolan, N., Adriano, D., Mani, S., Khan, A. 2003.** Adsorption, complexation, and phytoavailability of copper as influenced by organic manure. Environmental Toxicology and Chemistry, 22(2), 450-456.
25. **Bolan, N., Naidu, R., Choppala, G., Park, J., Mora, M.L., Budianta, D., Panneerselvam, P. 2010a.** Solute Interactions in Soils in Relation to the Bioavailability and Environmental Remediation of Heavy Metals and Metalloids. Pedologist, 53, 1-18.
26. **Bonjoch, N.P., Tamayo, P.R., 2003.** Protein content quantification by Bradford method. Handbook of Plant Eco physiology Techniques, 283–295.
27. **Bourrelier P et Berthelin J, 1998.** Contamination des sols par les éléments traces: les risques et leur gestion. Rapport de l'Académie des sciences Ed. Lavoisier, Paris.p 42.
28. **Bowler C., Van Montagu M., Inze D., 1992.** Superoxide dismutase and stress tolerance. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.*, 43: 83-116.
29. **Breckle, S.-W., Kahle, H., 1992.** Effects of toxic heavy metals (Cd, Pb) on growth and mineral nutrition of beech (*Fagus sylvatica* L.). *Vegetatio* 10143–53. doi:10.1007/BF00031914.
30. **BRIAT J.F., LEBRUN M., 1999.** Plant responses to metal toxicity. *Plant Biology and Pathology* 322, 43-54.
31. **Briat JF et Lebrun M., 1999-** Plant responses to metal toxicity. *Plant Biology and pathology*, Académie des sciences, Elsevier, Paris.
32. **Brignon J.M. et Malherbe L., 2005.** *Cadmium et ses dérivés.* INERIS – Données technicoéconomiques sur les substances chimiques en France, Verneuil en Halatte, 25 p.
33. **Broetto F, Duarte HM, Lüttge U. 2007.** Responses of chlorophyll fluorescence parameters of the facultative halophyte and C3–CAM intermediate species *Mesembryanthemum crystallinum* to salinity and high irradiance stress. *Journal of Plant Physiology.* 164, 904-912.
34. **Brooks RR, Chambers MF, Nicks LJ, Robinson BH. 1998.** « Phytomining », *Trends in Plant Science.* 3(9),359-362.

Référence Bibliographique

35. Brooks, R.R., 1998. Plants that Hyper accumulate Heavy Metals. (ed.) CAB International Wallingford, UK.

36. Brooks, R.R., Morrison, R.S., Reeves, R.D., Dudley, T.R., Akman, Y., 1979. Hyperaccumulation of nickel by *Alyssum Linnaeus* (Cruciferae). Proc. R. Soc. London. Ser. B. Biol. Sci. 203, 387–403. doi:10.1098/rspb.1979.0005.

37. Burnie G, Forrester S, Greig D, Guest S. 2003. Botanica, encyclopédie de botanique et d'horticulture plus de 10.000 plantes au monde entier.

38. Burk R, F., 2002. Selenium, an antioxidant nutrient. Nutr Clin Care ; 5: 47-49.

C

1. Callahan D.L., Baker A.J.M, Kolev S.D., Wedd A.G., 2006. Metal ion ligands in hyperaccumulating plants. *J. Biol. Inorg. Chem.*, 11: 2-12.

2. Castroviejo M., Inbar M., Gomez-Villar A., Garcia-Ruiz J M., 1990: Cambios en el cauceaguasabajo de unaprsa de retention de sedimentos», I Reunion National de Géomorphologie, Teruel: 457-468.

3. Chaignon, V. (2001). Biodisponibilité du cuivre dans la rhizosphère de différentes plantes cultivées. Cas de sols viticoles contaminés par des fongicides. Thèse : Ecole doctorale, Sciences de l'Environnement : Système Terre, Université d'Aix-Marseille

4. Chalandre, M. C. (2000) Sous-classe des Caryophyllidées. *Éléments de Botanique. Biologie et recherche.* 15p.

5. Chalot M, Blaudez D, Rogaume Y et al 2012. Fate of trace elements during the combustion of phytoremediation wood. *Environ Sci Technol*; 46: 13361–9.

6. Chardonnens, A.N., Koevoets, P.L.M., Van Zanten, A., Schat, H., Verkleij, J.A.C., 1999. Properties of enhanced tonoplast zinc transport in naturally selected zinc-tolerant *Silene vulgaris*. *Plant Physiology* 120, 779-785.

7. Chaudry TM, Hayes WJ, Khan AG, Khoo CS., 1998. Phytoremediation - focusing on accumulator plants that remediate metalcontaminated soils. *Australian Journal of Ecotoxicology.* 4, 37-51.

8. Chmielowska-Bak, J., Izbińska, K., Ekner-Grzyb, A., Bayar, M., Deckert, J., 2018. Cadmium stress leads to rapid increase in RNA oxidative modifications in soybean seedlings. *Front. Plant Sci.* 8, 2219.

9. Christelle Fernandez-Cornudet. Devenir du Zn, Pb et Cd issus de retombées atmosphériques dans les sols, à différentes échelles d'étude. -Influence de l'usage des sols sur la distribution et la mobilité des métaux-. Sciences of the Universe [physics]. INAPG (Agro Paris Tech), 2006. English. ffNNT: 2006INAP0012ff. ffpastel-00002321f.

10. Cibilis A.F., Swift D.M. and Mc Arthur E.D. (1998). Plant –herbivory interaction in Atriplex: current state of knowledge .USDA forest Service General Technical Report, 14:1-29.

11. Clemens S., 2001. Molecular mechanisms of plant metal tolerance and homeostasis. *Planta*, 212: 475-486.

12. Clemens, S., 2006. Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants. *Biochimie* 88, 1707–19. doi:10.1016/j.biochi.2006.07.003

13. Clemens, S., Palmgren, M.G., Krämer, U., 2002. A long way ahead: understanding and engineering plant metal accumulation. *Trends Plant Sci.* 7, 309–315. doi:10.1016/S1360-1385(02)02295-1

14. Clemens, S., Kin, E.J., Newman, D. et Schroeder, J.I., 1999. Tolerance to toxic metals by a gene family of phytochelatin synthases from plants and yeast. *EMB.J.*, Vol.18 :3325-3333.

15. Clemente, R., Escolar, A., Bernal, M.P. 2006. Heavy metals fractionation and organic matter mineralisation in contaminated calcareous soil amended with organic materials. *Bioresour Technol*, 97(15), 1894-901.

16. Clijsters, H., Assche, F.V., 1985. Inhibition of photosynthesis by heavy metals. *Photosynth. Res.* 7, 31–40. doi: 10.1007/BF00032920

17. Colinet G. 2003, Eléments traces métalliques dans les sols: Contribution à la connaissance des déterminants de leur distribution spatiale en région limoneuse belge, These de Gembloux.

18. Collin, V.C., Eymery F., Genty B., Rey P., Havaux M., 2008. Vitamin E is Essential for the tolerance of *Arabidopsis thaliana* to metal-induced oxidative Stress. *Plant Cell Environ.*, 31: 244-257.

19. Cossu, C., Doyotte, A., Jacquin, M., Vasseur, P., 1997. Biomarqueurs du stress oxydant chez les animaux aquatiques, in: Jean-Claude Amiard, François Ramade, Laurent Lagadic, T.C. (Ed.), Biomarqueurs En écotoxicologie - Aspects Fondamentaux. pp. 149–163.

20. Cseh E., 2002. Metal permeability, transport and efflux in plants. *In* :Physiology and Biochemistry of Metal Toxicity and Tolerance in Plants. Prasad M.N.V et Strzalka K.(eds). pp 1-36.

D

1. Dabouineau, L., Lamy, Y. & Collas, P., 2005. Phytoremédiation et phytorestauration ou l'utilisation , des plantes pour la dépollution et l'épuration des eaux usées. Dans: Le Rôle d'eau Vol 124. s.l.:s.n.p.3.

2. DAKORA F.D., PHILLIPS D.A. (2002). Root exudates as mediators of mineral acquisition in low-nutrient environments. *Plant and Soil* 245: 35-47.

3. DalCorso, G., 2012. Heavy Metal Toxicity in Plants, in: Furini, A. (Ed.), Plants and Heavy Metals, Springer Briefs in Molecular Science. Springer Netherlands, pp. 1–25. doi:10.1007/978-94-007-4441-7_1.

4. DalCorso, G., Farinati, S., Maistri, S., Furini, A., 2008. How plants cope with Cadmium: Staking all on metabolism and gene expression. *J. Integr. Plant Biol.* doi:10.1111/j.1744-7909.2008.00737.

5. Dan, T., Hale, B., Johnson, D., Conard, B., Stiebel, B., Veska, E., 2008. Toxicity thresholds for oat (*Avena sativa* L.) grown in Ni-impacted agricultural soils near Port Colborne, Ontario, Canada. *Can. J. Soil Sci.* 88, 389–398. Doi:10.4141/CJSS07070

6. Das P, Samantaray S, Rout GR. 1997. Studies on cadmium toxicity in plants: areview. *Environmental Pollution.* 98,29-36.

7. Dat J.F., Van Breusegem F., Vandenabeele S., Vranová E., Van Montagu M., Inze D., 2000. Dual action of active oxygen species during plant stress responses. *Cell. Mol. Life Sci.*, 57:779-795.

8. De Feo V, Senatore F. 1993. Medicinal plants and phytotherapy in the Amalfitan Coast, Salerno Province, Campania, SouthernItaly. *Journal of Ethnopharmacology*, 39 : 39–51.

9. Del Corso L, Pastine F, Protti MA, Romanelli AM, Moruzzo D, Ruocco L, Pentimone F., 2000. Blood zinc, copper and magnesium in aging. A study in healthy home-living elderly;

10. Deneux-Mustin S., Roussel-Debet S., Mustin C., Henner P., Munier-Lamy C, Colle C, J Berthelin, Garnier-Laplace J, Leyval C. 2003. Mobilité et transfert racinaire deséléments en traces: influence des micro-organismes du sol, TEC et DOC. Paris, 34-54.

Référence Bibliographique

11. **Djebali W, Chaïbi W, Ghorbel MH. 2002.** Croissance, activité peroxydasique et modifications structurales et ultrastructurales induites par le cadmium dans la racine de tomate (*Lycopersicon esculentum*). *Canadian Journal of Botany*. 80,942–953.
12. **Djebbar M. (2013).** Argile de Maghnia :purification et adsorption des polluants. Thèse de doctorat en chimie. Faculté des sciences. Université d'Oran.
13. **Dong, J., Wu, F., Zhang, G., 2006.** Influence of cadmium on antioxidant capacity and four microelement concentrations in tomato seedlings (*Lycopersicon esculentum*). *Chemosphere* 64, 1659–1666 doi:10.1016/j.chemosphere.2006.01.030
14. **Dong, J., Wu, F., Zhang, G., 2006.** Influence of cadmium on antioxidant capacity and four microelement concentrations in tomato seedlings (*Lycopersicon Esculentum*). *Chemosphere* 64, 1659–1666. doi:10.1016/j.chemosphere.2006.01.030.
15. **Dou, Z.X. 1988.** Lead pollution in soil and its effects on plants. *Agro Environ Protect*. 739_38 : (3)
16. **Dou, Z.X. 1988.** Lead pollution in soil and its effects on plants. *Agro Environ Protect*. 7 (3): 38_39.
17. **Duperat M. (1997).** Le guide des arabes et arbustes de France. Ed., sélection du Reader Digest.255p.
18. **Dupont,F et Guignard, J.L.,2007** Abrèges botanique systématique moléculaire.14^{ème} édition révisée. Masson.
19. **Del Corso L, Pastine F, Protti MA, Romanelli AM, Moruzzo D, Ruocco L, Pentimone F. ,2000.** Blood zinc, copper and magnesium in aging. A study in healthy home-living elderly; *Panminerva Med* ; 42:273-277.

E

1. **Edmand. 1963.** Effects of treading perennial ryegrass (*Toliumperenne L.*) and white clover (*Trifolium repens L.*) Pasture in winter and summer at two soil moisture levels. *NE Zealand Journal of Agricultural Research*. 6, 265-276.
2. **Elmsley J. (2001)** .Nature's Building Blocks.A-Z guide to the elements.Oxford University Press, Oxford, UK.
3. **El-Shatnawi MJ, Mohawesh Y. 2000.** Seasonalchemical composition of saltbush in semiarid grassland of Jordan. *Journal of Range Management*. 53, 211-214.

4. **États-Unis. United States Environmental Protection Agency (EPA) (2012).**A citizen's guide to phytoremediation.2p.(EPA542-F-12-016).
5. **Eun, S. O., Youn, H. S., and Lee Y. (2000).** Lead disturbs microtubule organization in the root meristem of Zeamays. *Physiol. Plant*110, 357–365. doi: 10.1034/j.1399.3054.2000.1100310.
6. **Favier A.** Le stress oxydant, Intérêt conceptuel et expérimental dans la compréhension des mécanismes des maladies et potentiel thérapeutique. *L'act. chim*, 2003: 108-115.
7. **Federal Remediation Technologies Roundtable (FRTR) (2008).**Remediation Technologies Screening Matrix and Reference guide, version 4.0 in FRTR.
8. **Federal Remediation Technologies Roundtable (SD).** [archive], Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide, 4-31 - In-situ biological treatment/Phytoremediation).fonctionnelles et spatiales. INRA Editions, Paris, 565 p.
9. **Francllet A, Le houerou HN. 1971.** Les Atriplex en Tunisie et en Afrique du Nord. Doc F.A.O. Rome. p 189.
10. **Francllet A. et Le-Houérou H.N., 1971** - Les Atriplex en Tunisie et en Afrique du Nord. Doct. F.A.O. Rome 1971. p 249 et p 189.

G

1. **Gardès-albert, M., Bonnefont-rousselot, D., Abedinzadeh, Z., Jore, D., 2003.** Espèces réactives de l'oxygène Comment l'oxygène peut-il devenir toxique ? *Actual. Chim.* 91–96.
2. **Ghnaya T, Nouairi I, Slama I, Messedi D, Grignon C, Abdely C, Ghorbel MH .2005.** Cadmium effects on growth and mineral nutrition of two halophytes: *Sesuvium portulacastrum* and *Mesembryanthemum crystallinum*. *Journal of Plant Physiology.* 162,1133-1140.
3. **Ghosh M, Spingh Sp (2005)** A review on phytoremediation of heavy metals and utilization of its byproducts.*Applied Ecology and Environmental Research* 3 :1-18.
4. **Gill SS, Khan NA, Tuteja N. 2011.** Cadmium at high dose perturbs growth, photosynthesis. and nitrogen metabolism while at low dose it up regulates sulphur assimilation an antioxidant machinery in garden cress (*Lepidium sativum* L.). *Journal of Plant Science.* 10, p1016.

5. Glenn, E.P.; Nelson, S.G.; Ambrose, B.; Martinez, R.; Soliz, D.; Pabendinskas, V.; Hultine, K. Comparison of salinity tolerance of three *Atriplex* spp. in well-watered and drying soils. *Environ. Exp. Bot.* 2012, 83, 62–72 [Cross Ref].

6. Gonçalves JF, Becker AG, Cargnelutti D, Tabaldi LA, Pereira LB, Battisti V Spanevello RM, Morsch VM, Nicoloso FT et Schetinger MRC. 2007. Cadmium toxicity causes oxidative stress and induces response of the antioxidant system in cucumber seedlings. *Brazilian Journal of Plant Physiology.* 19 (3), 223-232.

7. Goudable J., Favier A. (1997). Radicaux libres oxygènes et antioxydants. *Nutr Clin Mdtabol*, 11:115 - 120.

8. Gougue – A, 2005- Impact de la salinité sur la germination et la croissance des halophytes mémoire de d'ingénieur en agronomie pastorale. Ed université de Djelfa, 75 p.

9. Grant C.A., Bailey L.D., Selles F., Uckley W.T. (1995) Cadmium accumulation in crops, Canadian Network of Toxicology Centres National Workshop on Cadmium Transport in to Plants, WorkShop Proceedings, Ottawa, pp.55–71.

10. Greger M., 2004. Metal availability, uptake, transport and accumulation in plants. In: Heavy metal stress in plants: From molecules to ecosystems (2nd Ed.), Prasad M.N.V., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 1-27.

11. Guittonneau G.G. et Huou A. (1983). Connaître et reconnaître la flore et la végétation méditerranéennes. Ed., Ouest-France. 331p.

12. Guo W.J., Meenam M., Goldsbrough P.B., 2008. Examining the specific Contributions of individual *Arabidopsis* metallothioneins to copper distribution and metal tolerance. *Plant Physiol.*, 146: 1697-1706.

13. Gupta D, Huang H, Yang X, Razafindrabe B, Inouhe M. 2010. The detoxification of lead in *Sedum Alfredii* H. is not related to phytochelatins but the glutathione. *Journal of Hazardous Materials.* 177(1–3), 437-444.

14. Gill Sarvajeet Singh, Tuteja Narendra, 2010. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiology and Biochemistry* 48, 909- 930. doi:10.1016/j.plaphy.2010.08.016.

H

1. H.C.D.S. 1996. Notice bibliographique sur quelques plantes fourragères et pastorales. Hautcommissariat du développement de la steppe. P 15.

2. Halliwell, B., 2006. Reactive species and antioxidants. Redox biology is a fundamental theme of aerobic life. *Plant Physiol.* 141, 312–322. doi:10.1104/pp.106.077073.

3. **Hassani A.,Dellal A.,Belkhodja M et Kaid-Harche M.,2008**-Effet de la salinité sur l'eau et certains osmolytes chez l'orge (*Hordeum vulgare* L.) *European Journal of scientific Research* Vol.23°.1.pp.61-69.
4. **Haynes R.J., 1980.** Ion exchange properties of roots and ionic interactions within the root apoplasm: their role in ion accumulation by plants. *Bot. Rev.*,46: 75-99.
5. **He, J.-Y., Ren, Y.-F., Zhu, C., Yan, Y.-P., Jiang, D.-A., 2008.** Effect of Cd on growth, photosynthetic gas exchange, and chlorophyll fluorescence of wild and Cd-sensitive mutant rice. *Photosynthetica* 46, 466–470. doi:10.1007/s11099-008-0080-2.
6. **Henry JR(2000)** An overview of the phytoremediation of lead and mercury. National Network of Environmental management Studies (NMES).
7. **Hetland, S., Martinsen I., Radzuk B., Thomassen Y., (1991)** Species analysis of inorganic compound in workroom air by atomic spectroscopy. *Anal. Sci.*, 7, 1029-1032.
8. **Hopkins, G.W., 2003.** *Physiologie végétale*. 1ere ed. Ed. De Boeck, 514p.
9. **Huang J W et cunninghan S D., 1996.** Lead phytoextraction: species variation in lead uptake and translocation. *New phytologist* 134,75-84.
10. **Huynh. (2009).** Impact des métaux lourds sur l'interaction plantes/ verre le terre/ microflore tellurique thèse de Doctorat .Univ-Paris Est p169.
11. **Halliwell, B., Gutteridge, J., 1999.** *Free Radicals in Biology and Medicine*, 3rd ed. Oxford University Press.
12. **Hermes-Lima, M., 2005.** *Oxygen in Biology and Biochemistry: Role of Free Radicals*, In K. B. Storey (Ed.), *Functional Metabolism: Regulation and Adaptation*. Hoboken, NJ: Wiley-Liss, 319-368.

I

1. **Impens, R., Fagot, J. et Avril. C., 1991.** *Gestion des Sols Contaminés par les Métaux Lourds*. Association Francaise Interprofessionnelle du Cadmium, Paris, France. *Industrielles. Biofutur*. 169,30-33.
2. **Irfan, M., Hayat, S., Ahmad, A., Alyemeni, M.N., 2013.** Soil cadmium enrichment: Allocation and plant physiological manifestations. *Saudi J Biol. Sci.* 20, 1–10. doi:10.1016/j.sjbs.2012.11.004.

J

1. **Janssen, J., Weyens, N., Croes, S., Beckers, B., Meiresonne, L., Van Peteghem, P., ... Vangronsveld, J. (2015).** Phytoremediation of Metal Contaminated Soil Using Willow: Exploiting Plant-Associated Bacteria to Improve Biomass Production and Metal Uptake. *International Journal of Phytoremediation*, 17(11), 1123–36.
2. **Jean, P.J. et Yan, C, J. T., 2018.** Les plantes hyperaccumulatrices de métaux lourds. une solution à la pollution des sols et de l'eau. 175, boulevard Anatole France-93200 Saint-Denis.
3. **Jeannot R, Lemiere B, Chiron S, Augustin F, Darmendrail D. 2001.** Guide
4. **Jemal F, Ghorbal M H. 2002.** Phytoremediation. *Revue H. T. E.* N° 122.
5. **Johnson J.W. et al, 1991-**Breeding for improved rooting potential under stress condition I.N: Physiological environnement Montpellier, France 6Juil. 1989, Colloque INRA N°55: pp 307-317.
6. **Jones H G., Flowers T J et Jones M B., 1989** – Plants under stress. Cambridge, Cambridge University Press.
7. **Juste C., Chassin P., Gomez A., Linères M., Mocquot B. (1995).** Les micropolluants métalliques dans les boues résiduares des stations d'épuration urbaines. ADEME (ed) Paris, 209 p.
8. **Juste, C. (1988)** Appréciation de la mobilité et de la biodisponibilité des éléments en traces du sol. *Science du Sol.* 26, 103-112.

K

1. **Kabata-Pendias, A. and Pendias, H. (2001).** Trace elements in soils and plants. CRC Press, London.
2. **Kabata-Pendias, A., 2011.** Trace elements in soils and plants, CRC Press doi:10.1201/b10158-25.
3. **Kabir, M., Iqbal, M.Z., Shafiq, M., Farroqi, Z.R., 2018.** The effects of lead and cadmium In dividually and in combinations on germination and seedling growth of *Leucaena leucocephala* (Lam). *Am. Sci. Res. J. Engineer. Technol. Sci.* 43, 33–43.
4. **Kambouche N, Merah B, Derdour A, Bellahouel S, Younos C, Soulimani R. 2011** Activité anti hyperglycémiant d'un stérol β -sitoglycoside isolé de la plante *Anabasis articulata* (Forssk) Moq *Phytothérapie.* 9, 2–6.

5. Karri S., Saper R. and Kales S. (2008). Encéphalopathie plomb raison de médecines traditionnelles. L'innocuité des médicaments actuelle 3 (1): 549. doi: 10.2175/157488608783333907. Pmc 2538609. Pmid 18690981.

6. Kaur, G., Singh, H.P., Batish, D.R., Mahajan, P., Kohli, R.K., Rishi, V., 2015. Exogenous nitric oxide (NO) interferes with lead (Pb)-induced toxicity by detoxifying reactive oxygen species in hydroponically grown wheat (*Triticum aestivum*) roots. PLoS One 10, 1-18.

7. Kinet, J.M., 1998. Etude de la biodiversité chez *Atriplex halimus* et la découverte in vivo des plantes résistantes aux conditions de l'environnement. Cahier d'agriculture, Vol. 7: 505-509.

8. Koechlin-ramonatxo, C. (2006). Oxygene, stress oxydant et supplémentsations antioxydantes ou un aspect différent de la nutrition dans les maladies respiratoires. Nutr Clin Metabol 20, 165-177.

9. Küpper H, Kochian L V. 2010. Transcriptional regulation of metal transport genes and mineral nutrition during acclimatization to cadmium and zinc in the Cd/Zn hyper accumulator, *Thlaspi caerulescens* (Ganges population). *New Phytologist*. 185,114-129.

10. Küpper, H., Parameswaran, A., Leitenmaier, B., Trtilek, M., Setlik, I., 200 Cadmium-induced inhibition of photosynthesis and long-term acclimation. Lamaze T, Tusch D, Sarda X, Grignon C, Depigny-This D, Monneveux P, Belhassen E 1994 Résistance de plantes a la sécheresse: mécanismes physiologiques. Le sélectionneur Français. 45, 75-85.

L

1. Larson, R.A., 1988. The antioxidants of higher plants. *Phytochem.*, 27: 969-978.

2. Lasat M.M., Pence N.S., Garvin D.F., Ebbs S.D., Kochian L.V., 2000. Lauwerys, R. 1982. Toxicologie industrielle et intoxications professionnelles Masson Paris.

3. Le Houérou H. 2000. Utilization of fodder trees and shrubs in the arid and semiarid zones of West Asia and North Africa. *Arid Soil Research and Rehabilitation* 14, 101-135.

4. Le Houérou, H.N., 1992. The role of saltbushes (*Atriplex* spp) in arid land rehabilitation in the Mediterranean Basin: a review. *Agro for. Syst.* 18, 107-148. doi:10.1007/BF00115408.

5. Le Houérou, H.N., 1992. The role of saltbushes (*Atriplex* spp) in arid land rehabilitation in the Mediterranean Basin: a review. *Agroforestry Systems* 18: 107-148.

Référence Bibliographique

6. **Le Houérou, H.N., 2000.** Use of fodder trees and shrubs (trubs) in the arid and semi-arid zones of West Asia and North Africa: history and perspectives. In: Gintzburger.
7. **Levine, R., Stadtman, E., 2001.** Oxidative modification of proteins during aging. *Exp Gerontol*, Vol.36:1495–1502.
8. **Levitt, J. (1980).** Responses of plants to environmental stresses. Volume II: Water, radiation, salt, and other stresses. Academic Press, New York.
9. **Lezzar H et Meziani A., (2015).** Recherche in silico et conception d’amorce des gènes de tolérance au stress abiotique chez le blé. Mémoire .Université des Frères Mentouri Constantine 1.P :3-10.
10. **Li, X., Zhao, M., Guo, L., Huang, L., 2012.** Effect of cadmium on photosynthetic pigments, lipid peroxidation, antioxidants, and artemisinin in hydroponically grown *Artemisia annua*. *J. Environ. Sci. (China)* 24, 1511–8. doi:10.1016/S1001-0742(11)60920-0
11. **Lichtenthaler, H.K., 1996.** Vegetation stress: An introduction to the stress concept in plants. *J Plant Physiol*; 148:4-14.
12. **Liu X, Zhang S, Shan X, Christie P. 2007b.** Combined toxicity of cadmium and arsenate to wheat seedlings and plant uptake and antioxidant enzyme responses to cadmium and arsenate co-contamination. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 68, 305-313.
13. **Loué, A. (1993).** Oligo-éléments en agriculture. Ed. Nathan (ed), 45-177.
14. **Leverse X., 2009.** Stress oxydant et antioxydants? *Médecine et nutrition*, septembre ; 44 : 219-244.
15. **Lopez G V, Batthyany C, Blanco F, Botti H, Trostchansky A, Migliaro E, Radi R, Gonzalez M, Cerecetto H, and Rubbo H, 2005.** Design, synthesis, and biological characterization of potential antiatherogenic nitric oxide releasing tocopherol analogs. *Bioorg. Med. Chem.* 13: 5787–5796

M

1. **Ma, J.F., Zheng, S.J., Hiradate, S. et Matsumoto, H., 1997.** Detoxifying aluminum with buckwheat. *Nature*, Vol.390:569-570.
2. **Maalem, S. (2002)** Etude éco physiologique de trois espèces halophytes du genre *Atriplex* (*A.canescens*, *A.halimus* et *A.mummularia*) soumises à l'enrichissement en phosphate. Thèse de magistère en physiologie végétale et application biotechnologique .université baji Mokhtar, Annaba. Algérie, 76p.

Référence Bibliographique

3. **Mâalem, S., (2011).** étude de l'impact des interaction entre le phosphore et le chlorure de sodium sur trois espèces végétal halophytes du genre *Atriplex* (*A. Halimus* *A. Nummulaire* *A. canescence*). Thèse Doctorat. UniversitéBaji Mokhtar, Annaba .P:100.
4. **Mahar A, Wang P, Ali A et al 2016.** Challenges and opportunities in the phytoremediation of heavy metal is contaminated soils: A review. *Ecotoxicol Environ Saf*;126:111–21.
5. **Maire. R., 1962** -Carte phyto géologique de l'Algérie et de la Tunisie. Baconnier. Alger.78p.
6. **Manousaki, E. et Kalogerakis, N. (2011).**Halophytes present new opportunities in phytoremediation of heavy metals and saline soils. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50:656 – 660.
7. **Marouf A et Reynaud J., 2007** – La botanique de A à Z. 1662 définitions. Ed Dunod: P 286.
8. **Masingue,I.,2003.** Des plantes à l'assaut des métaux lourds. *Environnement*, Vol.2:10-11.
9. **McBride M.B. (1995)** Toxic metal accumulation from agricultural use of sludge - Are usepa regulations protective, *Journal of Environmental Quality*, 24: 5-18.
10. **McGrath S. 1998.** Phytoextraction for soil remediation. In *Plants that hyperaccumulate heavy metals: their role in phytoremediation, microbiology, archaeology, mineral exploration and phytomining*, Brooks, R., Ed. CAB International: New York, 261-288.
11. **McLaughlin M.J., Singh B.R. (1999).** Cadmium in soils and plants, eds. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, pp 273.
12. **McLaughlin, M.J., Zarcinas, B.A., Stevens, D.P., Cook, N., (2000)** Soil testing for heavy metals. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 31, 1661-1700.
13. **Memon, A.R., Aktoprakligil, D., zdemir, A., Vertii, A., 2001.** Heavy metal accumulation and detoxification mechanisms in plants. *Turk. J. Botany* 25, 111–121. doi:10.3923/ijar.2006.122.141.
14. **Méthodologique pour analyse des sols polluées (Document du BRGM 298).** Editions BRGM.
15. **Meychik N., Yermakov I.P., 2001.** Ion exchange properties of plant root cell walls. *Plant Soil*, 234: 181-193.

Référence Bibliographique

16. Miquel MG. 2001. «Les effets des métaux lourds sur l'environnement et la santé. Rapport Office Parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (Dir.) ». *Rapport Sénat.* 261,360.

17. Morel J.L., 1997. Bioavailability of trace elements to terrestrial plants. In: *Soil Ecotoxicology*, Tarradellas J., Bitton G., Rossel D., Lewis Publisher, CRC, pp.141-176.

18. Moussavou Moudouma CF., 2010- Etude des mécanismes d'accumulation du cadmium chez *Arabidopsis thaliana* (écotype Wassilewskija) et chez un mélèze hybride (*Larix x eurolepis*) par des approches moléculaire et développementale. Thèse de Doctorat. P17.

19. Mulas, M. et Mulas G., (2004). potentialités d'utilisation stratégique plantes des genres *Atriplex* et *Opuntia* dans la lutte contre la désertification. Short and medium-term Priority Environmental Action programme (SMAP). Université des Etudes De Sassari Groupe De recherche sur la désertification. P: 112

20. Mullen M.D., Wolf D.C., Beveridge T.J., Bailey G.W., 1992. Sorption of heavy metals by soil fungi *Aspergillus niger* and *Mucor rouxii*. *Soil Biol. Biochem.*, 24: 129-145.

21. Mulligan C.N., Yong R.N. and Gibbs B.F. (2001). Remediation technologies for metal-contaminated soils and ground water : an evaluation, *Engineering Geology*, Vol.60, pp.193-207

22. Munzuroglu, O., and Geckil, H. (2002.) Effects of metal on seed germination, root elongation, and coleoptile and hypocotyl growth in *Triticum aestivum* and *Cucumis sativus*. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 43, 203–213. doi: 10.1007/s00244-002-1116-4

23. 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). Artois.

24. Monaghan, B.R., Schmitt, F.O., 1932. The effects of carotene and of vitamin A on the oxidation of linoleic acid. *J Biol Chem* 96, 387-395.

N

1. Negre R., 1961: Petite flore des régions arides du Maroc occidental. Tome 1. Centre National de la Recherche Scientifique, Paris : 179- 180.

2. Nicholson, F.A., Smith, S.R., Alloway, B.J., Carlton-Smith, C., Chambers, B.J., 2003. An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales. *Sci. Total Environ.* 311, 205–219. doi: 10.1016/S0048-9697(03)00139-6.

3. **Nicholson, F.A., Smith, S.R., Alloway, B.J., Carlton-Smith, C., Chambers, B.J., 2003.** An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales. *Sci. Total Environ.* 311, 205–219. doi:10.1016/S0048-9697(03)00139-6.

4. **Noctor G., Foyer C.H., 1998.** Ascorbate and glutathione: Keeping active oxygen under control. *Annu. Rev. Plant Biol.*, 49: 249–279.

O

1. **OMS, Organisation Mondiale de la Santé (2000).** Air Quality Guidelines for Europe. World Health Organization. Copenhagen. 2nd Ed.

2. **Osmond CB., Bjorkman O. and Anderson DJ. (1980).** physiological processes in plant ecology: towards a synthesis with Atriplex. Berlin: Springer-verlag.

3. **Ouariti O, Gouia H, Ghorbel MH. 1997.** Responses of bean and tomato plants to cadmium: Growth, mineral nutrition, and nitrate reduction, *Plant Physiology and Biochemistry.* 35, 347–354.

4. **Ozenda P., 1983**Flore de Sahara. Ed. CNRS. Paris. 622 p. + 1 carte.

P

1. **Padmavathiamma, P. et Li, L. (2007).**Phytoremediation technology: Hyper-accumulation metals in plants. *Water, Air, and Soil Pollution*, 184(1 - 4):105 – 126.

2. **Panda SK., 2003**-heavy metal phytotoxicity induces oxidative stress in a moss, *Taxi Thallium sp.* *Science* .84(5),10 :631-633. *Panminerva Med*,Vol. 42:273-277.

3. **Pardo, T., Bernal, M. P., & Clemente, R. (2017).** Phytostabilisation of severely contaminated mining tailings using halophytes and field addition of organic and inorganic amendments *Chemosphere*, 178, 556–564.

4. **Parent C., Capelli N., Dat J.F., 2008.** Formes réactives de l'oxygène, stress et mort cellulaire chez les plantes. *C.R. Biol.*, 331: 255-261.

5. **Patel MJ, Patel JN, Subramanian RB. 2005.** Effect of cadmium on growth and the activity. Of H₂O₂ scavenging enzymes in *Colocassia esculentum* *Plant and Soil.* 273,183–188.

6. **Pereira LB, Mazzanti CMA, Gonçalves JF, Cargnelutti D, Tabaldi LA, Becker AG, Calgaroto NS, Farias JG, Battisti V, Bohrer D, Nicoloso FT, Morsch VM,**

Scheting MRC, 2010. Aluminum-induced oxidative stress in cucumber. *Plant Physiology and Biochemistry*. 48,683-689.

7. Peterson, P. (1978). Lead and vegetation, in the biogeochemistry of lead in the environment, Part B, Elsevier/ North Holland, New York, Chap 19.

8. Phielor R, Voit A, Kothe E 2013. Microbial Supported Phytoremediation of heavy metal contaminated soils: Strategies and applications. In: Schippers A, Glombitza F, Sand W (eds *Geo Biotechnology I*. Springer Berlin Heidelberg., 211–35).

9. Pilon-Smits E. 2005. Phytoremediation, *in: Annual Review of Plant Biology*. 15-39.

10. Piotrowska, A., Bajguz, A., Godlewska-Zylkiewicz, B., Zambrzycka, E., 2010. Changes in growth, biochemical components, and antioxidant activity in aquatic plant *Wolffia arrhiza* (Lemnaceae) exposed to cadmium and lead *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 58, 594–604. doi:10.1007/s00244-009-9408-6

11. Plumlee, G.S. et Ziegler, T.L., 2003. The medical geochemistry of dust, soils and other earth materials. In: B.S. Lollar (Ed.), *Environmental Geochemistry. Treatise on Geochemistry*. Elsevier-Pergamon, Oxford, pp. 264-310.

12. Pokorny B, Al Sayegh-Petkovsek S, Ribaric- Lasnik C, Vrtacnik J, Doganoc DZ, Adamic M (2004). Fungi ingestion as an important factor influencing heavy metal intake in roe deer: evidence from faeces. *Sci Total Environ* **324**: 223-234.

13. Pokorny B., Al Sayegh-Petkovsek S., Ribaric-Lasnik C., Vrtacnik J., Doganoc D.Z., Adamic M. (2004). Fungi ingestion as an important factor influencing heavy metal intake in roe deer: evidence from faeces. *Sci. Total Environ.* 324: 223-234.

14. Pourrut, B., 2008. Implication du stress oxydatif dans la toxicité du plomb sur une plante modèle, *Vicia faba*.

15. Powell, S.R., 2000. The antioxidant properties of zinc. *J.Nutr*, Vol.130: 1447-1454.

16. PRASAD M.N.V., HAGEMeyer J. (eds.), 1999. Heavy metal stress in plants. From molecules to ecosystems. Springer. 401 p.

17. Prasad, M.N. V., Hagemeyer, J., 1999. Heavy Metal Stress in Plants. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. doi:10.1007/978-3-662-07745-0.

Q

1. Qiu, R.-L., Zhao, X., Tang, Y.-T., Yu, F.-M., Hu, P.-J., 2008. Antioxidative response to Cd in a newly discovered cadmium hyperaccumulator, *Arabis paniculata* F. *Chemosphere* 74, 6–12 doi:10.1016/j.chemosphere.2008.09.069.

2. **Qiu, R.-L., Zhao, X., Tang, Y.-T., Yu, F.-M., Hu, P.-J., 2008.** Antioxidative response to Cd in a newly discovered cadmium hyper accumulator, *Arabis paniculata* F. *Chemosphere* 74, 6–12. doi:10.1016/j.chemosphere.2008.09.069.

3. **Quezel P, Santa T. 1962.** Nouvelle flore de l’Afrique et les régions désertiques méridionales. Ed. Anatol. France. p 228.

R

1. **Raccah, D. (2004).** Épidémiologie et physiopathologie des complications dégénératives du diabète sucré. *EMC - Endocrinologie*, 1(1), 29-42.

2. **Ramade, F. (1992).** Précis d’écotoxicologie. Ed. Masson., Paris., pp 145-152 et 164-169.

3. **Ran ,X.,Liu,R.,Xu,S.,Bai,F.,Xu,J.,Yang,Y.,Shi,J.Wu,Z.,2017.** Assessment of growth rate, chlorophyll a fluorescence, lipid peroxidation and antioxidant enzyme activity in *Aphanizomenon flos-aquae*, *Pediastrum simplex* and *Synedra acus* exposed to cadmium. *Ecotoxicology* 24, 468-77.

4. **Ran, X., Liu, R., Xu, S., Bai, F., Xu, J., Yang, Y., Shi, J., Wu, Z., 2014.** Assessment of growth rate, chlorophyll a fluorescence, lipid peroxidation and antioxidant enzyme activity in *Aphanizomenon flos-aquae*, *Pediastrum simplex* and *Synedra acus* exposed to cadmium. *Ecotoxicology* 24, 468–77.

5. **Raskin I., Kumar P.B.A.N., Dushenkov S., Salt D.E. (1994)** Bioconcentration of heavy metals by plants. *Curr. Opin. Biotechnol.* 5: 285-90.

6. **Rauser W.E., 1999.** Structure and function of metal chelators produced by plants – the case for organic acids, amino acids, phytin and metallothioneins *Cell Biochem. Biophys.*, **31**: 19-48.

7. **Redondo-Gómez S, Mateos-Naranjo E, Andrades-Moreno L. 2010.** Accumulation and tolerance characteristics of cadmium in a halophytic Cd-hyperaccumulator, *Arthrocnemum macrostachyum*. *Journal of Hazardous Materials*. 184, 299–307.

8. **Reeves R.D., Baker A.J.M., 2000.** Metal-accumulating plants. In: *Phytoremediation of toxic metals: using plants to clean up environment*. Raskin I., Ensley B.D., Wiley-Intersciences, pp. 193-229.

9. Réhabilitation des sols. in ETS. École de **Forget, D. (2004).** technologies supérieure (ETS).

10. **Remon, E., 2006.** Tolérance et accumulation des métaux lourds par la végétation spontanée des friches métallurgiques : vers de nouvelles méthodes de bio-dépollution.

Référence Bibliographique

11. **Remon, E., 2006.** Tolérance et accumulation des métaux lourds par la végétation spontanée des friches métallurgiques : vers de nouvelles méthodes de bio-dépollution. Biologie végétale. Université Jean Monnet - Saint-Etienne, 2006. Français. tel-00362527.
12. **Robert, M. and Juste, C. (1999).** Dynamique des éléments traces de l'écosystème sol. In Club CRIN Environnement et Ministère de l'environnement. Spéciation des métaux dans le sol. Paris: CRIN.
13. **Ross SM. 1995.** Toxic Metals in Soil-Plant Systems. Wiley, Chichester, Royaume-Uni.
14. **Ross, S.M. 1994.** Toxic metals in soil-plant systems. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK.
15. **Rozema J. 1996.** Biology of halophytes. In: Choukr-Allah R, Malcolm V, Hamdy A (eds Halophytes and Biosaline Agriculture. Marcel Dekker), New York, 17-30.

S

1. **Samardakiewicz, S., and Wozny, A.(2005).**Cell division in Lemna minor root treated with lead. *Aquat. Bot.* 83, 289–295. doi:10.1016/j.aquabot.2005.06.007.
2. **Sánchez-Cassas P., Klessig D.F., 1994.** A salicylic acid-binding activity and a salicylic acid-inhibitable catalase activity are present in a variety of plant species. *Plant Physiol.*, 91: 812-815.
3. **Sanita Di Toppi L., Gabbrielli R., 1999.** Response to cadmium in higher Plants. *Environ. Exp. Bot.*, 41: 105-130.
4. **Sanita Di Toppi, L., Gabbrielli, R., 1999.** Response to cadmium in higher plants. *Environmental and Experimental Botany* 41, 105-130.
5. **Sauge-Merle, S., 2003.** Optimisation des capacités d'accumulation de métaux lourds et de radionucléotides chez les microorganismes. *Appl & Environ. Microbiol.*, Vol.69 :490-494.
6. **Sauvé, S., Norvell, W.A., McBride, M., Hendershot, W., 2000.** Speciation and complication of cadmium in extracted soil solutions. *Environ. Sci. Technol.* 34, 291–2964
7. **Scandalios J.G., 1993.** Oxygen stress and superoxide dismutase. *Plant Physiol.*, **101**: 7-12.
8. **Scandalios J.G., 1993.** Oxygen stress and superoxide dismutase. *Plant Physiol.*, **101**: 7-12.
9. **Shah K., Nongkynrih J.M., 2007.** Metal hyperaccumulation and bioremediation. *Biologia Plantarum*, **51**: 618-634.

10. **Sharma P., Dubey RS.,2005.** Lead toxicity in plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology*17 (1): 35-52.
11. **Sharma R.K. et Agrawal M., 2006.** Single and combined effects of cadmium and zinc on carrots Uptake and bioaccumulation. *J. Plant Nutr.* 29: 1791-1804.
12. **Sies H.** Oxidative stress: from basic research to clinical application. *Am J Med.* **1991**, 91, 31-38.
13. **Silveira P.,Meloar B et Viegras R A.,2002-** Effets salinité induits sur l'assimilation d'azote liée à la croissance aux usines de doliques de chine.*Exp.Bot* :171_179.
14. **Singh A, Chan J, Chern JJ, Choi KW. 2005.** Genetic interaction of Lobe with its modifiers in dorsoventral patterning and growth of the *Drosophila* eye. *Genetics.* **171(1)**; 169-183.
15. **Somashekarai, B.V., Padmaja,K., Prasad,A.R.K., 1992.** phytotoxicity of cadmium ions on germinating seedlings of mung bean (*phaseolus vulgaris*): Involvement of lipid peroxides in chlorophyll degradation.*physiol.plant.*85,85_89.
16. **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.
17. **Souahi, H., Gassarellil, Z., Gharbi, A., Meksem Amara, L. 2021.** Physiological responses to lead exposure in wheat, barley and oat. *Environmental challenge*, 4: 100079.
18. **Souguir, D., 2009.** Modifications métaboliques, moléculaires et génotoxicité induites par le cadmium chez *Vicia faba*.
19. **Sposito G. (1989)** The chemistry of soils. Oxford Univ Press, 277 p.
20. **Steffens J.C., 1990.** The heavy-metal binding peptides of plants. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.*, 41: 553-575.
21. **Susarla S, Medina VF, McCutcheon SC. 2002.** Phytoremediation: An ecological solution to organic chemical contamination. *Ecological Engineering.* **18**, 647-658.

T

1. **Talamali, A., Bajji, M., Le Thomas, A., Kinet, J.M., 2003.** Dutuit P. Flower architecture and sex-determination: how does *Atriplexhalimus* L. playwith floral morphogenesis and sexgenes? *New Phytol.* 157: 105–113.

Référence Bibliographique

2. **Tang Y.T., Qiu R.L., Zeng X.W., Ying R.R., Yu F.M., Zhou X.Y., 2009.** Lead, Zinc, cadmium hyper accumulation and growth stimulation in *Arabis paniculata* Franch. *Env. Exp. Bot.*, 66: 126-134.

3. **Templeton AR, Clark AG, Weiss KM. 2000a.** Recombination and mutational hotspots within the human *Lipoprotein Lipase* gene. *American Journal of Human Genetics.* 66,69–83.

4. **Thomine S., Wang R., Ward J., Crawford N., Schroeder J. (2000)** Cadmium and iron transport by members of a plant metal transporter family in *Arabidopsis* with homology to Nramp genes. *Proc. Natl. Acad. Sc. USA* 97: 4991-4996.

5. **Tremel-Schaub, A., Feix, I., 2005.** Contamination des sols : transferts des sols vers les plantes, EDP Scienc. ed. ADEME, Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie.

6. **Tessier F, Marconnet P., 1995.** Radicaux libres, systèmes antioxydants et exercice, *Sci Sports* ; 10 : 1-13.

U

1. **Ulusu, Y., Öztürk, L., Elmastaş, M., 2017.** Antioxidant capacity and cadmium accumulation in parsley seedlings exposed to cadmium stress. *Russ. J. Plant Physiol.* 64.888-883,

2. **Usman, A.R.A., Kuzyakov, Y., Stahr, K. 2004a.** Dynamics of organic C mineralization and the mobile fraction of heavy metals in a calcareous soil incubated with organic wastes. *Water, Air, and Soil Pollution*, 158(1), 401- 418.

V

1. **Van Breusegem F., Dat J.F., 2006.** Reactive oxygen species in plant cell death. *Plant Physiol.*, 141: 384–390.

2. **Van der Perk, M. 2013.** Soil and Water Contamination. Second ed, CRC Press/Balkema, Taylor & Francis Group. London, UK.

3. **Vander Perk, M. (2006).** Soil and Water Contamination, from molecular to catchment scale. Van Gestel, C. & Hensbergen, P. (1997): Interaction of Cd and Zn toxicity for *Folsomia candida* Willem (Collembola: Isotomidae) in relation to bioavailability in soil. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 16, 1177-1186.

4. **Vanobberghen, F., 2011.** La phytoremédiation en Wallonie: évaluation du potentiel d'assainissement des sols contaminés en métaux lourds.

Référence Bibliographiqu

5. Vassilev A, Schwitzguébel JP, Thewys T, Van der Lelie D, Vangronsveld J. 2007. The use of plants for remediation of metal-contaminated soils. *The Scientific World Journal*. 4, 9-34.

6. Verbruggen N., Hermans C., Schat H., 2009. Mechanisms to cope with Arsenic or cadmium excess in plants. *Curr. Opin. Plant Biol.*, 12: 364-372.

7. Vigano, L., Arillo, a, Melodia, F., Arlati, P., Monti, C., 1998. Biomarker responses in cyprinids of the middle stretch of the River Po, Italy. *Environ. Toxicol. Chem.* 17, 404–411. doi:10.1897/1551-5028(1998)017<0404:bricot>2.3.co;2.

W

1. Wang, C., Zhang, S.H., Wang, P.F., Hou, J., Zhang, W.J., Li, W., Lin, Z.P., 2009. The effect of excess Zn on mineral nutrition and ant oxidative response in rapeseed seedlings. *Chemosphere* 75, 1468–1476. doi:10.1016/j.chemosphere.2009.02.033.

2. Wangxia, W. Vinocur, P. Altmn,A.; 2003: “plant responses to drought, salinity and extreme temperatures: towards genetic engineering for stress tolerance”, plant, Pp1-14.

3. Welsh KM, Lu AL, Clark S, Modrich P. 1987. Isolation and characterization of the *Escherichia coli* mutyH gene product. *Journal of Biological Chemistry*. 262, 15624-15629.

4. Wu, F., Zhang, G., Dominy, P., 2003. Four barley genotypes respond differently to cadmium: lipid peroxidation and activities of antioxidant capacity. *Environ. Exp. Bot.* 50, 67–78. doi:10.1016/S0098-8472(02)00113-2.

X

1. Xu, Q., Min, H., Cai, S., Fu, Y., Sha, S., Xie, K., Du, K., 2012. Subcellular distribution and toxicity of cadmium in *Potamogeton crispus* L. *Chemosphere* 89, 114–120. doi: 10.1016/j.chemosphere. 2012.04.046.

Z

1. Zayed, A. M., and N. Terry. 1994. Selenium volatilization in roots and shoots - effects of shoot removal and sulfate level. *Journal of Plant Physiology* 143: 8-14.

Référence Bibliographique

2. **Zervoudakis G., Angetopolos K., Salahas G. and Georgiou C.D (1998)** Differences in cold inactivation of phospho-enolpyruvate carboxylase among C4 species: The effect of pH and of enzyme concentration photosynthesis. 35:169-175.

3. **Zhu J, Meinzer C F. 1999.** Efficiency of C4 photosynthesis in *Atriplex lentiformis* under salinity stress. *Australian Journal of Plant Physiology.* 26, 79-86.

4. **Zid Boukhris M., 1977** – Quelques aspects de la tolérance de l'*Atriplex halimus* au chlorure de sodium: Multiplication, croissance et composition minérale. *Ecol. Plant.* 12: pp 355- 362.

5. **Zorrig, W., 2011.** Recherche des déterminants contrôlant l'accumulation du cadmium chez la laitue "*Lactuca sativa*." Montpellier, SupAgro.

6. **Zorrig, W., Rabhi, M., Ferchichi, S., Smaoui, A. et Abdely, C. (2012).** Phytodesalination: A solution for salt-affected soils in arid and semi-arid regions. *Journal of Arid Land Studies*, 22(1):299 – 302.