



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

Domaine: Sciences de la Nature et de la Vie

Option: Biotechnologie végétal

THÈME

**Réponse antioxidative d'*Atriplex halimus* vis-à-vis
l'exposition aux métaux lourds**

Présenté et soutenu par : TEDJANI SAFOUA

Devant le jury

FATMI Hindel	MCB	Université de Tébessa	Président
SOUAHI Hana	MCA	Université de Tébessa	Promotrice
Guedabnia Karima	MAA	Université de Tébessa	Examinatrice

Date de soutenance : 07/06/2022

Année universitaire 2021/2022

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

۱۴۳۸

Résumé

La pollution par les métaux provenant des activités humaines a des conséquences importantes sur les écosystèmes et la santé humaine. En effet, ces éléments, non biodégradables par nature, sont hautement toxiques écologiquement et peuvent être impliqués dans de nombreuses pathologies.

L'*Atriplex halimus* est bien adapté à des conditions environnementales extrêmes et présente des propriétés accumulatrices de métaux lourds. Dans ce contexte, nous avons évalué la réponse anti oxydative d'*Atriplex halimus* vis-à-vis l'exposition aux métaux lourds, cette espèce est cultivée sous une serre contrôlée, arrosée avec l'eau distillée et la solution nutritive de Hogland, puis traitées pendant 21 jours avec une solution métallique à base de plomb, zinc à des concentrations croissantes (0, 2000, 4000, 6000 et 8000 ppm) et de cadmium (0, 500, 1000, 1500 et 2000 ppm).

L'étude du comportement biochimique consiste à analyser le paramètre d'activité enzymatique de catalase (Cat) et de polyphénol oxydase (PPO) sur les feuilles d'*Atriplex halimus*.

Dans ce travail, nous avons observé qu'il n'y a aucun effet significatif sur l'activité enzymatique foliaire de la catalase à des concentrations croissantes de plomb, zinc et de cadmium. Par contre, il y a une diminution significative de l'activité PPO des feuilles de l'*Atriplex halimus* stressée au plomb et au cadmium.

La résistance de l'*Atriplex halimus* au zinc est importante par rapport au plomb et au cadmium.

Mots clés. *Atriplex halimus*, métaux lourds, facteur biochimique, activité enzymatique, réponse anti oxydative.

Abstract

Metal pollution from human activities has significant consequences on ecosystems and human health. Indeed, these elements, non-biodegradable by nature, are highly toxic ecologically and can be involved in much pathology.

Atriplex halimus is well adapted to extreme environmental conditions and exhibits heavy metal accumulating properties. In this context, we have evaluated the antioxidant response of *Atriplex halimus* vis-a-vis exposure to heavy metals, this species is grown in a controlled greenhouse, watered with distilled water and Hogland's nutrient solution, then treated for 21 days with a metallic solution based on lead, zinc at increasing concentrations (0, 2000, 4000, 6000 and 8000 ppm) and cadmium (0, 500, 1000, 1500 and 2000 ppm).

The study of the biochemical behavior consists in analyzing the enzymatic activity parameter of catalase (Cat) and polyphénol oxidase (PPO) on the leaves of *Atriplex halimus*.

In this work, we observed that there is no significant effect on the foliar enzymatic activity of catalase at increasing concentrations of lead, zinc and cadmium. On the other hand, there is a significant decrease in the PPO activity of the leaves of *Atriplex halimus* stressed with lead and cadmium.

The resistance of *Atriplex halimus* to zinc is significant compared to lead and cadmium.

Key words: *Atriplex halimus*, heavy metals, biochemical factor, enzyme activity, antioxidant response.

المخلص

للتلوث المعدني الناجم عن الأنشطة البشرية آثار كبيرة على الأنظمة الإيكولوجية وصحة الإنسان. في الواقع هذه العناصر ليست قابلة للتحلل البيولوجي , بطبيعتها شديدة السمية من الناحية البيئية ويمكن أن تشارك في العديد من الأمراض.

يتكيف القطف الملحي جيداً مع الظروف البيئية القاسية ويقدم خصائص متراكمة للمعادن الثقيلة. في هذا السياق قمنا بتقييم الاستجابة المضادة للأكسدة القطف الملحي للتعرض للمعادن الثقيلة، ويزرع هذا النوع تحت المراقبة في بيت بلاستيكي ، ويسقى بالمياه المقطرة ومحلول مغذيات **Hogland**، ثم يعالج لمدة 21 يوماً بمحلول معدني يعتمد على الرصاص، والزنك بتركيزات متزايدة (0، 2000، 4000، 6000 و 8000 جزء في المليون) والكاديوم (0، 500، 1000، 1500 و 2000 جزء في المليون).

تتضمن دراسة السلوك الكيميائي الحيوي تحليل معايير نشاط الإنزيم (Cat) للكاتالاز و (PPOs) البوليفينول أوكسيديز على أوراق القطف الملحي .

في هذا العمل، لاحظنا أنه لا يوجد تأثير كبير على نشاط الإنزيم الورقي للكاتالاز عند زيادة تركيزات الرصاص والزنك والكاديوم. من ناحية أخرى، هناك انخفاض كبير في نشاط **PPO** لأوراق القطف الملحي المجهدة للرصاص والكاديوم. يتميز القطف الملحي بمقاومة عالية للزنك مقارنة بالرصاص والكاديوم.

الكلمات الرئيسية: القطف الملحي، المعادن الثقيلة، العامل الكيميائي الحيوي، نشاط الإنزيم، الاستجابة المضادة للأكسدة.

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous adonné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Merci de nous avoir éclairé le chemin de la réussite. Nous tenons à exprimer aussi nos vifs remerciements à notre encadreur madame Dr. SOUABI Hana, pour ces précieux conseils, ses orientations, pour son aide et pour la confiance qu'elle nous a accordée. Nous remercions aussi infiniment les membres de jury d'avoir accepté de juger et évaluer notre travail.

Dédicace

A mes très chers parents, sources de vie, d'amour

*A mes chers frères Farida et Tarek, sources de joie et de
bonheur.*

*A toutes ma famille et mes amis, sources d'espoir et de
motivation.*

A tous ceux que j'aime et tous ceux qui m'aiment.

*«Spécialement grande merci pour ma chère amie MTD0 qui
dessiné la sourire sur moi et entré la joie dans ma cœur »*

Safoua

Table des matières

Titre	N°
Résumé	
abstract	
الملخص	
Remerciement	
dédicace	
Table des matières	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste d'abréviation	
Introduction	1
Partie 1: Synthèse Bibliographique	
<i>Chapitre 01: Atriplex halimus</i>	
1. Définition	5
2. Origine et répartition d' <i>Atriplex halimus</i>	5
2.1 Origine	5
2.2 Répartition géographique et de l'habitat	6
2.3 Répartition des dans le monde	6
2.4 Répartition en Algérie	7
3. La Systématique	8
4. Description morphologique d' <i>Atriplex halimus</i>	8
4.1 Les feuilles	9
4.2 Les racines	9
4.3 Les graines	10
4.4 Les fleurs	10
4.5 Les fruits	10
4.6 Les tiges	10
5. Germination d' <i>Atriplex halimus</i>	11

6. Importance d'<i>Atriplex halimus</i>	11
6.1 Intérêts écologiques	11
6.2 Intérêt fourrager	12
6.3 Intérêt médical	12

7. Résistance d'<i>A. halimus</i> aux différents stress	12
7.1. Résistance à la sécheresse	12
7.2. Résistance à la salinité	13
7.3. Résistance aux métaux lourds	13
<i>Chapitre 02: Généralité sur les métaux lourds</i>	
1. Définition des métaux lourds	15
2. Origine des éléments traces métalliques (ETM)	16
3. Sources	17
3.1. Sources naturelles	17
3.2. Sources anthropiques	17
4. Classification et types des métaux lourds	18
4.1. Classification des métaux lourds	18
4.2. Les types des métaux lourds	19
4.2.1. Les métaux essentiels	19
4.2.2. Les métaux non-essentiels	19
5. Rôle physiologique des métaux lourds	20
6. Les principaux dangers des métaux lourds	20
7. Propriétés physico-chimique d'ETM	21
7.1. Le cadmium	21
7.2. Le plomb	21

7.3. Le zinc	22
8. Toxicités des éléments traces métalliques	22
8.1. Toxicité du cadmium	22
8.2. Toxicité du plomb	23
8.3. Toxicités de zinc	23
9. Les métaux lourds dans la plante	23
9.1. Pénétration des éléments traces par les parties aériennes	23
9.2. Absorption racinaire	24
9.2.1 La voie symplastique	24
9.2.2 La voie apoplasmique	24
9.3. Translocation	24
9.4. Accumulation	24
9.5. Les excréations des éléments-traces par la plante	25
10. Les principaux effets toxiques des ETM sur les plantes	25
11. Stratégies et mécanismes de tolérance des plantes	25
11.1. La catalase	26
11.2. Les peroxydases(POX)	26
11.3. Les superoxydes(SOD)	26
11.4. Le poly phénol oxydase (PPO)	27
Partie II: <i>Matériel et Méthodes</i>	
2. Matériel et méthodes	31
2.1. Matériel végétal	31
2.2. Préparation du substrat (sol)	31

2.3. Mise en germination et repiquage	31
2.4. L'arrosage	32
2.5. Application du stress	33
2.6. Dispositif expérimental	33
6.1. Prélèvement et préparation du matériel végétal pour les analyses	34
6.2. Dosage enzymatique.	35
2.7. Traitement de données et analyse statistique	37

Partie III: Résultats et Discussion	
3. Résultats et Discussion	40
3.1. Résultats	40
3.1.1. Influence du zinc sur l'activité catalase	40
3.1.2. Influence du plomb sur l'activité catalase	41
3.1.3. Influence du cadmium sur l'activité catalase	42
3.1.4. Influence du zinc sur l'activité du polyphénol oxidase (PPO)	43
3.1.5. Influence du plomb sur l'activité du polyphénol oxydase(PPO)	44
3.1.6. Influence du cadmium sur l'activité du polyphénol oxidase (PPO)	45
3.2. Discussion	46
Conclusion	52
Référence Bibliographique	54

Listes des figures

Figure N°	Titre	Page
1	L'arroche <i>Atriplex halimus</i>	5
2	Les feuilles d' <i>A. halimus</i>	9
3	Les racines d' <i>A. halimus</i>	9
4	Les grains d' <i>A. halimus</i>	10
5	Origine des métaux lourds dans le sol	16
6	Différents formes et localisation des ETM dans le sol	17
7	Réaction enzymatique du polyphénol oxydase	27
8	Plantule d' <i>Atriplex halimus</i> après l'arrosage	32
9	Dispositif expérimental des plantules d' <i>A. halimus</i> stressée	33
10	Prélèvement les échantillons d' <i>Atriplex halimus</i>	35
11	Broyage de feuille dans tampon et homogénéisateur du broyat pendant 30sec	35
12	centrifugation du broyat à 14000 g pendant 20 min	36
13	Spectrophotomètre UV à une longueur d'onde de 240 nm	37
14	L'activité catalase des feuilles de l' <i>A. halimus</i> stressée au zinc.	41
15	L'activité catalase des feuilles de l' <i>A. halimus</i> stressée au plomb	42
16	L'activité catalase des feuilles de l' <i>A. halimus</i> stressée au cadmium.	43
17	L'activité PPOs des feuilles de l' <i>A. halimus</i> stressée au zinc	44
18	L'activité PPOs des feuilles de l' <i>A. halimus</i> stressée au plomb	45
19	L'activité PPO des feuilles de l' <i>A. halimus</i> stressée au cadmium.	46

Liste des Tableaux

N°	Titre	Page
Tableau N°01	Répartition numérique des espèces dans le monde	6
Tableau N°02	Répartition des différentes espèces dans l'Algérie	7
Tableau N°03	La classification de l'<i>A. halimus</i>	8
Tableau N°04	Classification périodique des éléments métalliques	15
Tableau N°05	Classification des principaux ETM selon leur affinité pour des ligands oxygénés	16
Tableau N°06	Sources industrielles et agricoles des métaux présents dans l'environnement	18
Tableau N°07	Classification de quelques métaux lourds selon leur densité et leur toxicité	19
Tableau N°08	Principaux éléments métalliques essentiels et non-essentiels	20
Tableau N°09	Composition de la solution nutritive de Hoagland	32
Tableau N°10	Dispositif expérimental	34
Tableau N°11	Analyse de la variance de l'activité catalase d'<i>A. halimus</i> stressée au zinc.	40
Tableau N°12	Analyse de la variance de l'activité catalase d'<i>A. halimus</i> stressée au plomb.	41
Tableau N°13	Analyse de la variance de l'activité catalase d'<i>A. halimus</i> stressée au cadmium	42
Tableau N°14	Analyse de la variance de l'activité PPO d'<i>A. halimus</i> stressée au zinc	43
Tableau N°15	Analyse de la variance de l'activité PPO d'<i>Atriplex halimus</i> stressée au plomb	44
Tableau N°16	Analyse de la variance de l'activité PPO d'<i>A. halimus</i> stressée	45

au cadmium

Liste des abréviations

% :	<i>Pourcentage</i>
CAT :	<i>Catalase</i>
Cd:	<i>Cadmium</i>
** :	<i>Différence hautement significative</i>
* :	<i>Différence significative</i>
*** :	<i>Différence très hautement significative</i>
ETM :	<i>Eléments Traces Métalliques</i>
ROS :	Les Espèces Réactives de l'Oxygène
H :	<i>Hydrogène</i>
OH	hydroxyle
L, ml, µl, µm :	<i>Litre, Millilitre, Microlitre, Micromètre</i>
SOD	superoxyde dismutases
GPx	glutathion peroxydases
g, mg, kg :	<i>Gramme, Milligramme, kilogramme</i>
Mg :	<i>Mili gramme</i>
Mn :	<i>Minute</i>
POX	peroxydases
V	<i>volume</i>
mm	<i>millimètre</i>
Mg :	<i>Magnésium</i>

<i>mg. g-1 :</i>	<i>Milligramme par gramm.</i>
<i>mg/kg :</i>	<i>Milligramme par kilogramme</i>
<i>Ppm :</i>	<i>Partie par million</i>
<i>PA :</i>	<i>Partie Aérienne</i>
<i>Pb :</i>	<i>Plomb</i>
<i>Ppo :</i>	<i>Polyphenole oxidase</i>
<i>uM :</i>	<i>Nonomole</i>
<i>T :</i>	<i>toxique</i>
<i>T :</i>	<i>Témoin</i>
<i>T:</i>	<i>Temps</i>
<i>E :</i>	<i>essentiel</i>
<i>Z :</i>	<i>Zinc</i>
<i>H2O2 :</i>	<i>Peroxyde d'hydrogène</i>

Introduction générale

INTRODUCTION

L'accumulation des métaux lourds dans les écosystèmes a conduit, au fil des années, à la détérioration de la qualité de l'environnement, au déclin des forêts et à la diminution de la productivité agricole (**chappelka et samuelson, 1998; wahid, 2006**), de ce fait, la pollution des écosystèmes par les métaux lourds a pris un grand intérêt sur le plan environnemental et scientifique. Les activités humaines constituent la source principale de pollution des écosystèmes par les métaux lourds. Les industries (métallurgiques et minières par exemple) et le transport urbain ont été à l'origine de la pollution de la biosphère par les métaux (comme le cadmium, le plomb et le zinc) à la différence des polluants organiques. Les métaux ne sont pas biodégradables; ils se transforment d'un état d'oxydation à un autre ou ils forment des complexes avec les matières organiques (**Wade et al, 1993**).L'évaluation des risques liés à la pollution par les métaux lourds nécessite de disposer d'outils biologiques permettant d'apprécier l'impact des polluants sur les êtres vivants. En effet, si la typologie de la pollution par les métaux lourds est globalement bien définie par les analyses physico-chimiques, les questions récurrentes exposées lors des évaluations de risque concernent la biodisponibilité des polluants du sol, leurs interactions possibles, et les effets potentiels de la pollution non caractérisée. La toxicité des métaux lourds est intimement liée à leurs propriétés oxydoreductrices et à la production d'espèces réactives de l'oxygène (ros), tels que l'anion superoxyde ou le radical hydroxyle, qui possèdent un électron non apparié. Au niveau cellulaire, les principales cibles des ros sont l'ADN, les phospholipides membranaires et les acides aminés (**Remon, 2006**). L'activité de l'appareil photosynthétique représente également une cible importante pour les contaminants métalliques parce que l'inhibition des processus biochimiques et biophysiques de la photosynthèse affectent en entier la physiologie des plantes (**Souahi, 2021 ; Souahi et al ; 2017**). Les plantes possèdent des systèmes de stockage ou de détoxification qui leur permettent de diminuer les effets néfastes des métaux lourds. Selon les espèces, ces systèmes sont plus ou moins développés, mais, il semble à l'heure actuelle que trois mécanismes sont 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 ROS et la chélation intracellulaire, qui empêche l'activité de l'ion métallique (**Remon, 2006**). La compréhension des mécanismes de toxicités et de tolérance des plantes exposés au stress métallique peut constituer un apport majeur à la compréhension et le développement des marqueurs biologiques ou bio marqueurs (**Souahi et al., 2021**). Selon **Weeks (1995)**, un bio marqueur 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. Le bio marqueur peut aussi être défini comme tout changement observable et/ou mesurable au niveau moléculaire, biochimique, cytologique, physiologique, biologique ou comportemental qui révèle l'exposition présente ou passée d'un organisme à au moins une substance chimique à caractère polluant (**Lagadic et Caquet, 1996**). *Atriplex halimus* L (Amarantacée) est un arbuste xérohalophyte, très abondant dans les steppes salines d'Algérie. Elle résiste bien aux conditions environnementales extrêmes des régions arides et semi-arides comme la salinité et la sécheresse (**Bajji et al, 1998b; Le Houerou, 2000**). 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 Mesnoua, 2011; Lotmani et al, 2011; Mateos-Naranjo et al, 2013; Nedjimi et Daoud, 2009**). Cependant, les mécanismes de toxicité des métaux lourds et les caractéristiques de tolérance d'*A. halimus* ne sont pas encore claires.

Partie 1

Synthèse Bibliographique

Chapitre 01

Atriplex halimusL

1. Définition

L'*Atriplex* est une plante arbustive, appartenant à la famille des Amarantacée qui comprend 1400 espèces, réparties en une centaine de genres. Le genre comprend environ 417 espèces dans le bassin méditerranéen (**Le houerou, 1992**). C'est un arbuste xérohalophile largement distribué dans les régions arides et semi-arides du bassin méditerranéen jusqu'à l'Arabie Saoudite, à des altitudes inférieures à 900m. Il pousse sur une variété de sols, de texture fine à grossière, avec des degrés de salinité variables. Il existe deux sous-espèces d'*A. halimus*: *halimus*, diploïde ($2n = 2x = 18$), se trouve dans les régions semi-arides moins salées, tandis que *schweinfurthii* est tétraploïde ($2n = 4x = 36$) et occupe les régions arides salées.

Les espèces du genre sont caractérisées par le haut degré de tolérance à l'aridité et à la salinité; et pour procurer des fourrages riches en protéines et en carotène. Par ailleurs, elles ont la propriété de produire une abondante biomasse foliaire et de la maintenir active durant les périodes défavorables de l'année.

2. Origine et répartition de l'*Atriplex halimus*

2.1 L'origine

Cette espèce n'est pas bien connue (**Belarbi, 2018**), certains auteurs présument qu'elle est native d'Afrique du Nord où elle est très abondante (**Kinet et al, 1998**), d'autres estiment qu'elle est d'origine de l'Australie et s'étend aux parties arides et semi arides de monde (**Osman et Ghassali, 1997**).



Figure 01 :L'arroche *halimus* (**Lucas HEITZ,2016**)

2.2. Répartition géographique et de l'habitat

A. halimus pousse naturellement à travers le bassin méditerranéen jusqu'à l'Asie occidentale (Al-Turki et al, 2000; Walker et al, 2014). En raison de ses qualités fourragères, il a été introduit à Oman, l'Iran, l'Irak, le Pakistan, l'Afrique du Sud, Chili, Argentine, Nouvelle-Zélande et les États-Unis. Elle peut pousser dans les zones caractérisées de faible pluviométrie annuelle (100-400 mm) et forte évapotranspiration potentielle (0,06 à 0,28) (Le Houerou, 2000).

2.3. Répartition dans le monde

Dans le monde, *A. halimus* se rencontrent de l'Alaska à la Patagonie, de la Bretagne à la Sibérie et de la Norvège à l'Afrique du sud (Franclet et Le Houerou, 1971). Se trouve dans la plupart des régions du monde en la Sibérie, Alaska, la Patagonie, la Norvège et l'Afrique du sud (Franclet, 1971). L'espèce *A. halimus* est spontanée dans les pays du nord de l'Afrique et proche d'orient jusqu'à Iran vers le sud. En Europe cette espèce présente dans les régions méditerranéennes en Bulgarie, et le massif de l'Hoggar (Choukr, 1995) et en Algérie (Castroviejo et al, 1990).

Tableau 01 : Répartition numérique des espèces 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		

2.4. Répartition en Algérie

En Algérie, **Quezel et Santa (1962)** ont dénombré 13 espèces natives dont 5 pérennes et 8 annuelles. Le Houérou (1992) a ajouté à cette liste deux espèces naturalisées : *A. semibacata* R.Br : Espèce pérenne et *A. injlata* F. V Muell : Espèce annuelle.

Elle se présente dans les zones d'est : **Tiaret, Tbessa, M'sila, Saida, Djelfa, Boussaâda, Biskra, Batna**, spontané dans les étages bioclimatiques et les régions arides et semi-arides, elle se rencontre aussi sur le Sahara, particulièrement dans la région de Béchar (**Castroviejo et al, 1990**).

Tableau 2: Répartition des différentes espèces d' dans l'Algérie (**Quezel et Santa, 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.

3. La Systématique

La classification de l'espèce *halimus* L. dans le règne végétal est la suivante (Quezel et Santa, 1963 ; Dupont et Guignard, 2007).

Tableau 3 : La classification de l'*A. halimus* (Quezel & 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	Atriplex
Espèce	<i>halimus</i> L

4. Description morphologique d'*halimus*

L'*A. halimus* est un arbuste de 50 à 200 cm de haut elle peut atteindre 4m de hauteur, cette espèce a été considérée comme monoïque ou dioïque (Talami et al, 2001). Les tiges sont érigées, dressées et ligneuses. Les feuilles sont assez grandes de 2 à 5 cm, en général 2 fois plus longues que larges, cette espèce est caractérisée par un polymorphisme foliaire important (Yamina, 2010). Les fleurs sont vertes et petites (Aganga et al, 2003), groupées en panicule terminale (Maire, 1962). Selon Abbad et al. (2004) il existe une très grande variabilité phénotypique située dans des climats différents. Un seul individu peut porter à la fois des fleurs unisexuées males, unisexuées femelles, et bisexuées. Les graines sont des akènes rougeâtres à noire de 1.5 à 2 mm de diamètre (Maire, 1962).

4.1. Les feuilles

Les feuilles d'*A. halimus* 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 (Maalem., 2002).



Figure 02 : les feuilles d'*A. halimus* (Lucas HEITZ,2016)

4.2. Les racines

L'A. halimus possède un système racinaire très développé, qui lui permet d'utiliser les réserves d'eau du sol, il se caractérise par une grosse racine tout d'abord étalée oblique puis s'enfonçant verticalement jusqu'à une profondeur variable avec le sol et l'âge de la plante. 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).



Figure 03 : Les Racines d'*A. halimus* (Ahmadou et Makhloof, 2019).

4.3. Les graines

Les graines sont rousses, de position verticale, lenticulaire de couleur brune foncée de 2 mm de diamètre environ. Elle est terne et entourée de péricarpe membraneux (Negre., 1961). L'orientation de la disposition de la graine est importante à examiner pour séparer les genres. Les graines d'*A.halimus* présentent une grande habileté à germer sous les conditions fortement salines, la germination semble être un stade de forte sensibilité au stress salin (Zid et al, 1977).



Figure 04 : Les grains d'*A.halimus*

4.4. Les fleurs

L'inflorescence est monoïque, en panicule d'épis, terminale et nue. Les fleurs monoïques, jaunâtres sont réunies en épis et panicules terminales plus ou moins denses. Les rameaux florifères sont défeuillés au niveau des panicules. Les valves fructifères sont coriaces, réniformes (Ben Ahmed et al, 1996). Il existerait deux types d'architecture florale de base : l'une est constituée de fleurs mâles pentamères et l'autre, de fleurs femelles munies d'un unique carpelle inséré entre deux bractées opposées (Talamali et al, 2003).

4.5. Les fruits

Le fruit est membraneux, composé par les deux bractéoles indurées ou entières, lisse ou tuberculeuses, farineuses pubescentes ou velues, droites ou récurées (Ozenda, 2006).

4.6. Les tiges

Il est très polymorphe, son port peut être dressé, érigé ou intriqué, les rameaux portent des grappes allongées portant des grains (Gougue, 2005). Tige érigé dressée ligneuse et très

rameuse, les rameux dressés, puis étalés, arrondis ou anguleux, blanchâtre, sont souvent plus ou moins effilés (MAIRE, 1962).

5. Germination d'*A.halimus*

La germination devient un facteur déterminant pour la réussite de la croissance des plantes dans les milieux salés. Bien que les halophytes possèdent une teneur très élevée en sel dans leurs tissus au stade adulte, leurs graines ne sont pas aussi tolérantes au sel au stade germination (Belkhodja & Bidai, 2004). Les graines de *A. halimus* germe en l'absence ou en présence de Na Cl dans le milieu additionné de faible concentration (100 meq) et dès que la concentration en sel augmente, un taux de réduction des graines germées est observé (350 meq de Na Cl), suivie de l'inhibition de la germination des graines exposées à une salinité élevée (600 meq de Na Cl).

L'augmentation de la concentration en chlorure de calcium dans le milieu diminue la vitesse de germination par rapport au témoin, mais ne semble pas affecter la capacité germinative des semences (le taux de germination n'est affecté qu'à partir de 10 g/l CaCl₂). Les plantules d'*A. halimus* cultivées dans un mélange tourbe-sable en présence de CaCl₂ se comportent différemment par rapport au stade de germination, en effet pour une concentration de 8 g/l, il est observé une stimulation de la croissance des plantules. Il apparaît au vu des résultats que cette espèce, tolère des concentrations salines élevées incompatibles avec la majorité des espèces végétales cultivées. Il peut être donc utilisée dans la protection des sols contre l'érosion, la valorisation des sols salés et pour la production fourragère dans les milieux steppiques (Khan, 2001).

6. Importance de l'*A.halimus*

6.1. Intérêts écologiques

En effet, ces plantes possèdent un système racinaire très développé qui leur permet d'utiliser les réserves d'eau du sol et de former un réseau dense susceptible d'agréger le sol et de le rendre résistant à l'érosion (Dutuit et al, 1991). En plus, ces racines peuvent fixer les couches supérieures du sol et donc considérer comme un moyen de lutte contre la désertification (Belkhodja et Bidai., 2004). Ces plantes sont utilisées dans des terres où la végétation naturelle est profondément dégradée et la production agricole très irrégulière, ou dans des terres chargées en sel pour les désaliniser (Benrebiha, 1987).

6.2. Intérêt fourrager

L'*A. halimus* est utilisé fondamentalement comme plante fourragère. Son feuillage persistant, riche en protéines, est très apprécié durant la longue période de sécheresse estivale alors que les espèces herbacées ont disparu, cette plante peut produire jusqu'à cinq tonnes/hectare de matière sèche par an sur des sols dégradés ou salins inutilisables pour d'autres cultures (**Dutuit et al, 1991**). C'est une plante bien adaptée à l'aridité, et constitue une source importante de fourrage pour les ovins (**Abu-Zanat., 1995**).

6.3. Intérêt médical

L'*Atriplex* est une plante nutritive, riche en protéine (**Francllet et Le houerou, 1971**), en vitamines C, A, et D, et sels minéraux (**Benrebiha., 1987**). Cette plante est aussi utilisée comme plante médicinale dans la pharmacopée traditionnelle (**Dutuit et al, 1991**). Elle était préconisée aux malades présentant les symptômes de diabétiques.

Au Sahara occidental, les cendre de l'*A. halimus*, reprise par l'eau, sont utilisées dans le traitement de l'acidité gastrique, les graines sont ingérées comme vomitif (**Bellakhdar., 1997**). L' *halimus* présente un intérêt médical il est utilisé contre les affections coliques, anti- diarrhéique, antispasmodique, antiseptique, anti- rhumatismale, dilatation des vaisseaux et stimulation des centres respiratoires (**Chahma A, 2006**).

7. Résistance d'*A. 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**), la sécheresse (**Martinez et al, 2004**). Les métaux lourdes (**Lutts et al, 2004 ; Nedjimi et Daoud, 2008 ; Lefèvre et al, 2009 ; Manousaki et Kalogerakis, 2009**).

7.1. Résistance à la sécheresse

A. halimus sont généralement efficaces dans leur utilisation de l'eau et donc adaptée aux climats secs, elle possède des racines très longues qui lui permettent l'absorption de l'eau des horizons profonds (jusqu'à 5 m) (**Le Houérou, 1992**).

7.2. Résistance à la salinité

A. halimus accumule les principaux ions de la salinité dans ses tissus en les stockant dans les vacuoles (**Walker et al, 2014**). Elle est particulièrement bien adapté aux régions arides affectées par la salinité (**Bajji et al, 1998**).

7.3. Résistance aux métaux lourds

Dans la culture hydroponique ou dans des boîtes de Pétri (**Márquez-García et al, 2013; Mesnoua et Lotmani, 2015**) cette espèce est capable de tolérer de fortes concentrations de Cd, Cu, Mn, Ni, Pb et Zn. Les mécanismes de tolérance au Cd peut se traduit par une précipitation de ce métal avec de l'oxalate dans la tige (**Lutts et al, 2004**), ou son excrétion dans les poils vésiculaires (**Lefèvre et al, 2009**).

Chapitre 02

Généralité sur les Métaux Lourds

1. Définition des métaux lourds

Le terme « métaux lourds » désigne les éléments métalliques naturels, métaux ou dans certains cas métalloïdes (environ 65 éléments), caractérisés par une forte masse volumique supérieure à 5 g.c

Le terme métaux lourds, « heavy metal », implique aussi une notion de toxicité. Le terme « éléments traces métalliques » est aussi utilisé pour décrire ces mêmes éléments, car ils se retrouvent souvent en très faible quantité dans l'environnement (**Baker et Walker, 1990**). D'autres définitions existent : métaux dont la masse volumique est supérieure à 6 g.ml⁻¹ (parfois la définition donne une limite de 4,5 ou 5,0 g.ml⁻¹) ; métal dont le numéro atomique est supérieur à 20 (**Duffus, 2002 ; Polle et Schützendübel, 2004 ; Kvesitadze et al, 2006 ; Tremel-Schaub et Feix, 2005**).

Tableau 04: Classification périodique des éléments métalliques

TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS

■ Non-métaux ■ Métaux pauvres ■ Gaz nobles
 ■ Métaux alcalins ■ Métalloïdes ■ Lanthanide
 ■ Métaux alcalino-terreux ■ Halogènes ■ Actinide
 ■ Métaux de transition

H																	He	
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	
Na	Mg											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	Tc	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	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Uut	Fl	Uup	Lv	Uus	Uuo	
		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu		
		Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr		

La plupart des métaux considérés comme polluants dans l'environnement sont ceux des groupes B ou " intermédiaires " qui forment des complexes inorganiques dans les solutions salines, sont extrêmement solubles dans les lipides et traversent alors très facilement les membranes cellulaires (**Simkiss & Mason, 1983**).

Tableau05: Classification des principaux ETM selon leur affinité pour des ligands oxygénés (classe A), des ligands azotés ou soufrés (classe B) et pour les deux types de ligands (classe intermédiaire) (**Hopkin, 1989**).

Classe A	Classe intermédiaire	Classe B
Calcium	Zinc	Cadmium
Magnésium	Plomb	Cuivre
Manganèse	Fer	Mercure
Potassium	Chrome	Argent
Sodium	Cobalt	
Strontium	Nickel	
Sodium	Arsenic	
	Vanadium	

2. Origine des ETM

L'origine des ETM dans les sols peut être naturelle, provenant de l'altération de la roche mère (**Muschitz, 2009**). Cependant, la majorité des ETM retrouvés dans l'environnement est d'origine anthropique.

Selon **Afshin et Moore F. (2007)**, les sources de ces éléments dans les sols incluent principalement l'occurrence naturelle dérivée des matériaux d'héritage et des activités humaines.

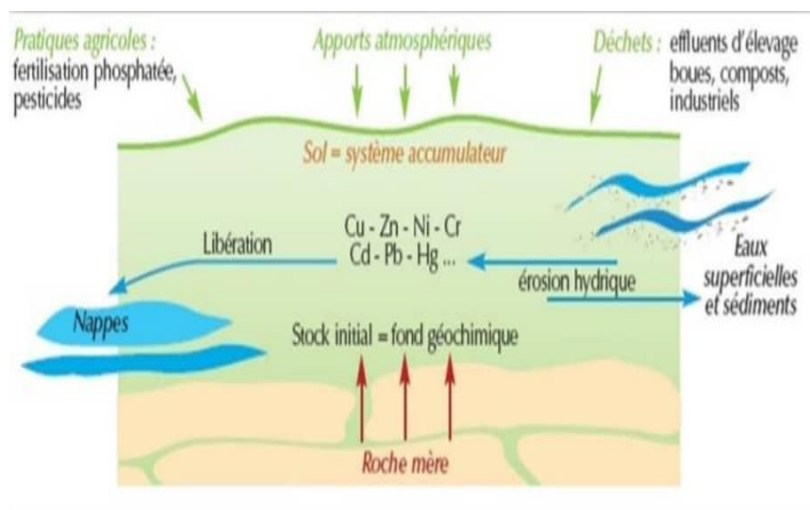


Figure05: Origine des métaux lourds dans le sol (**D'après Robert et Juste, 1999**)

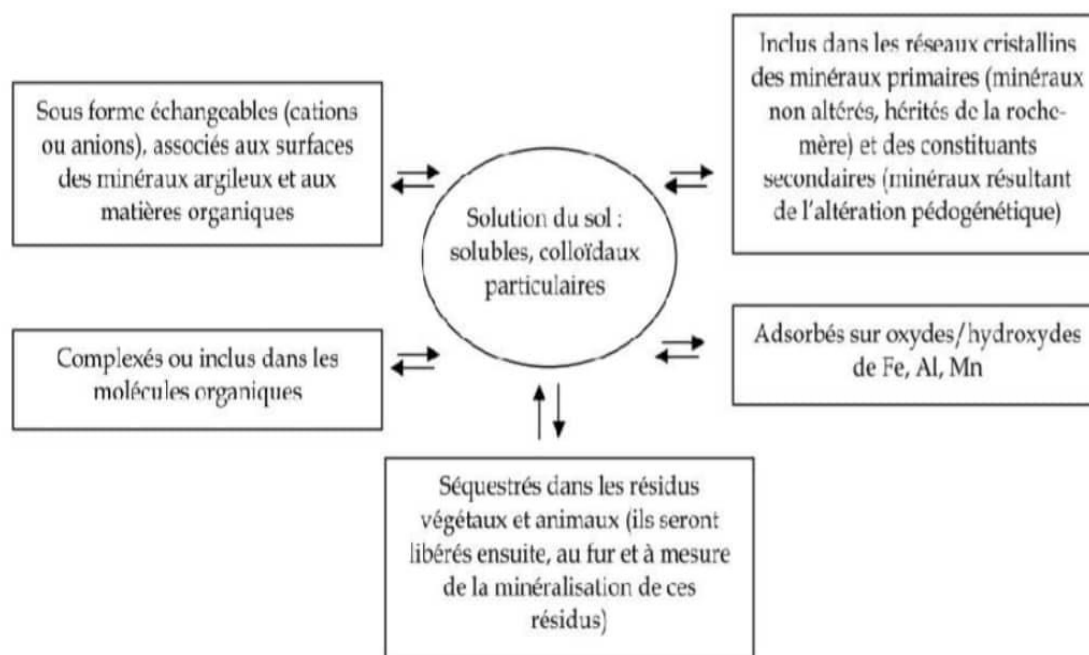


Figure 06: Différents formes et localisation des ETM dans les sols (Baize, 1997).

3. Sources

3.1. Sources naturelles

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

3.2. Sources anthropique

Relève des activités industrielles et aussi va des solides organiques tels les boues d'assainissement, le compost, les fertilisant et les pesticides, a provoqué un accroissement considérable de la teneur en métaux lourds dans l'environnement où ils peuvent pénétrer dans le sol par voie aérienne. Sont présent 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. Les sources anthropogènes sont les suivantes :

- ✓ Activités pétrochimiques.
- ✓ Utilisation de combustibles fossiles (centrales électriques au charbon, chaudières industrielles, fours à ciment).
- ✓ Transport (véhicules et moteurs routiers et non routiers, embarcation).
- ✓ Incinération de déchets.
- ✓ Produits (interrupteurs électriques, amalgames dentaires, éclairages fluorescents).
- ✓ Déchets urbains (eaux usées, boues d'épuration ordures ménagères), agricoles (Mckenzie, 1997).

Tableau06: Sources industrielles et agricoles des métaux présents dans l'environnement (Brignon & Malherbe, 2005).

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

4. Classification et types des métaux lourds

4.1. Classification des métaux lourds

Les métaux lourds peuvent être classés en se basant sur leur densité :

- Les métaux lourds sont dits lourds si leur densité dépasse 5.

- Les métaux lourds sont dits légers si leur densité est inférieure à 5.

Les métaux peuvent également être classés en se basant sur leurs effets biologiques (**Catsiki et Catsielleri, 1980**).

Tableau07: 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

4.2. Les différents types des métaux

D'un autre point de vue biologique, on en distingue deux types en fonction de leurs effets physiologiques et toxiques : métaux essentiels et métaux toxiques (**Huynh, 2009**).

4.2.1. Les métaux essentiels

Sont des éléments indispensables à l'état de traces pour de nombreux processus cellulaires et qui se trouvent en proportion très faible dans les tissus biologiques (**Loué ; 1993**). Certains peuvent devenir toxiques lorsque la concentration dépasse un certain seuil. C'est le cas du cuivre, du nickel, du zinc, du Fer. Par exemple le Zinc à la concentration du milli molaire est un oligoélément qui intervient dans de nombreuses réactions enzymatiques (déshydrogénase, protéinase, peptidase) et joue un rôle important dans le métabolisme des protéines, des glucides et des lipides (**Kabata et Pendais, 2001**).

4.2.2. Les métaux non-essentiels

Les métaux non-essentiels (métaux toxiques) ont un caractère polluant avec des effets toxiques pour les organismes vivants même à faible concentration. Ils n'ont aucun effet bénéfique connu pour la cellule. C'est le cas du plomb (Pb), du mercure (Hg), du cadmium (Cd). La toxicité des métaux lourds pour les micro-organismes du sol est principalement due à leur capacité à établir des complexes stables avec les protéines ce qui peut altérer les sites actifs ou déplacer des cofacteurs métalliques essentiels (**Baath, 1992**).

Tableau08: Principaux éléments métalliques essentiels et non-essentiels (**Hopkin, 1989**)

Eléments essentiels majeurs	Oligo-éléments essentiels	Eléments "essentiels" en ultra trace	Eléments non-essentiels
Calcium, Phosphore, Potassium, Soufre Magnesium, Chlore, Sodium	Fer, Iode, Cuivre, Manganese, zinc, Cobalt, Molybdène, Sélénium, Chrome, Nickel, Vanadium, Silicone, Arsenic	Lithium, Fluor, Aluminium, Étain, Plomb, (Cadmium)* * essentiel si déficit de Zinc	Cadmium, Mercure

5. Rôle physiologique des métaux lourds

Ils y jouent des rôles importants dans les réactions métaboliques et fonctionnent d'ordinaire comme un centre coordinateur de la structure et de la stabilité des enzymes et des protéines (**Perrot, 1983**). Certains de ces éléments peuvent créer des liaisons métal - protéine et sont capables de modifier la structure tertiaire de la protéine.

Ils jouent ainsi un rôle d'accepteurs ou de donneur d'électrons, très important dans les multiples systèmes enzymatiques mettant en jeu des réactions d'oxydoréduction (**Behrouz, 1995 ; Chaignon, 2001**).

Un certain nombre de métaux lourds (Fe, Zn, ...) participent à la défense immunitaire et sont indispensable dans la nutrition des vivants, donc l'alimentation devra apporter en une quantité suffisante pour assurer l'ensemble des fonctions biologiques et en présence seulement d'ions métalliques qui manifeste leur action sur les enzymes et les réactions enzymatiques (**Perrot, 1983**).

6. Les principaux dangers des métaux lourds

- Ils remplacent ou substituent les minéraux essentiels.
- Ils changent notre code génétique.
- Ils produisent des radicaux libres.
- Ils neutralisent les acides aminés utilisés pour la détoxification.
- Ils causent des allergies.
- Ils endommagent les cellules nerveuses (**Bekaert, 2004**)

7. Propriétés physico-chimique d'ETM

7.1 . Le cadmium

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 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 Greenockite (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**).

Le cadmium est insoluble dans l'eau, comme la plupart des métaux, il possède une faible pression de vapeur et est donc une substance considérée comme pratiquement non volatile (**Barbalace inc, 2012**).

7.2. Le plomb

Le plomb, du latin plumb, est un métal mou, gris, sans goût ni odeur caractéristique, se trouvant habituellement en petite quantité dans la croûte terrestre. Il appartient au groupe IV b de la classification périodique des éléments. Ses principales propriétés physico-chimiques sont présentées dans le Tableau 8. De configuration électronique [Xe] 4f¹⁴ 5d¹⁰ 6s² 6p², il possède deux électrons non appariés sur sa couche électronique externe. Cette configuration électronique autorise les degrés d'oxydation (+2) et (+4), en plus de la forme métal (0). (**Sposito et al., 1982**). Le cation Pb²⁺ est un acide au sens de Lewis, c'est-à-dire qu'il est susceptible d'accepter un doublet d'électrons venant d'une base, pour former une liaison covalente. C'est également une espèce chargée, susceptible d'interactions électrostatiques avec des ions de signes contraires pour former une liaison ionique (**Sposito et al, 1982**).

7.3 . Le zinc

Le zinc est un élément chimique, de symbole Zn et de numéro atomique 30, masse atomique de 65,409 g.mol⁻¹ 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 (**Dal Corso, 2012**). Le zinc possède cinq isotopes stables ⁶⁴Zn, ⁶⁶Zn, ⁶⁷Zn, ⁶⁸Zn et ⁷⁰Zn (**Holden, 1994**).

8. Toxicités des Eléments Traces Métalliques

La toxicité des métaux lourds pour un même organisme dépend du type de sol, de sa disponibilité des chaque métaux dans ce sol, de l'état physiologique du micro-organisme (**Baath, 1992**).

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

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**).

Ces métaux lourds sont dangereux pour la santé humaine à très faible concentration selon « the states environmental protection A gency » cependant, le cadmium, le plomb, le chrome, le zinc et d'autres sont considérés (à moins forte dose pour certains) comme étant dangereux pour la santé humaine et dont la présence dans l'environnement doit être surveillée (**Diffus, 1980**).

8.1. La toxicité du cadmium

On identifie le cadmium comme un polluant extrêmement toxique (**Godt et al, 2006**). Il est accumulé dans les strates superficielles des sols et peut être entraîné par les eaux de ruissellement pour atteindre les nappes phréatiques profondes. Dans le cas d'une accumulation du cadmium dans les strates superficielles des sols, il peut être absorbé par les plantes, ce qui représente un problème majeur pour la santé humaine. Une exposition au cadmium entraîne un grand nombre d'effets nocifs, les lésions rénales et le cancer figurant parmi les plus graves (**Godt et al, 2006**). Il est toxique sous toutes ses formes (métal, vapeur, sels, composés organiques).

8.2. Toxicité du plomb

La toxicité du plomb dépend de sa concentration dans le milieu, de sa spéciation, des propriétés du sol, et enfin de l'espèce végétale concernée. Les plantes mettent en place diverses, barrières physiques pour se protéger. Tout d'abord le mucilage sécrété au niveau de la coiffe, qui a la capacité de lier le plomb et donc de gêner son adsorption aux parois cellulaires. Mais pour pouvoir pénétrer dans la racine jusqu'au cylindre central, il doit également passer à travers la paroi cellulaire et la membrane plasmique qui possèdent de nombreux sites de fixation pour le plomb. Quand le plomb a réussi à passer à travers ces barrières de protection, il peut affecter de nombreux processus physiologiques de la plante.

8.3. 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**).

9. Les métaux lourds dans la plante

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**). Les éléments-traces peuvent être déposés à la surface des feuilles et des racines (dans ce cas un lavage à l'eau en enlève une partie) ou pénétrer dans la plante. Ils peuvent y pénétrer par les parties aériennes (feuilles, tiges, fruits), à partir de particules en suspension dans l'air, de composés gazeux (notamment pour le Hg et le Se) ou de composés dissous dans l'eau de pluie ou d'irrigation. Ils peuvent pénétrer par les racines à partir du sol (**Tremel-Schaub et Feix, 2005**).

9.1. Pénétration des éléments traces par les parties aériennes

La contamination par voie aérienne est généralement faible, Les métaux lourds sous forme de poussière ou de gaz peuvent entrer directement par les stomates des feuilles. Une partie des retombées atmosphériques, solubilisée par l'eau de pluie ou d'irrigation, peut traverser la cuticule des feuilles et des fruits. 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**).

9.2 Absorption racinaire

Les éléments-traces peuvent circuler dans la racine de deux façons, par la voie symplasmique et par la voie apoplasmique (**Tremel-Schaub et Feix, 2005**).

9.2.1. La voie symplastique

L'absorption se fait de trois manières (**Tremel-Schaub et Feix, 2005**)

- Une absorption passive,
- Une absorption passive demandant une dépense d'énergie de la part de la cellule,
- Une absorption active (contre un gradient électrochimique)

9.2.2. La voie apoplasmique

Le transport des éléments métalliques se fait passivement à travers la paroi cellulaire par les pores du réseau de la cellulose, de l'hémicellulose et des glycoprotéines. Cependant, une partie des ions peut être adsorbés par les charges négatives de surface de l'acide polygalacturonique des pectines, qui agissent comme des échangeurs d'ions (**Briat et Lebrun, 1999**). La suite du transport vers les vaisseaux conducteurs de sève brute, le xylème, se fait donc par l'intérieur des cellules et nécessite donc une absorption réelle.

9.3 Translocation

Après leur absorption, le transport des éléments dans le xylème de la plante vers les parties aériennes, est appelé « translocation ». 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**). Chez certaines espèces la translocation d'éléments toxiques est plus importante que chez d'autres, pouvant conduire à une accumulation des métaux dans les feuilles et les autres parties aériennes. Les éléments-traces ont tendance à rester dans les racines, surtout quand l'apport est suffisant (pour les oligo-éléments).

9.4 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. 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).

9.5. Les excréations des éléments-traces 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 relâchement est possible vers le milieu environnant. Les métaux relâchés dans la rhizosphère le sont sous forme complexée ou libre (Prasad & Hagemeyer, 1999).

Il peut se produire également, dans les feuilles, un relâchement des métaux de la couche cuticulaire pendant les pluies dites « acides ». Ceci est dû à des phénomènes d'échange cationique entre les ions hydrogène et métalliques. Les métaux sont alors entraînés, lors du « rinçage » des feuilles, vers le sol (Prasad & Hagemeyer, 1999).

Les métaux sous forme gazeuse (Hg (g)) peuvent également fuir à travers les stomates des feuilles dans l'air, lorsque celles-ci sont ouvertes (Prasad & Hagemeyer, 1999).

10. 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).

11. Stratégies et mécanismes de tolérance des plantes

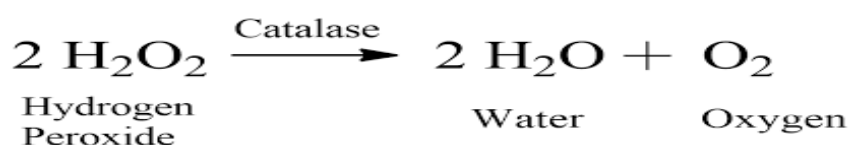
Les plantes possèdent des systèmes de stockage ou de détoxification qui leur permettent de diminuer les effets néfastes des ETM. Selon les espèces, ces systèmes sont plus ou moins développés, mais, il semble à l'heure actuelle que **trois mécanismes** sont prépondérants: la **modification de la perméabilité 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). Il a été observé chez *A. halimus* soumis à un stress métallique une augmentation sensible des peroxydases et de catalase, enzymes faisant partie du système antioxydant (Lotmani et Menoua 2011).

D'autres mécanismes peuvent intervenir suite à un stress métallique, comme par exemple la production de protéines de stress telles les protéines HSP (**Heat Shock Proteins**).

Les cellules végétales possèdent de nombreuses voies de dégradation enzymatique des ROS. Certaines enzymes n'utilisent pas de Co-substrat pour réduire les ROS. Alors que, d'autres utilisent plusieurs cosubstrats dont certains sont des antioxydants comme (l'ascorbate peroxydase), les organismes végétaux ont développé certains moyens de défense contre les atteintes des radicaux libres. Trois activités enzymatiques, il s'agit des superoxyde-dismutases (SOD), des catalases (CAT) et des peroxydases (POX).

11.1. 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**).



11.2. Les peroxydases (POX)

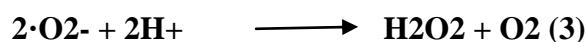
Les peroxydases permettent, comme les catalases, la réduction de H₂O₂ en eau et en oxygène moléculaire. Cependant, à la différence des catalases, les GPx nécessitent la présence d'un substrat particulier pour réaliser leurs activités. Deux types principaux de « molécules antioxydants » sont utilisés comme substrat par les peroxydases l'acide ascorbique et le glutathion (**Wu et al, 2003**).

11.3. Les superoxydes (SOD)

Le SOD est l'une des plus importantes enzymes cellulaires possédant une fonction antioxydant. C'est l'enzyme antioxydant « 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:



11.4. Polyphénol oxydases (PPOs)

Le polyphénol oxydase a été découvert pour la première fois en 1856 par Schoenbein dans le champignon *Boletus luciferus*. Il a noté que l'extrait de ce champignon catalyse l'oxydation en aérobie de certains composés en formant un pigment bleu dans les plantes (Whitaker, 1995 ; Zawistowski et al, 1991 ; Vámos-Vigyázó, 1981). Plusieurs noms ont été associés à la PPO dont la tyrosinase, la crésolase, la catécholase, la diphénolase, la phénolase, le phénol oxydase, l'o-diphénol oxydase et l'acide chlorogénique oxydase. De ces derniers, c'est le nom « polyphénol oxydase » qui reflète généralement la capacité de cette enzyme à utiliser différents composés phénoliques comme substrats. Ainsi, les phénols ou les catéchols peuvent être des substrats pour l'enzyme, et les produits de réaction obtenus sont généralement des o-quinones dans les deux cas. Les noms « tyrosinase », « phénol oxydase » et « polyphénolase » sont aussi généralement employés interchangeablement avec « le polyphénol oxydase » (Zawistowski et al, 1991 ; Burton, 1994 ; Rivas et Whitaker, 1973).

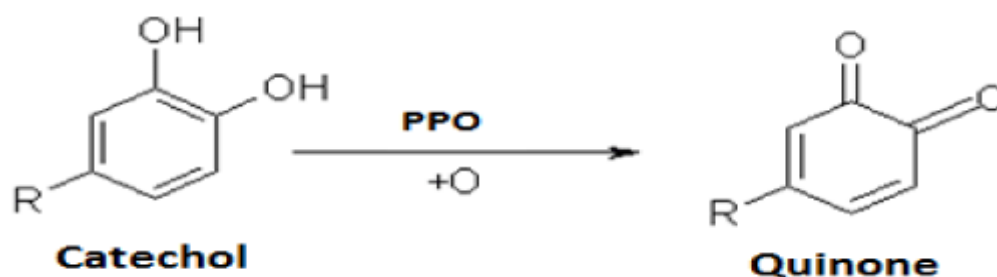


Figure 7 : Réaction enzymatique du polyphénol oxydase (**catéchol oxydase, EC 1.10.3.1**) montrant l'activité du diphénol oxydase que l'on trouve principalement dans les plantes. R dans la figure représente n'importe quel groupe fonctionnel.

Dans les plantes, les PPOs jouent un rôle de résistance contre les infections microbiennes, virales et aussi contre les mauvaises conditions climatiques (Martinez et Whitaker, 1995). Les mécanismes de défense des végétaux impliquant les PPOs sont largement controversés (Vaughn et al, 1988 ; Mayer et Harel, 1991 ; Walker et Ferrar, 1998) et plusieurs

hypothèses sont émises au sujet de leur action. L'une des certitudes est que les polyphénols ont des propriétés antifongiques (**Friedman, 1997**). La PPO catalyse l'oxydation des composés phénoliques en quinones. Ces dernières, sont elles-mêmes bactéricides et fongicides (**Zinkernagel, 1986**), et se polymérisent ensuite pour former des polymères bruns insolubles. Ces derniers forment une barrière qui limite la prolifération de l'infection et l'altération des tissus de la plante, grâce à leurs propriétés antimicrobiennes (**Zawistowski et al, 1991**). Selon Craft et Audia (1962), ces barrières de protection ont été observées dans les patates douces, les carottes, les betteraves, les courges, les navets et les pommes de terre.

Partie 02

Partie Expérimentale

Chapitre 01

Matériels et Méthode

I.1. Matériel et Méthodes**1.1 Matériel végétal**

Le matériel végétal ayant fait l'objet de la présente étude concerne les graines de l'*A.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.

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).
- en dernier rincé plusieurs fois à l'eau distillée, 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 ont subi le protocole de stérilisation suivant (**Fatarna, 2007**):

- Trempage dans un bain d'éthanol à 95% pendant quelques secondes.
- Trempage dans un bain d'eau de Javel à 5% pendant 15 minutes.
- Trois passages successifs dans des bains d'eau distillée stérile de 10 minutes chacun.

Après la germination, les grains ayant des radicules plus de 2 mm de longueur ont été repiqués dans des pots.

- ensuite mises en culture pendant 60 jours dans les mêmes conditions que pour la germination.

1.4. L'arrosage

- L'arrosage est effectué trois fois par semaine par l'eau distillée.
- une fois sur trois par une solution nutritive de Hoagland jusqu'à l'obtention d'un végétal suffisant pour les analyses (Tableau 10, figure 9).

Tableau9: 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





Figure08: Plantule d'*Atriplex halimus* après l'arrosage à l'eau distillée et la solution nutritive (Tedjani, 2022)

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 ont été choisi pour les métaux Zn, Pb (0, 2000, 4000, 6000 et 8000 ppm) et Cd (0, 500, 1000, 1500 et 2000 ppm), 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



Figure 9 : Dispositif expérimental des plantules d'*A. halimus* stressée (Tedjani, 2022)

A : témoin/**B** : d'*A. halimus* stressée par zinc/**C** : d'*A. halimus* stressée par Pb/**D** : d'*A. halimus* stressée par Cd.

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

Tableau10: Dispositif expérimental.

Métaux lourds	Doses des métaux lourds	Nombre total des pots
témoin	0ppm	3pots
Zn	0 ppm	3 pots
	2000 ppm	3 pots
	4000 ppm	3 pots
	6000 ppm	3 pots
	8000 ppm	3 pots
Pb	0 ppm	3 pots
	2000 ppm	3 pots
	4000 ppm	3 pots
	6000 ppm	3 pots
	8000 ppm	3 pots
Cd	0 ppm	3 pots
	500 ppm	3 pots
	1000 ppm	3 pots
	1500 ppm	3 pots
	2000 ppm	3 pots

2. Méthodes

2.1 Prélèvement et préparation du matériel végétal pour les analyses

Après 21 jours de l'application du stress, 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.



Figure 10 : Prélèvement les échantillons d'*Atriplex halimus* (Tedjani, 2022)

2.2. 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).



Figure 11: Broyage de feuille dans tampon et homogénéisateur du broyat pendant 30 sec (Tedjani, 2022)

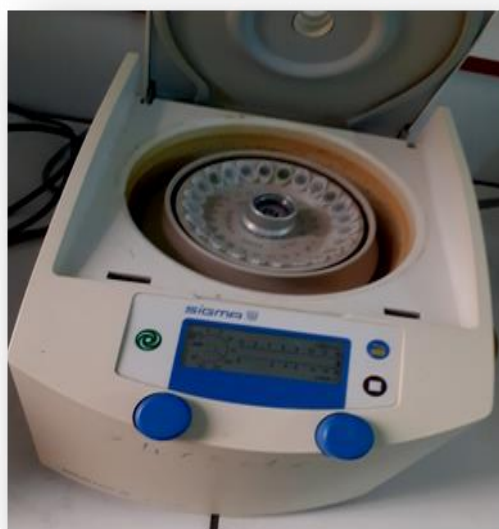


Figure12 : Centrifugation du broyat à 14000 g pendant 20 min (**Tedjani, 2022**)

L'activité catalasique est mesurée selon la méthode **d'Aebi (1984)**. Le mélange réactionnel contient 200 μl de l'extrait enzymatique et 2 ml de H_2O_2 (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 polyphenol oxidases (PPO) contient 2ml de Catéchol (10mM). La réaction a été amorcée par addition de 100 μl 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**).

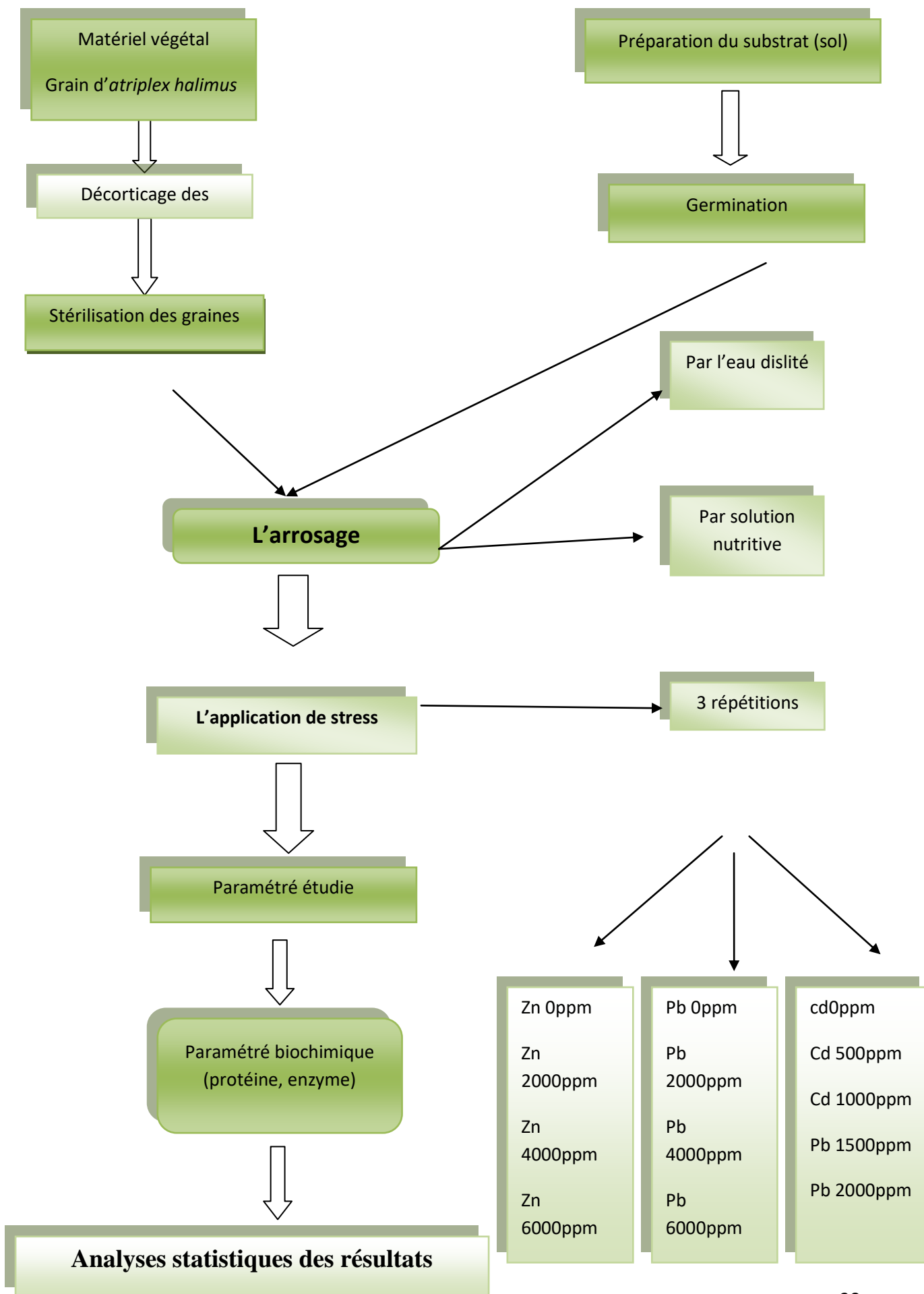
L'activité du catalase et polyphénol oxidase a été défini en étant la quantité d'enzyme utilisé pour l'oxydation de 1 μmol de H_2O_2 ou du catéchol par mg de protéine par min.



Figure 13: Spectrophotomètre UV à une longueur d'onde de 240 nm (Tedjani, 2022)

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

2. Résultats et Discussion

1. Résultats

Dans notre travail, nous avons cherché à mettre en évidence la réponse enzymatique des plantules d'*Atriplex halimus* traités avec le Zn, le Pb à (0, 2000, 4000, 6000, 8000 ppm) et avec le Cd à (500ppm, 1000ppm, 1500ppm, 2000ppm) pendant 21 jours.

1.1. Influence du zinc sur l'activité catalase

Les résultats de l'analyse de la variance (**Tableau 09**), montrent que les différentes concentrations de zinc influent de manière significative ($p < 0.05$) sur l'activité catalase des feuilles de l'*Atriplex halimus*.

Tableau11: Analyse de la variance de l'activité catalase l'*Atriplex halimus* stressée au zinc.

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
	4	0,000	0,000	5,370	0,014

Grâce à notre analyse des résultats de l'histogramme présenté dans la (**figure 16**), nous avons remarqué une diminution de l'activité catalase sous concentration (4000 et 8000ppm) atteignant (0.005 $\mu\text{mole/mg prot}$ et 0.045 $\mu\text{mole/mg prot}$) dans les feuilles de l'*Atriplex halimus* stressée par le Zn comparativement au témoin (0.007 $\mu\text{mole/mg prot}$), Par contre l'activité catalase est augmenté sous les concentrations (2000 et 6000ppm) atteignant (0.0085 $\mu\text{mole/mg prot}$ et 0.011 $\mu\text{mole/mg prot}$) respectivement, cette diminution ou bien l'augmentation est statistiquement non significative.

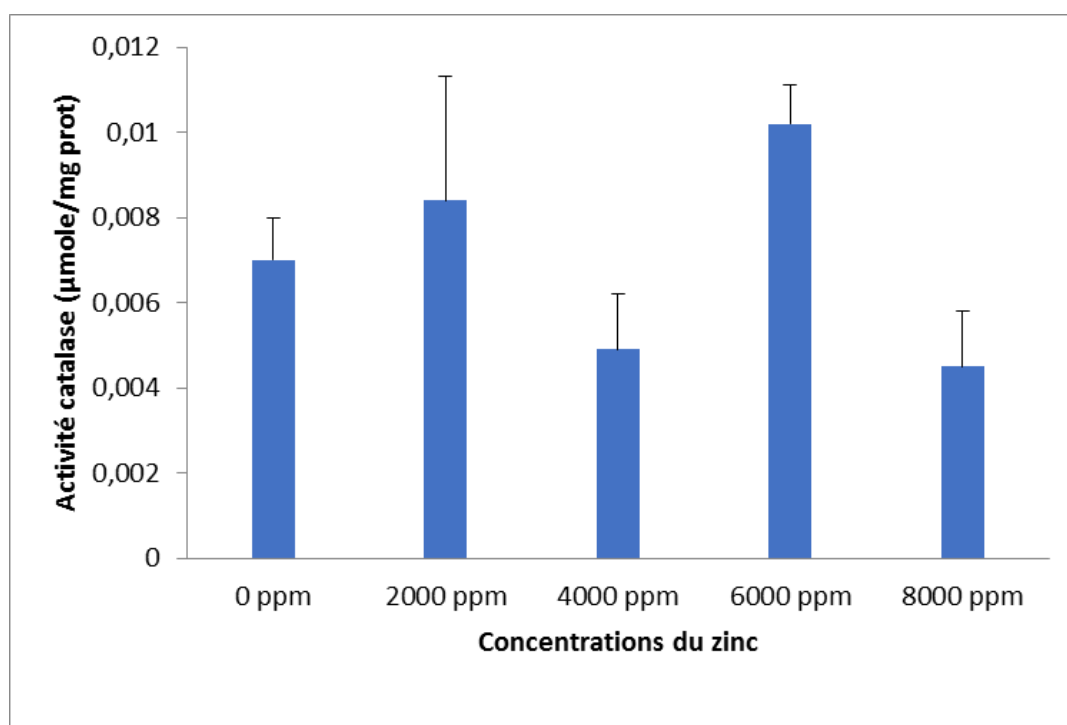


Figure14 : L'activité catalase des feuilles de l'*A.halimus* stressée au zinc.

1.2. Influence du plomb sur l'activité catalase

L'analyse de la variance (tableau 16), ne montre aucun effet significatif ($p=0.648$) sur l'activité catalase l'*A. halimus* stressée au plomb.

Tableau12: Analyse de la variance de l'activité catalase l'*A.halimus* stressée au plomb.

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
	4	0,000	0,000	0,636	0,648

L'analyse des résultats obtenus dans (**figure 17**) montrent une légère diminution de l'activité catalase sous les concentrations (2000, 6000, 6000 ppm) atteignant (0.0065, 0.004 et 0.0067 µmole/mg prot) dans les feuilles de l'*Atriplex halimus* stressée par le plomb comparativement au témoin (0.007 µmole/mg prot), et sous la concentration (8000 ppm) on a remarqué une légère augmentation qui arrive à 0.0078 µmole/mg prot, aussi cette diminution ou bien l'augmentation est statistiquement non significative.

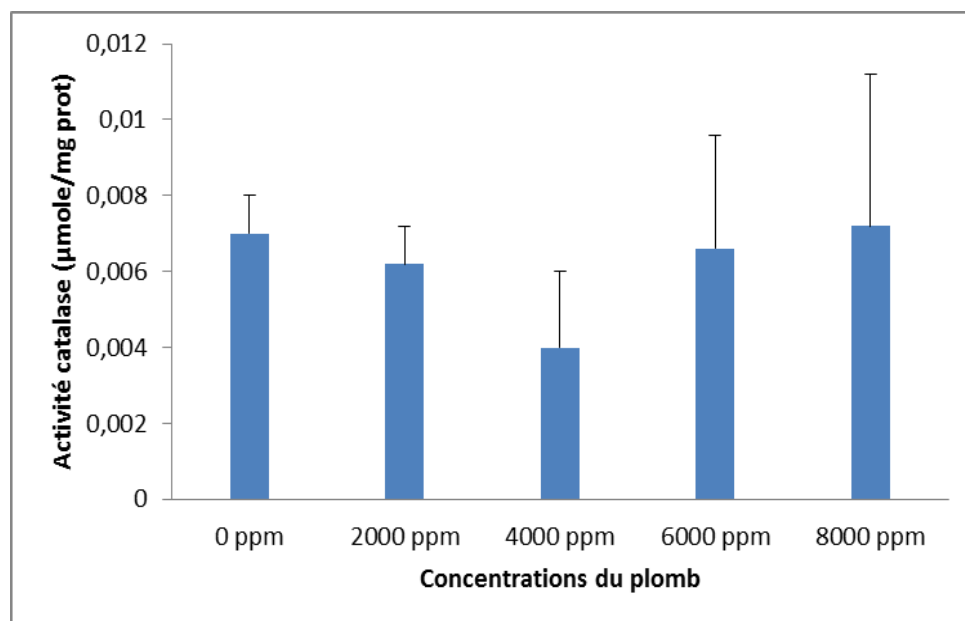


Figure15 : L'activité catalase des feuilles de l'*A.halimus* stressée au plomb.

1.3. Influence du cadmium sur l'activité catalase

Les résultats de l'analyse de la variance (**Tableau 09**), montrent que les différentes concentrations de cadmium influent de manière significative ($p < 0.05$) sur l'activité catalase des feuilles de l'*Atriplex halimus*.

Tableau13: Analyse de la variance de l'activité catalase l'*A.halimus* stressée au cadmium

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
	4	0,000	0,000	5,188	0,016

L'analyse des résultats de l'histogramme présenté dans la (**figure 18**) montre que le cadmium provoque une augmentation non significative de l'activité catalase dans les feuilles de l'*Atriplex halimus*, elle arrive à 0.0085 et 0.009 µmole/mg prot sous les concentrations 500 et 1000 ppm respectivement, comparativement au témoin (0.007 µmole/mg prot), à des concentrations élevées (1500 et 2000ppm) on a remarqué une diminution non significative de l'activité catalase atteignant (0.0039 et 0.0045 µmole/mg prot).

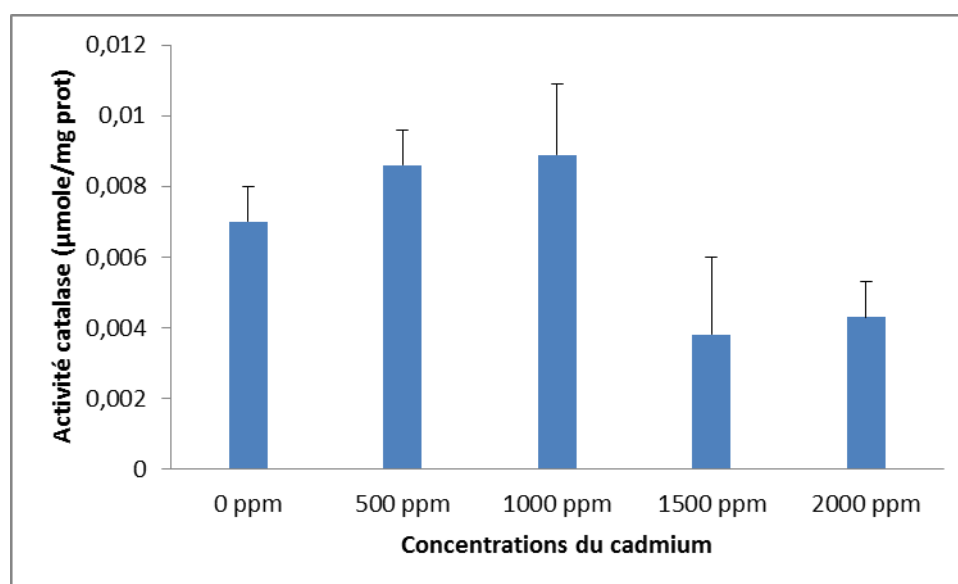


Figure16 :L'activité catalase des feuilles de l'*A.halimus* stressée au cadmium.

1.4. Influence du zinc sur l'activité du polyphénol oxidase (PPO)

L'analyse de la variance (**Tableau 07**),montre il n'y a pas un effet significatif ($p = 0.065$) avec les différentes concentrations de zinc sur l'activité du polyphénol oxidase (PPO) des feuilles de l'*Atriplex halimus*.

Tableau14:Analyse de la variance de l'activité du polyphénol oxidase (PPO) d'*A.halimus* stressée au zinc.

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
	4	0,001	0,000	3,142	0,065

Nous avons remarqué dans les résultats de l'histogramme présenté dans (**figure 19**), une diminution non significative de l'activité PPO atteignant (0.013, 0.02, 0.019 et 0.005 µmole/mg prot) dans les feuilles de l'*Atriplex halimus* stressée par le Zn avec différentes concentrations (2000, 4000, 6000 et 8000 ppm) respectivement par rapport au témoin (0.027 µmole/mg prot).

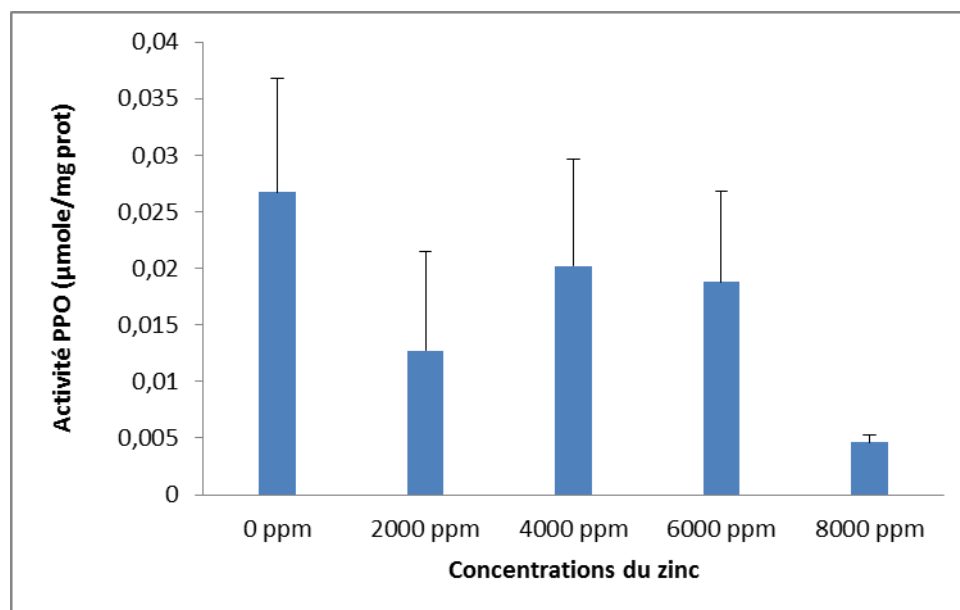


Figure17 :L'activité PPO des feuilles de l'*A.halimus* stressée au zinc

1.5. Influence du plomb sur l'activité du polyphénol oxydase(PPO)

Les résultats de l'analyse de la variance (**Tableau 09**),montrent que les différentes concentrations de plomb influent de manière significative ($p < 0.05$) sur l'activité du polyphénol oxydase(PPO) des feuilles de l'*Atriplex halimus*.

Tableau15:Analyse de la variance de l'activité du polyphénol oxydase(PPO) d'*A.halimus* stressée au plomb

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
	4	0,001	0,000	5,213	0,016

L'analyse des résultats de l'histogramme présenté dans la (**figure20**), nous a permis de remarquer une diminution de l'activité PPO dans les feuilles de l'*Atriplex halimus* stressée par le Pb, cette augmentation est significative sous les traitements 4000 et 6000ppm, et hautement significative sous le traitement 8000ppm avec respectivement une valeur de 0.009 et 0.01 ,0.005 µmole/mg prot, par rapport aux témoin (0.027 µmole/mg prot).

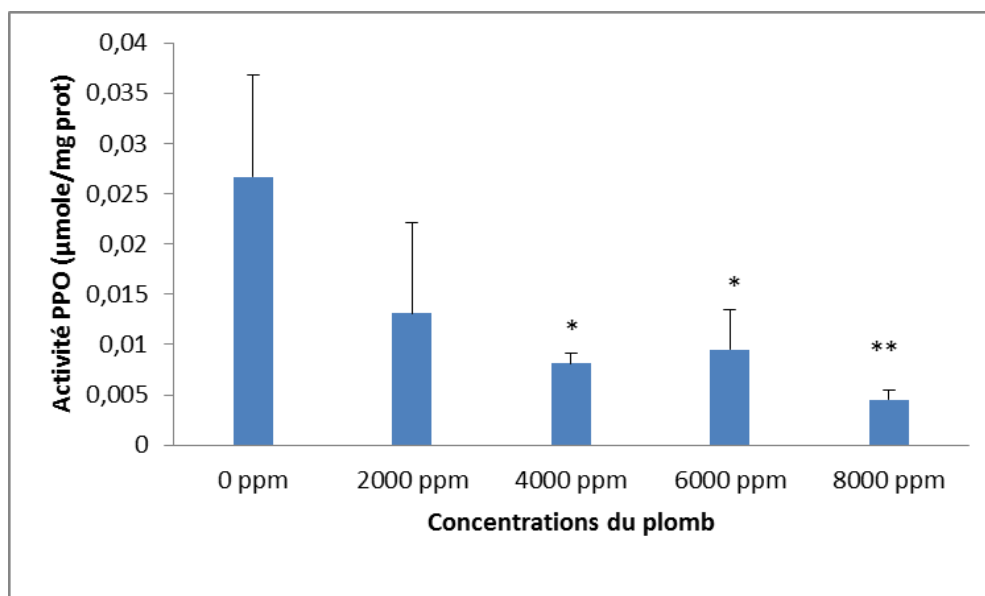


Figure18 :L'activité PPO des feuilles de l'*A.halimus* stressée au plomb

(* significatif à 5%, **HAUTEMENT significatif à 1%)

1.6. Influence du cadmium sur l'activité du polyphénol oxydase(PPO)

Les résultats de l'analyse de la variance (**Tableau 10**), montrent que les différentes concentrations de cadmium influent de manière hautement significative ($p=0.003$) sur l'activité PPO l'*A.halimus* stressée au cadmium.

Tableau16 :Analyse de la variance de l'activité du polyphénol oxydase(PPO) d'*A.halimus* stressée au cadmium

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
	4	0,001	0,000	8,362	0,003

D'après les résultats obtenus sur l'activité PPO foliaire (**figure 21**), une diminution remarquable a été enregistrée sous l'effet de concentrations élevées de cadmium. Cette diminution est significative sous les traitements 1500 et 2000 ppm avec respectivement une valeur de 0.009 et 0.01 µmole/mg prot par rapport aux témoins (0.027 µmole/mg prot).

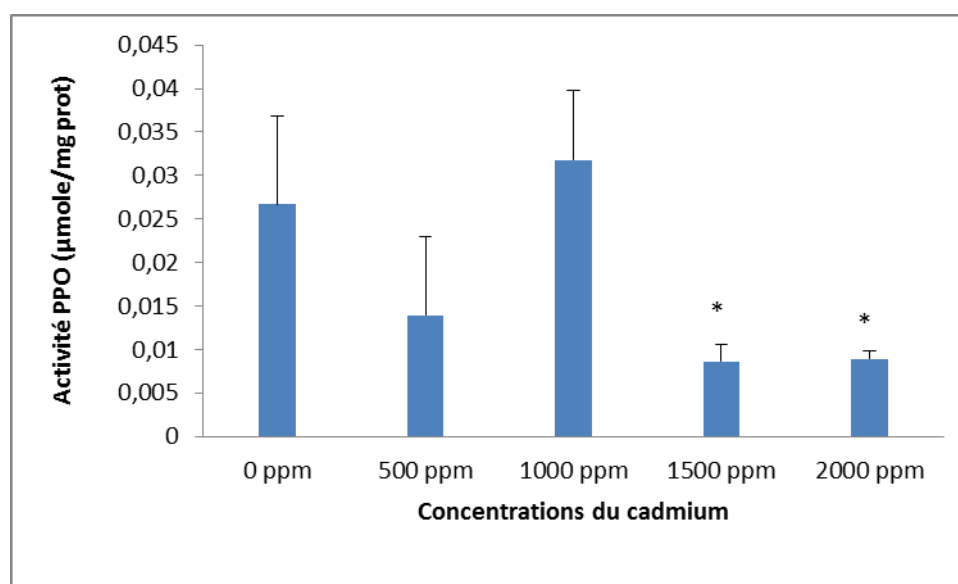


Figure 19: L'activité PPO des feuilles de l'*A. halimus* stressée au cadmium * significatif à 5%.

Discussion

La sensibilité des plantes aux métaux lourds varie d'une espèce à l'autre. Il ya des plantes « hyper accumulatrices » ont la propriété d'aspirer les métaux lourds des sols contaminés et de les transporter jusqu'aux feuilles où ils sont stockés (Masing, 2003). Quand une plante est soumise à n'importe quel facteur de stress, tel que stress des métaux lourds, la première réponse observée est une réduction de son activité métabolique normale suivie d'une réduction de la croissance.

Dans cette étude, nous sommes intéressés à la réponse anti oxydative d'*Atriplex halimus* vis-à-vis les métaux lourds. Cette espèce se caractérise par une tolérance à la toxicité des stress métallique, ce qui en fait une véritable arme écologique face à la pollution (Ortiz-Dorda et al, 2005).

En fonction des résultats que nous avons obtenus grâce à nos travaux, concernant l'activité de catalase, cette enzyme augmente de façon non significative dans les feuilles de *Atriplex halimus* sous un stress métallique avec le cadmium à de faibles concentrations (500,1000ppm) puis diminue aux concentrations élevées (1500 et 2000 ppm) comparativement à la plante témoin. Ceci pourrait s'expliquer par le fait qu'aux faibles concentrations de cadmium, il y a déclenchement des systèmes de détoxification qui pour la plus part sont formés d'enzymes dont principalement la catalase. Ceci permet ainsi à la plante de tolérer puis de s'adapter au xénobiotiques ce qui se traduit par une augmentation de ces enzymes (CAT). Aux fortes concentrations de cadmium, les systèmes en question sont

dépassés et les enzymes sont complètement inhibées. Ces résultats sont conformes à ceux obtenus par (Zouainia Sabrina 2016 et Chaoui et al, 1997 et Cho et. Park, 2000). De nombreuses études ont montré que cette activité est augmentée sous l'effet d'un traitement au cadmium, notamment chez les espèces de *Lemna* (Srivastava et Telor, 1992). Une étude menée par Maria et al, (2009) sur l'écophysiologie de la tolérance d'*Elodea canadensis* à l'exposition au nickel, montre une augmentation de l'activité CAT.

Beaucoup d'études confirment une augmentation de l'action antioxydant sous l'influence des métaux lourds (Lagriffoul et al, 1998 ; Baccouch et al, 2001 ; Dixit et al, 2001 ; Pal 2002 ; Zacchini et al, 2003).

Les systèmes enzymatiques antioxydants dans les cellules végétales jouent un rôle important dans la défense de ces organismes dans des conditions de stress, et l'activité accrue de ces enzymes antioxydants est généralement en réponse à la présence d'agents phyto-toxiques (Dong et al, 2006 ; Qiu et al. . et al, 2008). Les plantes sont généralement confrontées aux dommages oxydatifs lorsqu'elles sont exposées au TME (Gupta et al, 2009). Elles synthétisent de nombreuses molécules antioxydants, telles que le glutathion et des enzymes, notamment la catalase comme défense contre le stress oxydatif. (SaiKachout et al., 2010). La CAT constitue la première ligne de défense antioxydant, elle catalyse la dismutation du peroxyde d'hydrogène en eau et en oxygène. Un excès de TME génère une inhibition ou une stimulation de l'activité de diverses enzymes antioxydants (Pál et al, 2006 , Zhang et al, 2009 , Zheng et al, 2010).

Sur la base de nos études sur l'activité de catalase, nous notons que l'activité d'enzyme foliaire d'*Atriplex halimus* stressé par le plomb augmentait de façon légère et non significative en forte concentrations (8000 ppm), ces résultats sont conformes à ceux obtenus par (Aoumeur, 2012), que trouve la présence d'acétate du plomb dans la solution d'arrosage à différente concentration provoque une augmentation du taux de l'enzyme de catalase dans les feuilles, les racines, les tiges et les tubercules de plante du radis d'une façon proportionnelle avec l'augmentation de la concentration de plomb provoquer par une surproduction de d'ERO induite par le plomb.

La tolérance au Pb pourrait être liée au développement de mécanismes tels que la compartimentation qui contrôleraient le transport des ions dans les pousses, améliorant ainsi la tolérance des plantes (Mateos-Naranjo et al., 2014 , Bankaji et al., 2016).

La survie d'*Atriplex halimus* sous toxicité aux traces métalliques peut s'expliquer par l'immobilisation, la diminution de la mobilité des métaux et sa phyto-stabilisation dans les structures souterraines (**Mateos-Naranjo et al., 2014**). La tolérance aux métaux lourds chez les plantes pourrait être contrôlée par deux stratégies essentielles : l'exclusion et l'accumulation (**Mnasri et al, 2015**).

Dans nos études nous avons remarqué qu'une inhibition non significative de l'activité enzymatique de la catalase foliaire à différentes concentrations de Zn (4000 et 8000ppm) avec une augmentation dans les concentrations (2000 et 6000ppm) comparativement au témoin. Ce résultat cohérent avec les résultats des (**S. Abmann et al, 1996, J. Zhejiang 2005**). qui mettent certaines hypothèses qui montrent que les fortes concentrations de Zn induisent une forte toxicité qui peut déstabiliser la balance métabolique.

La diminution des activités enzymatiques à fortes doses de TME peut être due à un déséquilibre du métabolisme et à la génération d'espèces réactives de l'oxygène (**Luna et al., 1994 , Rai et al., 2004 , Shah et al., 2001**).

L'évaluation de l'activité enzymatique du Polyphénoloxidase foliaire (PPO) montre une diminution remarquable sous l'effet des différentes concentrations de Zn, Pb et Cd. Cette diminution est significative sous les traitements (4000 et 6000 ppm) de plomb, (1500 et 2000 ppm) de cadmium et de façon hautement significative sous la concentration (8000 ppm) de plomb comparativement à la plante *Atriplex halimus* témoin. Ces résultats ne correspondent pas à (**Kováčik et Klejdus, 2008, Saffar et al. 2009**) qui trouve que l'activité de PPO est augmenté chez certaines espèces végétales sous stress métallique, par rapport au témoin.

Cette réduction dans les activités et est probablement due à l'inactivation de ces enzymes par l'accumulation excessive de H₂O₂ (**Singh et al, 2006**). L'accumulation de ROS est toxique pour la plante même s'il existe une voie de détoxification. Si la quantité de ROS formée est supérieure à la quantité détruite grâce au système antioxydants, les ROS occasionnent des dégâts au sein de la cellule en dégradant les protéines et les enzymes c'est le phénomène de photo inhibition (**Allen and Ort, 2001**).

Conclusion

Dans nos travaux de recherche, nous avons analysé la réponse oxydative vis-à-vis l'exposition de trois métaux lourds cadmium, zinc et plomb sur les plantules d'*Atriplex halimus*.

Les résultats obtenus montrent:

- *Atriplex halimus* est une espèce qui peut tolérer de fortes concentrations de métaux lourds (cadmium, plomb, zinc). Cette espèce peut être proposée dans un projet de phytoremédiation pour dépolluer les sols contaminés.
- La tolérance de l'*Atriplex halimus* à des fortes concentrations du Zinc est importante par rapport au plomb et le cadmium.
- Le CAT et PPO interviennent dans la défense des plantes, et le CAT joue un rôle important par rapport le PPO dans cette défense.
- Les plantes sont généralement confrontées aux dommages oxydatifs lorsqu'elles sont exposées aux métaux lourds. Elles synthétisent de nombreuses molécules antioxydants, comme défense contre le stress oxydatif.
- La diminution des activités enzymatiques à fortes doses d'ETM peut être due à un déséquilibre du métabolisme et à la génération d'espèces réactives de l'oxygène.

Référence Bibliographique

A

- **Adriano D.C. (2001).** trace elements in terrestrial environment: biochemistry, bioavailability and risks of metals, 2nd edition .new York: spinger- varlag.
- **Afonso, v., champy, r., mitrovic, d., Collin, p., lomri, a., 2007.** Radicaux libres derives de l'oxygène et superoxyde dismutase:rôle dans les maladies rhumatismales. Rev rhum, vol. 74: 636-643.
- **Afshin, q. And f. Moore, 2007.** Statistical analysis of accumulation and sources of heavy metals occurrence in agricultural soil of khoshk riverbanks, Shiraz, Iran. American- Eurasian j. Agric. Environ. Sci., 2(5): 565-573.
- **Al-turki, t.a., omer, s., ghafoor, a., 2000.** A synopsis of the genus atriplex l. (chenopodiaceous) in Saudi Arabia. Feddes repert. 111, 261-293. Doi:10.1002/fedr.20001110503.
- **Anderson, j.w.** "extraction of enzymes and subcellular organelles from plant tissues. Phytochemistry» vol.7, 1973-1988 (1968).
- **Arora j., sairam r.k., srivastava g.c., 2002.** oxidative stress and anti-oxidative system in plants. Current science, vol.82, no.10, p83.
- **Arora, a, sairam, r.k., srivastava, g.c., 2002.** Oxidative stress and oxidative system in plants. Curr. Sci. 82, 1227–1238.

B

- **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.
- **Baize, d. (1997)** .teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France). Références et stratégies d'interprétation. Inra éditions, paris. 410 p
- **Bajji, m., kinet, j.m., lutts, s., 1998a.** Salt stress effects on roots and leaves of *atriplex halimus*
- 1. And their corresponding callus cultures. Plant sci. 137, 131–142. Doi:10.1016/s0168-9452(98)00116-2
- **Bakera. J. Mand walkerp1990.** Ecophysiology of metal uptake by tolerant plants: heavy metal uptake by tolerant plants. In: Shaw, a.j. (editors). Evolutionary aspects. Crc, boca raton.

- **Barbalace j.k, inc, (2012)** : environmentalchemistry.com: environnemental, chemistry & hazardous materials news, careers & resources, [en ligne].
- **Bartosz g., 1997.** Oxidative stress in plants. *Acta physiologiae plantarum* **19**: 47- 64.
- **Bartosz, g., 1997.** Oxidative stress in plants. *Acta physiol. Plant.* **19**, 47–64. Doi: 10.1007/s11738-997-0022-9.
- **Behrouz esghi malayeri, (1995)** : decontamination des sols contenant des métaux lourds a l'aide de plantes et de microorganismes, thèse en biologie des organismes. Université henri Poincaré, nancy i.
- **Belkhodja m. Bidai y, 2004.** Réponse des graines d'*atriplex halimus* l. A la salinité au stade de la germination .Sécheresse, vol 15, no. 4 : 331-335
- **Belkhodja m, bidai y, 2004.** Réponse des graines d'*atriplex halimus* l. A la salinité au stade
- **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.
- **Benrebiha fz. 1987.** Contribution a l'étude de la germination de quelques espèces d'*atriplex* locales et introduites. Thèse de magister. Université d'annabi, algérien. P 119.
- **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.
- **Briat j.f., Lebrun m., 1999.** Plant responses to metal toxicity. *Plant biology and pathologie* **322**, 43-54.
- **Briat jf et lebrun m, 1999-** plant réponses to métaltotoxicity. *Plant biology and pathologie*, académie des sciences, Elsevier, paris.
- Briat, J.F., Lebrun, M., 1999. Plant responses to metal toxicity. *Plant Biology and Pathologie* **322**, 43-54.
- **Brignon j.m.et malherbe l., 2005.** *Cadmium et ses derives*. Ineris – donnéetechnico-économiques sur les substances chimiques en France, Verneuil en halatte, 25 p.
- **Burton, S.G., boshof, a., Edwards, w., rose, p.d.** "biotransformation of phenols using immobilized Polyphénoloxidase." *journal of molecular catalysis b: enzymatic.* vol.5, 411-416 (1998).

C

- **Castroviejo m., inbar m, gomez-villar a, garcia-ruiz j m1990,:** cambios en el cauceaguasabajo de unaprsa de rétion de sedimentos», i reunion national de géomorphologie, teruel: 457-468

- **Chaoui a, Mazhoudi S, Ghorbal MH, El Ferjani E.1997** Cadmium and zinc induction of lipid peroxidation and effects on antioxidant enzyme activities in bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Plant Science* 127,139–147.
- Chaoui, A., Mazhoudi, S., Ghorbal, M.H., El Ferjani, E., 1997. Cadmium and Zinc induction of lipid peroxidation and effects on antioxidant enzyme activities in bean, *Plant Science* 127: 139-147.
- **Chappelka, a.h., Samuelson, l.j., 1998.** Ambient ozone effects on forest trees of the eastern United States: a review. *New phyto.* Doi:10.1046/j.1469- 8137.1998.00166.x
- **Choukr r. A., a. Hamdy et f. Z. Lahmer. 2003.** Germination d'*atriplex halimus* dans des milieux salins. Field calibration of water uptake function 1 - 7.
- **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

- **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
- **Davidanaformed by tetraneura fusiformis** (homoptera: eriosomatidae). *Appl. entomol.* Zool. 32:365-371.De la germination. *Sécheresse*, vol. 15, no. 4 : 331-335
- **Duffus, j.h., 2002.** “Heavy metals” a meaningless term? *Pure appl. Chem.*, vol. 74, no. 5, pp. 793–807
- **Dutuit p., pourrat y., dodeman v. L. 1991.** Stratégie d'implantation d'un système d'espècesadaptées aux conditions d'aridité du pourtour méditerranéen. L'amélioration des plantes pour l'adaptation aux milieux arides .Ed .Aupelpuref . John libbey eurotext .Paris,pp. 6.5-73
- **Dutuit p.1999.** Étude de la diversité biologique de l'*atriplex halimus* pour le repérage in vitro et in vivo d'individus résistants a des conditions extrêmes du milieu et constitution de clones .Contrat ts3 - ct94-264. Summary reports of European commission supported STD - 3 projects (1992-1995). Published by cta 1999Environment International, 30 (2004), pp. 567-576

F

- **Fatarna, l., 2007.** Culture in vitro d'*atriplex halimus* l. Et étude de l'impact des -30- éléments traces métalliques (plomb, zinc et cuivre) sur la germination et la croissance. Thèse de

magister en biotechnologie végétale. Université de Mostaganem, 86-52. Fruiting bracts on the germination of *atriplex halimus* and *salsola vermiculata*. Expl

- **Foyer, C.H., Lelandais, M.L., Kunert, K.J., 1994.** Photo oxidative stress in plants, *Physiol. Plant* 92: 696-717.
- **Francllet a, le houerou hn. 1971.** Les atriplex en Tunisie et en Afrique du nord. Doc f.a.o. Rome. P 189
- **Francllet a. Et le-houerou h.n, 1971** - les atriplex en Tunisie et en Afrique du nord. Doct. F.a.o. Rome 1971. P 249 et p 189.
- **Friedman, m. 1997.** Chemistry, biochemistry, and dietary role of potato polyphénol. A review. *J. Agric. Food chem.* 45: 1523-1540.

G

- **Gougue – a, 2005-** impact de la salinite sur la germination et la croissance des halophytes mémoires de d'ingénieur en agronomie pastorale. Ed université de Djelfa, 75 p.

H

- **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.
- **Hori k, wada a, shibuta t, 1997.** Changes in phenoloxidase activities of the galls on leaves of *ulmus*
- **Huynh. (2009).** impact des métaux lourds sur l'interaction plantes/ verre le terre/ microflore tellurique thèse de doctorat .Univ-paris est p169.

J

- **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.

K

- **Kabata-Pendias, A. & Pendias, H. (2001).** — Trace element in soils and plants. Boca Raton, London, New-York, Washington D.C
- **Kabata-pendias, a., 2011.** Trace éléments in soils and plants, crc press doi:10.1201/b10158-25.

- **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.

L

- **Lagadic, c., caquet, t., 1996.** Marqueurs biologiques de pollution : des outils au service de l'écotoxicologue. Inra mens. 34–38
- **Le houerou h.2000.** utilization of foddertrees and shrubs in the arid and semiarid zones of west Asia and northafrica. Aridsoilresearch and rehabilitation14, 101–135
- **Le houerou h.2000.** utilization of foddertrees and shrubs in the arid and semiarid zones of west Asia and northafrica. Aridsoilresearch and rehabilitation14, 101–135.
- **Le houerou, h.n., 1992.** The role of saltbushes (*atriplex* spp) in arid land rehabilitation in the Mediterranean basin: areview. Agro for. Syst. 18, 107–148. Doi:10.1007/bf00115408.
- **Lotmani, b., mesnoua, m., 2011.** Effects of copper stress on ant oxidative enzymes, chlorophyll and protein content in *atriplex halimus*. African j. Biotechnol. Doi:10.5897/ajb10.1804
- **Lotmani, b., mesnoua, m., 2011.** Effects of copper stress on antioxidative enzymes, chlorophyll and protein content in *atriplex halimus*. African j. Biotechnol.
- **Loue, a. (1993).** Oligo-éléments en agriculture. Ed. Nathan (ed), 45-177.
- **Lutts, s., lefevre, i., delperee, c., kivits, s., dechamps, c., robledo, a., correal, e., 2004.** Heavy metal accumulation by the halophyte species Mediterranean saltbush. J. Environ. Qual. 33, 1271–1279.

M

- **Maalem, s. (2002)** étude éco physiologique de trois espaces halophytes du genre *atriplex* (*a.canescens*, *A. Halimus* et *a.mummularia*) soumises a l'engraissement phosphate. Thèse de magister en physiologie végétale et application biotechnologique .université bassi mokhtar, annaba. Algérien, 76p.
- **Maire. R., 1962** -carte phyto géologique de l'algérien et de la Tunisie. Baconnier. Alger.78p.
- **Marquez-garcia, b, marquez, c, sanjose, i, nieva, f.j.j, rodriguez-rubio, p., muñoz-rodriguez, a. F., 2013.** The effects of heavy metals on germination and seedling characteristics in two halophyte species in Mediterranean marshes. Mar. Pollut. Bull. 70, 119–124. Doi:10.1016/j.marpolbul.2013.02.019

- **Martinez, J.P., lutts, s., schank, a., bajji, m., kinet, j.m., 2004.** Is osmotic adjustment required for water stress resistance in the mediterranean shrub *atriplex halimus* l.? J. Plant physiol. 161, 1041–1051
- **Masing, i., 2003.** Des plantes à l'assaut des métaux lourds. Environnement, vol.2:10
- **Mateos - Naranjo , E. , Andrades - Moreno , L. , Cambrollé , J. , Perez - Martin , A. , 2013 .** Assessing the effect of copper on growth, copper accumulation and physiological responses of grazing species *Atriplex halimus*:Eco-toxicological implications Ecotoxicology and Environmental Safety 90, 136-142.
- **Mateos - Naranjo, E., Castellanos, E.M., Perez - Martin, A., 2014.** Zinc tolerance and accumulation in the halophytic species *Juncus acutus* .Environmental and Experimental Botany 100 , 114-121
- **Mayber A (1975)**the Germination of Seeds. New York: Pergamon Press. Mellveen WD .Negusanti JJ (1994) Nickel in the terrestrial environment. Sci Total Environ 148 : 109-138
- **Mclaughlin m.j., singh b.r. (1999).** Cadmium in soils and plants, eds. Kluwer academic publishers, Dordrecht, Netherlands, pp 273.
- **Muschitz, a., 2009.** Reponses 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.
- **Muschitz, a., 2009.** Reponses 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.

N

- **Negre r., 1961:** petite flore des regions arides du Maroc occidental. Tome 1. centre national de la recherche scientifique, paris : 179- 180
- **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.

O

- **Ortiz-Dorda, J., C. Martinez-Mora, E. Correal, B. Simon and J.L. Cenis, 2005.** Genetic structure of *Atriplex halimus* populations in the Mediterranean basin. Ann. Bot., 95: 827-834.
- **Osman, a.e. & ghali, f. (1997).** Effects of storage conditions and presence of fruiting bracts on the germination of *atriplex halimus* and *salsola vermiculata* .Experimental agriculture 33 : 149-155

P

- **Pokorny b., al sayegh-petkovsek s., ribaric-lasnik c., vrtacnik j., doganoc**
- **Pourrut b., perchet g., silvestre j., cecchi m., guiresse m.et pinelli e.,2008.** Potential role of nadph - oxidase in early steps of lead - induced oxidative burst in vicia faba roots .Journal of plant physiology 165 (6) , 571-579
- **Prasad, m.n. V., hagemeyer, j., 1999.** Heavy metal stress in plants. Springer BerlinHeidelberg, berlin, heidelberg. Doi:10.1007/978-3-662-07745-0.
Protein expr. Purif. 1993; **4**: 290-297

Q

- **Quezel p, santa t. 1962.** Nouvelle flore de l'Afrique et les regions désertiques meridionales.ed. Anatol. France. P 228.
- **Quezel p. Et santa s., 1963.** Nouvelle flore de l'algerien et des regions désertiques meridionales .Cnrs,ed, paris

R

- **Remon, e. (2006).** Tolérance et accumulation des métaux lourds par la végétationspontannée des friches métallurgiques : vers de nouvelles méthodes de bio - dépollution. Thèse de doctorat pour l'obtention du titre de docteur des universités en biologie végétale,université jean Monnet,faculté des sciences et ies,Int - Etienne,France
- **Remon, e., 2006.**Tolérance et accumulation des métaux lourds par la végétationspontannée des friches métallurgiques : vers de nouvelles méthodes de bio-dépollution.
- **Remon, e., 2006.**Tolérance et accumulation des métaux lourds par la végétationspontannée des friches métallurgiques : vers de nouvelles méthodes de bio-dépollution. Biologie végétale. Université jean Monnet - Saint-Etienne, 2006. Français. Tel-00362527.

S

- **Sies h (1997).** Oxidative stress: oxidants and antioxidants. Exp. Physio., 82(2): 291–295.
- **Sposito g. (1989)** the chemistry of soils. Oxford univ press, 277 p
- **Souahi H, Gharbi A, Gassarellil Z (2017).** Growth and physiological responses of cereals species under lead stress. International Journal of Biosciences 11(1): 266-273.

- **Souahi H, Gassarellil Z, Gharbi A, Meksem Amara L (2021)**. Comparative growth of cereal species under lead stress. In: Ksibi M. et al. (eds) Recent Advances in Environmental Science from the Euro-Mediterranean and Surrounding Regions (2nd Edition). EMCEI 2019. Environmental Science and Engineering. Springer, Cham.
- **Souahi H, Chebout A, Akrouf K, Massaoud N, Gacem R (2021)**. Physiological responses to lead exposure in wheat, barley and oat. *Environmental challenge* 4: 100079.
- **Souahi H (2021)**. Impact of lead on the amount of chlorophyll and carotenoids in the leaves of *Triticum durum* and *T. aestivum*, *Hordeum vulgare* and *Avena sativa*. *Biosystems Diversity* 29(3): 207-210.
- **S. Abmann, K. Sigler, M. Hofer**
Cd⁺² induced damage to yeast plasma membrane and its alleviation by Zn⁺²: studies on schizosaccharomycetes pompe cells and reconstituted plasma membrane vesicles
Arch. Microbiol., 165 (1996), pp. 279-284.

T

- **Talamali, a., bajji, m., le Thomas, a., kinet, j.m., 2003**. Dutuit p. Flower architecture and sex-determination: how des *atriplex halimus* l. Play with floral morphogenesis and sexgenes?
New phytol. 157: 105–113
- **Tremel-schaub, a., feix, I., 2005**. Contamination des sols : transferts des sols vers les plantes,
edp science. Ed. Ademe, agence de l'environnement et de la maitrise de l'énergie
- **Tremel-schaub, a., feix, I., 2005**. Contamination des sols : transferts des sols vers les plantes,
edp science. Ed. Ademe, agence de l'environnement et de la maitrise de l'énergie.

V

- **Vaughn k. C., lax a. R., duke s. 0. 1988**. Polyphénol oxidase: the chloroplast oxidase with no established function. *Physio. Plant.* 72: 659-665.
- **Vazquez-Torres A**. Redox active thiol sensors of oxidative and nitrosative stress. *Antioxid Redox Signal.* 2012;17:1201–1214.
- **Verkleij, J. A. C. & Schat, H. 1990**. Mechanisms of metal tolerance in higher plants .In: A.J. Shaw (ed.) Heavy metal tolerance in plants: evolutionary aspects. CRC Pressa Inc., Boca Raton, Florida pp. 179-193

W

- **Wade et al. 1993** resolution of transcription factors from a transcriptionally active whole-cell extract from yeast purification of *tfiib*, *tbp*, and RNA polymerase *ii*.
- **Wang, c., zhang, s.h., wang, puff.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.
- **Weis and Weis, 2004 J.S. Weis, P.** Weis Metal uptake, transport and release by wetland plants: implications for phytoremediation and restoration
- **Weis, P., Windham, L., Burke, D.J. & Weis, J.S. (2002).** — Release into the environment of metals by two vascular salt plants. *Mar. Envir. Res.*, 54: 325-329.
- **Whitaker j., lee, CY. 1995.** Recent advances in chemistry of enzymatic browning. In enzymatic browning and its prevention. J. Whitaker, c. Y. Lee (Eds). Washington, American chemical society, 2-
- **Wong, c.h., jager, h.j., 1978.** Salt-induced gesticulation in mesophyll cells of atriplex species. *Plant science lettres*, 12 : 63-68
- **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

Y

- **Yanqun et al., 2004 Z.** Yanqun, L. Yuan, C. Schvartz, L. Langland, L. **Fan** Accumulation of Pb, Cd, Cu and Zn in plants and hyper accumulator choice in lanping lead–zinc mine area. China

Z

- **Zawistowski, j., biliaderis, cg., eskin, nam. 1991.** Polyphone oxidase. In: oxidative enzyme in foods. D.s. Robinson. N.a.m eskin, eds. (London, UK: Elsevier applied science). 217-273
- **Zid boukhris m, 1977** – quelques aspects de la tolérance de l'*Atriplex halimus* au chlorure de sodium: multiplication, croissance et composition minérale. *Ecole. Plant.* 12: pp 355- 362.
- **Zinkernagel rm, Adler b, HollandJJ.** Cell-mediated immunity to vesicular stomatitis virus infections in mice. *Exp. Cell bio.* 1978;46:53–70.
- **Z.Q. Zhao, Y.G. Zhu, Y.L. Cai**
Effect of zinc on cadmium uptake by spring wheat (*Triticum aestivum*, L.): long-time hydroponic study and short-time 109 Cd tracing study
J. Zhejiang Univ. SCI., 6A (7) (2005), pp. 643-648.