



DÉPARTEMENT DE BILOGIE

N° ...../SNV/2017

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Présenté par

Mme : BEKRALED Khadidja

Mlle : NAIRI Bouchra

Pour l'obtention du diplôme de

**MASTER EN BIOLOGIE**

**Spécialité : PHYTOTECHNOLOGIES APPLIQUÉES AUX SOLS POLLUÉES**

THÈME

**Effet des métaux lourds (plomb, cuivre, zinc et cadmium) sur les caractéristiques biométriques et la synthèse de chlorophylle chez *Atriplex canescens***

Soutenu publiquement le 04/07/2017

DEVANT LE JURY

Président	Mme BELARBI Amaria	M.C.B U. Mostaganem
Encadreur	Mr REGUIG YSAAD Houcine Abdelhakim	Prof U. Mostaganem
Co encadreur	Mme KHEDIM Ikram	Doctorante U. Mostaganem
Examineur	Mr GHAMNIA Youcef	M.A.B U. Mostaganem

Année universitaire : 2016-2017

# Remerciements

**«Tout d’abord, grâce à AL KARIM qui nous a créé, nous a protégé, qui est toujours avec nous et qui ne nous laisse jamais seule. Louanges à ALLAH ».**

Ce travail a été réalisé au laboratoire de biodiversité et conservation des eaux et des sols au sein de l’Université de Mostaganem (L’INES) sous l’encadrement du Mme KHEDIM, que nous remercions pour avoir accepté de diriger ce travail malgré toutes ses lourdes charges, nous la remercions aussi pour ses conseils, sa disponibilité, ses orientations, et sa patience.

Nous voudrions remercier du fond du cœur Mr le président du jury Mr REGUIG YASSAD Houcine Abdelhakim, professeur à l’Université de Mostaganem qui nous a fait l’honneur de présider ce jury, pour la confiance qu’il nous a accordée, et pour les conseils qu’il nous a apportés.

Nous adressons tous nos remerciements à tous les membres du jury. Veuillez trouver ici nos remerciements les plus sincères.

Toute nos gratitude à nos collègues de promotion «PASP », et à toutes les personnes ayant attribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Nous remercions très chaleureusement tous nos enseignants depuis notre enfance pour le savoir qu’ils nous ont donnée durant des années, les membres du laboratoire et tous ceux aiment la science.

# ***DEDICACE***

*Avant tout je remercie **mon DIEU** le tout puissant qui m'a  
donné la ténacité pour achever ce travail.*

***Je dédie ce modeste travail à :***

*Mes très chers parents qui m'ont encouragée, et toujours soutenue ;  
en m'inculquant le sens de la responsabilité.*

*Mes sœurs : Hayat, Wiam, et mon ange Hadjer ;*

*Mme BEKRALED Khadidja ma sœur, ma copine, et mon binôme.*

*Ma grande famille et mes chers amis ;*

*Mes enseignants, mes collègues et tous les membres du laboratoire,  
surtout Mme KHEDIM Ikram.*

*Enfin, je dédie ce travail à tous ceux qui me connaissent de près ou de loin.*

***NAIRI Bouchra***

## ***Dédicace***

***A ceux qui m'ont aidé à tout surmonter,***

***m'ont soutenue et m'ont encouragée***

***Mon très cher époux,***

***Mes merveilleux papa et maman,***

***Mes adorables filles Hiba et Noudjoud***

***Mes sœurs et mes frères***

***Khadidja***

## Résumé

Le problème des sols contaminés est aujourd'hui est très préoccupant pour les pays émergents. Les métaux lourds tels que le plomb, le cadmium, le cuivre et le zinc, ne peuvent pas être biodégradés et donc persistent dans l'environnement pendant de longues périodes. De plus ils sont continuellement rajoutés dans les sols par diverses activités: en agriculture par l'application de boues d'épuration ou dans l'industrie métallurgique. Leur présence dans les sols modifie considérablement la composition floristique des sites, la détérioration et la disparition de certaines fonctions des sols, ne permettant l'installation que d'un nombre limité d'espèces supportant leur toxicité.

La phytoremédiation constitue une nouvelle approche permettant de dépolluer les sols contaminés par l'utilisation de plantes. Parmi les différents aspects possibles de cette méthode, figure la phytoextraction basée sur l'absorption et l'accumulation du polluant dans les parties aériennes. Pour être efficace, il est nécessaire de disposer de plantes présentant un potentiel adaptatif conséquent et une biomasse élevée.

L'objectif de notre travail est d'étudier l'effet des métaux lourds induit par l'application de quatre doses de cuivre (2000, 2500, 3000, 3500 ppm) d'une part, et à quatre doses de plomb, de zinc et de cadmium (2500, 5000, 7500, 10000 ppm) sur *Atriplex canescens*, en condition semi contrôlées au niveau des paramètres morphologiques et la synthèse de chlorophylle. La tolérance de cette plante a été étudiée par la capacité de croissance et de rendement.

Les résultats obtenus ont montré que l'effet des métaux lourds, varie d'un paramètre à l'autre, il a été enregistré que le stress métallique n'a pas effectué d'importantes perturbations biométriques sur la surface foliaire, la longueur, de la plante.

Et l'étude de la synthèse de chlorophylle de cette espèce montre une diminution de la concentration en chlorophylle.

Enfin, on constate que *Atriplex canescens* possède un important pouvoir résistance face aux métaux lourds, ce qui permet cette espèce d'avoir un candidat très important pour appliquer la phytoremédiation.

**Mots clés :** *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt, métaux lourds, phytoremédiation, paramètres morphologiques, chlorophylle.

## المخلص:

تعد مشكلة التربة الملوثة في زمننا الراهن أمرا مقلقا للغاية بالنسبة للبلدان الناشئة. وإن المعادن الثقيلة كالرصاص والكاديوم والنحاس والزنك، لا يمكن تحللها وبالتالي فهي تستمر في البيئة لفترات طويلة جدا. كما يمكن إعادة إضافتها بشكل مستمر للتربة لأغراض وأنشطة زراعية مختلفة، وذلك من خلال استخدام رواسب الصرف الصحي والصناعات المعدنية.

إن وجود هذه المعادن في التربة يعمل على التأثير الكبير للغطاء النباتي بالمواقع، وتدهور واختفاء بعض وظائف التربة، مما يؤدي إلى اختفاء بعض الكائنات الحية وبقاء الكائنات التي تتحمل درجة من السموم.

العلاج بالنبات هو نهج جديد لتنظيف التربة الملوثة باستخدام النباتات. بين مختلف الجوانب الممكنة لهذه الطريقة بناء على امتصاص وتراكم الملوثات في الأجزاء الهوائية. لكي تكون فعالة، فمن الضروري أن يكون النباتات ذات القدرة على التكيف يترتب على ذلك من والكتلة الحيوية العالية.

والهدف من عملنا هذا، هو دراسة تأثير المعادن بتطبيق أربع جرعات متفاوتة للنحاس (2000، 2500، 3000، 3500 جزء في المليون)، وأربع جرعات متفاوتة من الرصاص والزنك والكاديوم (2500، 5000، 7500، 10000 جزء في المليون) على نبتة القطف مع إخضاعها للمراقبة على المستوى المورفولوجي وتركيب اليخضور.

وأظهرت النتائج أن تأثير المعادن الثقيلة يختلف من معيار إلى آخر، ولم يتم تسجيل تغيرات محسوسة على المستوى البيومترى على المساحة الورقية، وأطوال سيقان وجذور نبتة القطف.

أما دراسة تركيب اليخضور، فقد أظهر انخفاضا في كمية اليخضور.

وفي الأخير نستنتج أن نبتة القطف هي نبتة مقاومة للمعادن الثقيلة، مما يجعلها مشروعا لمعالجة المواقع الملوثة.

الكلمات المفتاحية: المعادن الثقيلة، العلاج بالنبات، القطف، اليخضور.

## Abstract

The problem of contaminated soils is now a major concern for emerging countries. Heavy metals such as lead, cadmium, copper and zinc cannot be biodegraded and therefore persist in the environment for long periods. Moreover, they are continuously added to the soil by various activities: in agriculture by the application of sewage sludge or in the metallurgical industry. Their presence in soils considerably alters the floristic composition of the sites, the deterioration and disappearance of certain soil functions, allowing the installation of only a limited number of species supporting their toxicity.

The objective of our work is to study the effect of metallic stress induced by the application of four doses of copper (2000, 2500, 3000, 3500 ppm) on the one hand and four doses of lead, zinc and cadmium (2500, 5000, 7500, 10000 ppm) on the *Atriplex canescens*, in semi-controlled conditions in the morphological parameters and Synthesis of chlorophyll. The tolerance of this plant was studied by the capacity of growth and yield.

Phytoremediation is a new approach to decontaminating soils contaminated by the use of plants. Among the possible aspects of this method is phytoextraction based on the absorption and accumulation of the pollutant in the aerial parts. To be effective, it is necessary to have plants with significant adaptive potential and high biomass.

The results obtained showed that the effect of heavy metals varies from one parameter to another, it was recorded that the metal stress did not carry out significant biometric perturbations on the leaf area, length of the plant.

And the study of Synthesis of chlorophyll behavior of this species shows a decrease in the concentration of

Finally, it can be seen that the *Atriplex canescens* possesses an important resistance power against the heavy metals, which allowed this species to have a very important candidate for applying phytoremediation.

**Key words:** Phytoremediation, heavy metals, *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt, chlorophyll.

## LISTE DES FIGURES

Figure 01 : Origine et distribution des éléments traces .....	p 4
Figure 02: Localisation (spéciation) des éléments en traces métalliques (ETM) dans le sol .....	p 5
Figure 03 : phytodisponibilité des éléments en trace dans les sols. ....	p 6
Figure 04 : les différentes techniques de la phytoremédiation.....	p
19	
Figure 05 : la morphologie d' <i>Atriplex canescens</i> .....	p 25
Figure 06 : Préparation du substrat.....	p 28
Figure 07: les graines d' <i>Atriplex (A. canescens)</i> .....	p 29
Figure 08: Semis en alvéole.....	p 29
Figure 09 : repiquage des plantules dans les cylindres.....	p 30
Figure 10 : application du stress.....	p 32
Figure 11 : protocole du travail expérimental.....	p34
Figure12 : effet de cuivre sur la longueur de l' <i>Atriplex canecens</i> .....	p 35
Figure 13 : effet de plomb sur la longueur de l' <i>Atriplex canecens</i> .....	p 36
Figure 14 : effet de zinc sur la longueur de l' <i>Atriplex canecens</i> .....	P37
Figure 15 : L'effet de cadmium sur la longueur de l' <i>Atriplex canecens</i> .....	p 38
Figure 16 : rapport longueur de la racine/longueur de la tige(LR/LT) (en cm) de l' <i>Atriplex canecens</i> .....	p 39
Figure 17 : Exprime la variation de rapport de longueur de la racine/longueur de la tige LR/LT(en cm) de l' <i>Atriplex canecens</i> après le stress métallique.....	p 40
Figure 18 : variation de rapport de la biomasse sèche racinaire/biomasse sèche aérienne (BSR/BSA en (g)) de l' <i>Atriplex canecen</i> .....	p 41
Figure19 : la variation de rapport de la biomasse sèche racinaire/biomasse sèche aérienne (BSR/BSA en (g)) de l' <i>Atriplex canecens</i> après le stress métallique .....	p 42
Figure 20 : effet du cuivre sur La surface foliaire de l' <i>Atriplex canecens (Pursh) Nutt</i> .....	p 43
Figure21 : effet du plomb sur La surface foliaire de l' <i>Atriplex canecens (Pursh) Nutt</i>	

.....	p 44
Figure 22 : La surface foliaire des plantes de l' <i>Atriplex canescens</i> (Pursh) Nutt mesurées après le stress métallique de Zn.....	p 45
Figure 23 : effet du cadmium sur La surface foliaire de l' <i>Atriplex canescens</i> (Pursh) Nutt .....	p 46
Figure 24:effet du cuivre sur le chlorophylle.....	p 47
Figure 25 : effet du plomb sur le chlorophylle.....	p 49
Figure 26 : l'effet du Zinc sur la chlorophylle.....	p50
Figure 27 : effet du cadmium sur le chlorophylle.....	p 52

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : les formes des métaux absorbées et leur location dans la plante.....	p 14
Tableau 2 : Présente les caractéristiques des procédés de phytoremédiation.....	p 20
Tableau 3 : répartition numérique des espèces d' <i>Atriplex</i> dans le monde .....	p 22
Tableau 4 : répartition des différentes espèces d' <i>Atriplex</i> en Algérie. ....	p 24
Tableau 5 : Classification classique et phylogénétique du genre <i>Atriplex canescens</i> .....	p 26
Tableau 6: Composition de la solution nutritive de Hoagland (1938).....	p 31
Tableau 7: les différentes doses du stress métallique.....	p 31
Tableau 8: Analyse statistique de la longueur de l' <i>Atriplex canescens</i> (cm) sous l'effet de cuivre.....	p 35
Tableau 9 : analyse statistique à l'aide de test de Newman de la longueur de l' <i>Atriplex canescens</i> (cm) sous l'effet de plomb.....	p 36
Tableau 10 : analyse statistique de la longueur de l' <i>Atriplex canescens</i> (cm) sous l'effet de zinc.....	p 38
Tableau 11: analyse statistique de la longueur de l' <i>Atriplex canescens</i> (cm) sous l'effet de cadmium.....	p 39
Tableau 12 : analyse statistique du rapport LR/LT en cm de l' <i>Atriplex canescens</i>	p 39
Tableau 13 : analyse statistique à l'aide de test de Newmen du rapport LR/LT en cm de l' <i>Atriplex canescens</i> après le stress de métallique.....	p40
Tableau 14 : analyse statistique à l'aide de test de Newmen du rapport BSR/BSA en gramme d' <i>Atriplex canescens</i> .....	p 41
Tableau 15 : analyse statistique à l'aide de test de Newmen du rapport BSR/BSA en gramme de l' <i>Atriplex canescens</i> après le stress métallique. ....	p 42
Tableau 16 : Analyse de variance à l'aide de test de Newman de la surface foliaire des plantes <i>Atriplex canescens</i> (Pursh) Nutt mesurées après le stress métallique de Cu.	

.....	p 43
Tableau 17 : Analyse de variance à l'aide de test de Newman de la surface foliaire des plantes de l' <i>Atriplex canescens</i> (Pursh) Nutt mesurées après le stress métallique de Pb.....	p 44
Tableau 18 : Analyse de variance à l'aide de test Newman de la surface foliaire des plantes de l' <i>Atriplex canescens</i> (Pursh) Nutt mesurées après le stress métallique de Zn. ....	p 45
Tableau 19 : Analyse de variance de la surface foliaire des plantes de l' <i>Atriplex canescens</i> (Pursh) Nutt mesurées après le stress métallique de Cd.....	p 46
Tableau 20 : Analyse de variance à l'aide de test de Newman de l'effet du cuivre sur la moyenne de la teneur en chlorophylle a. ....	p 47
Tableau 21 : Analyse de variance à l'aide de test Newman de l'effet du cuivre sur la moyenne de la teneur en chlorophylle b. ....	p 47
Tableau 22 : Analyse de variance à l'aide de test de Newman de l'effet du cuivre sur la moyenne de la teneur en chlorophylle a+b. ....	p 48
Tableau 23 : Analyse de variance de l'effet du plomb sur la moyenne de la teneur en chlorophylle a.....	p 49
Tableau 24 : Analyse de variance à l'aide de test de Newman de l'effet du plomb sur la moyenne de la teneur en chlorophylle b.....	p 49
Tableau 25 : Analyse de variance à l'aide de test Newman de la moyenne de l'effet du plomb sur la teneur en chlorophylle A+B .....	p 50
Tableau 26 : Analyse de variance de l'effet Zn sur la moyenne de la teneur en chlorophylle a.....	p 51
Tableau 27 : Analyse de variance à l'aide de test Newman de l'effet du Zinc sur la moyenne de la teneur en chlorophylle B .....	p 51
Tableau 28: Analyse de variance à l'aide de test Newman de la moyenne de l'effet du Zinc sur la teneur en chlorophylle A+B .....	p 51
Tableau 29 : Analyse de variance à l'aide de test Newman de l'effet du Cadmium sur la moyenne de la teneur en chlorophylle A .....	p 52
Tableau 30 : Analyse de variance de l'effet du Cadmium sur la moyenne de la teneur	

en chlorophylle B.....	p 52
Tableau 31: Analyse de variance à l'aide de test Newmen de la moyenne de l'effet du Cadmium sur la teneur en chlorophylle A+B.....	p 53

## LISTE DES ABREVIATIONS

Cu : cuivre

Zn : zinc.

Pb : plomb

Cd : cadmium

Cm : centimètre.

g: gramme.

Kg: kilogramme.

PF: poids frais

LT: Longueur de la tige

LR: Longueur de la racine

BSA: Biomasse sèche aérienne

BSR: Biomasse sèche racinaire

chlo: chlorophylle

Ml : millilitre.

L : litre

V : volume.

% : pourcentage.

H : heure

T : témoin

C° : degré Celsius

PH : potentiel d'hydrogène

CE : conductivité électrique

HCL: acide chloridrique

H<sub>2</sub>O : eau distillé

HNO<sub>3</sub> : acide nitrique

mg/kg : milligramme par kilogramme

MO: matière organique

S : sable

# TABLES DES MATIERS

Remerciement	
Dédicace	
Résumé	
ملخص	
Abstract	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des abréviations	
Tables des métiers	
Introduction .....	1
<b>Chapitre I : synthèse bibliographique .....</b>	<b>3</b>
I-Généralité sur les métaux lourds .....	3
I.1 Définition .....	3
I.2 Origine des métaux lourds .....	3
I.3 La spéciation, la mobilité, et la biodisponibilité des métaux lourds .....	4
I.4- Caractéristiques généraux des métaux : (Plomb, Cuivre, Zinc, Cadmium).....	4
I.4.1. Plomb .....	5
I.4.2. Cuivre .....	5
I.4.3. Zinc .....	6
I.4.4. Cadmium .....	6
I.5- Les paramètres physico-chimiques influençant la mobilité des métaux lourds dans le sol .....	7
Le pH .....	8
Le potentiel redox .....	9
L'activité biologique .....	9
temperature .....	10
I.6 Les métaux lourds dans la plante .....	10
I.7 Les mécanismes impliquant dans la tolérance aux métaux lourds chez les plantes .....	11
I.8 La toxicité et la Tolérance aux métaux lourds chez les végétaux .....	

II- La Phytoremédiation .....	11
II.1 Définition .....	17
II-2 Historique .....	17
II-3 Les différentes techniques de la phytoremédiation .....	18
II.4 Les avantages et les limites de la phytoremédiation .....	18
III - Présentation de l'espèce .....	18
III- Les <i>Atriplex</i> .....	20
III-1 répartition Géobotanique .....	21
III-2 <i>Atriplex canescens</i> :.....	22
B- Les intérêts d' <i>Atriplex Canescens</i> .....	23
<b>Chapitre II: Matériels et méthodes</b>	23
1 -Lieu d'expérimentation .....	
2 - Préparation du substrat .....	28
3- Conduit de la culture.....	28
3-1 Matériel végétal .....	29
3-2 Application de stress .....	32
3-3 Prélèvement et préparation du matériel végétal pour les analyses.....	31
4- Paramètres étudiés.....	32
4-1 Paramètres morphologiques .....	32
4-2 Synthèse de chlorophylle .....	32
protocole de travail experimental.....	33
<b>Chapitre III : Résultats et discussion</b>	34
<b>I-Paramètres biométriques</b>	
1-Effet des métaux lourds sur les longueurs de tiges, racine, et plante entière	
1-1 Cuivre .....	35
1-2 Plomb .....	35
1-3 Zinc .....	36
1-4 Cadmium .....	37
2-L'effet de stress métallique sur Le rapport en longueur: longueur de la	37
racine/longueur de la tige (LR/LT) .....	
2-1 Sous stress de cuivre .....	37

2-2	Sous stress de Pb, Zn, Cd .....	37
3	Effet de stress métallique sur le rapport : biomasse sèche racinaire/biomasse sèche aérienne (BSR/BSA)	38
3-1	Sous traitement du Cuivre .....	
3-2	Sous stress de Pb, Zn, Cd .....	39
4	La surface foliaire .....	39
4-1	Sous traitement du Cuivre .....	40
4-2	Sous traitement du Plomb .....	41
4-3	Sous traitement du Zinc .....	42
4-4	Sous traitement du Cadmium .....	44
<b>II-</b>	<b>Synthèse de chlorophylle</b> .....	<b>45</b>
II-1	Effet du cuivre sur le chlorophylle a, b, a+b.....	46
II-2	Effet du plomb sur la chlorophylle a, b, a+b.....	44
II-3	Effet du Zinc sur la chlorophylle a, b, a+b.....	48
II-4	Effet du cadmium sur la chlorophylle A, B, A+B.....	50
Discussion	.....	51
Conclusion.	.....	54
References bibliographiques		57
Annexes		

# Introduction

Nos écosystèmes sont exposés à de nombreuses sources de pollution, les sols et les eaux, près des sites industriels, subissent une accumulation de métaux lourds, de composés organiques, ainsi que parfois de composés radioactifs (**Dabouineau et al., 2005**).

De manière générale, la disponibilité d'un métal lourd introduit dans l'environnement dépend dans un premier temps des processus de solubilisation de ce métal dans l'eau ou de son adsorption à la surface des particules du sol ou d'incorporation à l'intérieur des phases solides, et dans un second temps des processus d'assimilation et éventuelle bio magnification dans la chaîne alimentaire.

Les métaux lourds sont des éléments en traces métalliques (ETM) qui pose le plus de problème pour l'environnement et la santé sont sous forme d'ions ou de nanoparticules ou associés aux aérosols de petite taille. (**Marinussen, et al (1997)**).

Quand ils sont présents dans l'air (pollution routière, industrielle, combustion, etc.), ils sont principalement évacués du compartiment atmosphérique par dépôt humide. Ils se retrouvent alors dans les sols, les sédiments et l'eau interstitielle puis dans les organismes et les écosystèmes, auxquels ils peuvent poser problème. Certains invertébrés (vers par exemple) peuvent les fixer grâce à des molécules chélatrices (métalloprotéines en général) et en excréter une partie via leur mucus ou excréments ; ils peuvent alors les remonter en surface du sol ou des sédiments ; ces métaux ou métalloïdes sont alors à nouveau biodisponibles pour les bactéries, les plantes ou d'autres espèces qui peuvent à nouveau les bioaccumuler. (**Marinussen, et al (1997)**).

Certaines plantes sont capables d'adsorber et d'absorber les métaux au niveau de leurs racines, puis les transloquer vers leurs parties aériennes (**Pignol et Coves., 2003**). L'utilisation de plantes afin de réduire la concentration ou la disponibilité des métaux d'un sol contaminé est appelée la phytoremédiation (**Rudolph., 2010 ; Ben Chekroun et Baghour., 2013 ; Paz-Ferreiro et al., 2014**). Cette technique est un ensemble de méthodes permettant de dépolluer des sols, d'épurer des eaux usées ou d'assainir de l'air en utilisant des plantes vasculaires, des algues (phycoremédiation) ou encore des champignons formant des mycorhizes avec le système racinaire d'espèces végétales (**Gautry et Bailly., 2012 ; Chevrier., 2013**).

La phytoremédiation utilise des plantes et des microorganismes associés pour décontaminer l'environnement et/ou minimiser les risques dans les relations sources - exposition - récepteurs.

Elle est basée sur les fonctions des plantes et de leurs microorganismes qui permettent de dégrader ou séquestrer des polluants organiques et inorganiques.

Elle peut être utilisée pour des substrats solides, liquides et gazeux et mise en œuvre pour des sols pollués, des eaux polluées (grâce aux plantes aquatiques) ou pour filtrer l'air à l'aide de plantes fixatrices (**Pilon-Smits 2005**).

Ces techniques ont des limites, leur mise en œuvre ou le temps nécessaire pour atteindre les objectifs de remédiation peuvent être plus longs, le choix de l'espèce est essentiel. Elle doit tolérer la contamination mais aussi les autres stress qui l'accompagnent, il est souhaitable de privilégier des espèces natives pour éviter d'introduire des espèces invasives (**Pilon-Smits 2005**). Avant de remédier, il faut évaluer la contamination initiale, déterminer les objectifs de remédiation dont le niveau de contaminant à atteindre, le type et l'usage du sol à remédier, la surface et la profondeur de sol à remédier, le temps et l'argent alloué à la remédiation et la (bio)surveillance. Les plantes les plus indiquées doivent être tolérantes à la contamination et aux conditions environnementales du site, avoir une production de biomasse suffisante par rapport aux objectifs et une forte accumulation dans les parties aériennes ou les racines (**Keller et al. 2003**).

*Atriplex* est un genre de plantes de la famille des *Chenopodiaceae*, ou des *Amaranthaceae* selon la classification phylogénétique, comprenant environ une centaine d'espèces des régions tempérées et chaudes. Elles sont également appelées « arroche » (**Keller et al. 2003**).

Dans ce cadre s'inscrit notre travail qui vise à évaluer l'impact des métaux lourds (Cu, Zn, Pb, Cd) sur les paramètres morphologiques et la synthèse de chlorophylle chez la plante *Atriplex* (*Atriplex Canescens* (Pursh Nutt)). (**Keller et al. 2003**).

Nous proposons dans le premier chapitre une synthèse bibliographique commençant par les métaux lourds puis la phytoremédiation et en terminant par une description de quelques éléments caractérisant de l'espèce.

Le deuxième chapitre décrit la méthodologie adoptée au cours de cette expérimentation ; et le dernier chapitre est consacré aux résultats acquis pour les différents paramètres adoptés pour évaluer la réponse des plantes au stress métallique, à l'aide des analyses statistiques. Les résultats sont discutés et conclus.

# Synthèse bibliographique

## I. Généralité sur les métaux lourds :

### I.1 Définition :

Le terme métaux lourds est arbitraire et imprécis. Il est utilisé pour des raisons de simplicité et il recouvre des éléments ayant des propriétés métalliques (ductilité, conductivité, densité, stabilité des cations, spécificité de ligand...) et un numéro atomique supérieur à 20 (**Raskin et al., 1994**).

Les métaux lourds sont définis comme étant des éléments chimiques toxiques ayant une densité supérieure à 5 g/cm<sup>3</sup> (**Elmsley, 2001**).

Sous cette appellation figurent des éléments qui pour certains sont effectivement des métaux tels que Ni, Cu, Zn, Pb, Cd, Hg, Al... mais aussi des métalloïdes tels que

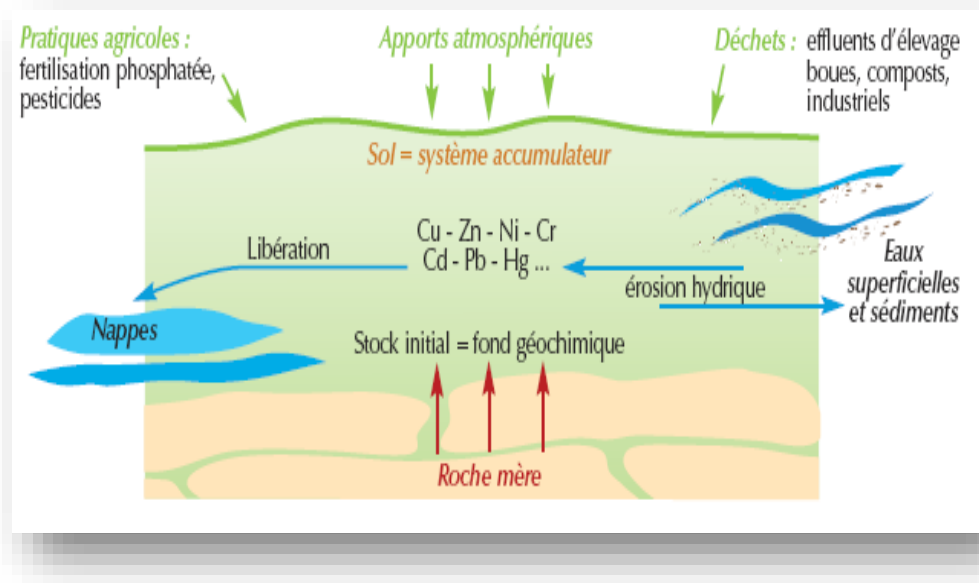
As et Se. Ceux-ci sont présents le plus souvent dans l'environnement sous forme de traces. Les plus toxiques d'entre eux sont le cadmium, l'arsenic, le plomb et le mercure (**Koller, 2004**).

Ces éléments sont présents naturellement dans la croûte terrestre et dans tout organisme vivant, à des concentrations variables suivant les milieux et les organismes. La pollution par les métaux toxiques (METOX) regroupe sept métaux et un métalloïde (chrome, zinc, cuivre, nickel, plomb, arsenic, cadmium et mercure) (**Koller, 2004**).

### I.2 Origine des métaux lourds :

La distribution dans l'environnement procède de deux origines :

L'une, naturelle est le résultat de processus géogéniques comme l'érosion, les précipitations géochimiques de roches et de l'eau de source, l'activité volcanique et bactérienne, et l'autre, relève des activités anthropogéniques tel que les activités industrielles, les fertilisants et les pesticides, ... etc (voir figure1) (**Baize et Sterckeman, 2001**).



**Figure 1 :** Origine et distribution des éléments traces (Robert et Juste, 1997).

#### a - Origine naturelle :

La présence des ETM dans les sols est due à exogènes. Les concentrations en éléments trace métalliques (ETM) dits endogènes, c'est géologique et pédologique du constituant le fond pédogéochimique naturel. Nature du matériau parental des sols, de l'histoire géologique locale, du type et de la durée de la pédogenèse (Baize, 2009).

#### b - Origine anthropique :

L'inquiétude sur les pollutions des sols par l'anthropisation est née de la forte augmentation des contaminations liées au développement agro-industriel de notre société. Ce développement a induit le relargage important de composés minéraux et notamment les éléments en trace, la plupart du temps présents sous forme immobile, vers les écosystèmes, sans qu'ils soient éliminés par les processus de biodégradation et d'épuration (Bourellier *et al.*, 1998).

Les sources de pollutions liées aux activités anthropiques sont diverses, allant de la pulvérisation sous forme de pesticide dans l'agriculture, à l'extraction minière, et au dépôt atmosphérique sur le sol, sans être exhaustif (Naval, 2011), fonderies, combustions et incinérateurs des déchets (Nagajyoti *et al.*, 2010).

### I.3 Spéciation, mobilité et biodisponibilité des métaux lourds :

#### ➤ Spéciation:

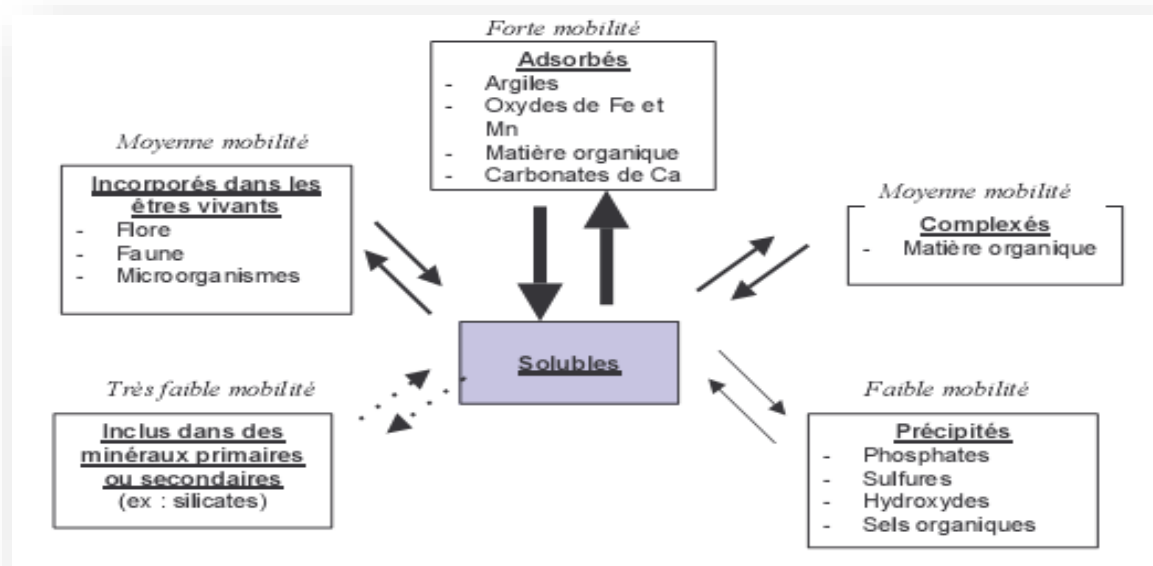
La spéciation est définie comme la distribution des espèces chimiques d'un élément au sein d'un système, solide ou liquide (Templeton *et al.*, 2000).

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

Cependant, le terme de spéciation d'un élément dans un sol est souvent utilisé dans un sens plus large englobant la distribution ou les processus d'identification des différentes phases d'un élément dans le milieu solide ou liquide (Ure et Davidson, 2007).

Les ions métalliques libres et les espèces neutres, sont les formes les plus réactives, car plus facilement assimilables par les organismes vivants (figure 2)

(B. Abderrazzak , 2012) .



**Figure 2 :** Localisation (spéciation) des éléments en traces métalliques (ETM) dans le sol (A. Abderrazzak. ,2012)

#### ➤ Mobilité:

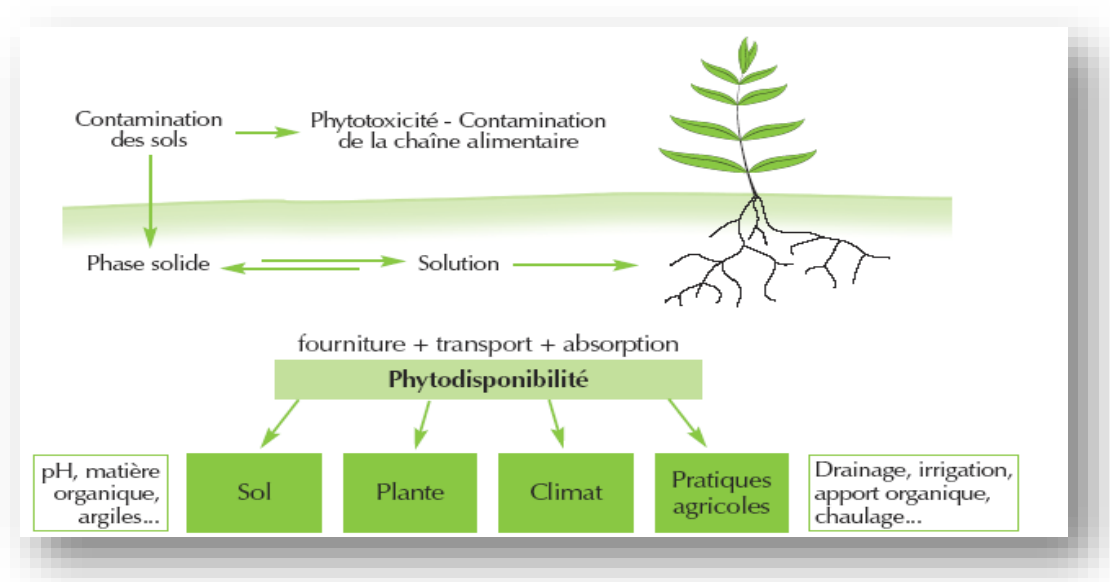
La forme chimique des ETM affecte leur mobilité dans les sols et leur capacité de transfert dans les différents compartiments environnementaux. La mobilité correspond à l'aptitude d'un élément à passer d'un compartiment du sol où il est

retenu avec une certaine énergie vers un autre compartiment où il est retenu avec une énergie moindre (Juste, 1988).

Elle peut être étudiée au travers du changement de phase porteuse d'un élément, à l'échelle d'un sol, la mobilité d'un élément peut être évaluée en étudiant sa distribution verticale ou latérale (McBride, 1994).

#### ➤ Biodisponibilité:

La notion de biodisponibilité des ETM est définie par le passage d'un élément au travers d'une membrane biologique, végétale ou animale (Lebourg et al., 1996). Elle dépend d'une part, de la fraction de l'élément qui peut être mobilisée physicochimiques dans le sol et d'autre part, de la capacité d'une espèce donnée à l'absorber (Michel et Ludwig, 2005).



**Figure 3 :** Phytodisponibilité des éléments en trace dans les sols (Morel, 1996).

### I.4 Caractéristiques généraux des métaux lourds :

#### I.4.1. Plomb :

Le plomb est un métal gris-bleu grisant à l'air humide, facilement malléable et qui résiste à la corrosion. Sa présence dans la croûte terrestre est ubiquitaire (entre 15 mg/kg et 20 mg/kg). Il y est relativement accessible bien qu'il y soit peu présent sous sa forme métallique ( $Pb^0$ ). En effet, parmi ses trois états d'oxydation, le  $Pb(II)$  est le plus fréquent, le  $Pb(IV)$  étant presque inexistant sous des conditions normales.

Le plomb métallique n'est pas soluble dans l'eau, mais plusieurs de ses composés le sont tels le bromure et le chlorure de plomb ainsi que le nitrate de plomb (ATSDR, 2007).

Dans le sol le Pb se trouve sous les formes chimiques suivantes :  $Pb^{2+}$ ,  $PbHCO_3^+$ ,  $PbOH^+$ ,  $PbSO_4$ ,  $Pb(OH)_2$ ,  $PbCO_3$ ,  $PbO$ ,  $Pb(PO_4)_2$ ,  $PbO(PO_4)_2$ ,  $PbCl^+$ .

➤ **Principaux usages :**

Le plomb est utilisé pour les revêtements de câbles sous-marins haute tension car il est parfaitement imperméable aux liquides.

Plomb de chasse : alliage (1,5 % Sb, 0,8 % As), fabriqué selon le procédé « de la tour ». Depuis 2004, les batteries au plomb sont généralement employées dans l'automobile et dans l'industrie. Il est possible de constater 72% de la production de plomb dans ces deux secteurs. Dans le domaine de l'imprimerie, le plomb est allié avec l'étain et l'antimoine afin de fabriquer les caractères. On l'appelle alors plomb typographique. Mais on retrouve également le plomb dans la fabrication de munitions et d'armements (futura-sciences, chimie-metal-plomb, 2011).

➤ **Toxicité du Pb:**

L'intoxication au Pb par l'intermédiaire de l'alimentation n'est pas un grand risque pour l'homme. Il n'est que très peu soluble dans le sol et les poussières contenant Pb se déposent sur les fruits et légumes poussant près des sources atmosphériques fortement polluées (exemple autoroutes) sont retirées à 90% par lavage, le symptôme le plus marquant est le saturnisme : troubles digestifs (coliques), sanguins (anémie, perturbation de la synthèse d'hémoglobine), nerveux (paralysie des extenseurs de la main, encéphalopathie), troubles rénaux néphrites (Zemmerli, 1989).

#### **I.4.2. Cuivre :**

Dans le sol, le Cu se trouve sous les formes chimiques suivantes :  $Cu^{2+}$  ;  $CuOH^+$  ;  $Cu(OH)_2$  ;  $CuO$  ;  $CuCO_3$  ;  $CuO_2^-$  ;  $Cu-O-Fe$  ;  $Cu-O-Al$  ;  $Cu-O-Mn$ . Le cuivre est un métal dont les conductibilités thermique et électrique sont particulièrement élevées et est comme la majorité des métaux, ubiquitaire non seulement dans la croûte terrestre à des niveaux variant entre 5 mg/kg et 70 mg/kg (ATSDR, 2004), mais également attiré d'oligo-éléments dans tous les animaux et les plantes. Le cuivre métallique ( $Cu^0$ ) peut être retrouvé dans l'environnement, mais demeure néanmoins

relativement rare (**J.K.Barbalaceinc, 2012**); il s'y trouve surtout sous ses formes Cu(II) et Cu(III). Sous sa forme métallique, le cuivre n'est pas soluble, mais certains de ces complexes le sont, notamment ceux issus de Cu.

➤ **Principaux usages:**

Le cuivre est utilisé depuis très longtemps en raison de ses propriétés exceptionnelles.

La *Copper Development Association* (CDA) estimait qu'en 2010, les secteurs de la construction, des produits électriques et électroniques et des produits généraux de consommation occupaient respectivement 45 %, 23 %, 12 % et 12 % du marché étasunien (**CDA, 2011**). Le cuivre est de plus utilisé à des fins agricoles comme fongicide, bactéricide et herbicide, principalement sous la forme Cu<sup>2+</sup> (**CDA, 2011**).

➤ **Toxicité du Cu:**

Le cuivre représente un danger quand il est présent en concentration élevée dans l'environnement. Par son action sur les racines des plantes, le cuivre altère leur développement et la perméabilité de leur membrane cellulaire causant le lessivage de certains ions (K<sup>+</sup> ; PO<sub>4</sub><sup>-</sup>) (**Kabata-Pendias and Pendias, 1992**). Il en résulte des effets toxiques sur les plantes et des baisses de rendement.

Chez l'homme, des symptômes de toxicité aiguë se manifestent par des diarrhées, nausées, vomissements, irritations intestinales. 1 gramme de CuSO<sub>4</sub> constitue une dose mortelle ; pour plus de 44 mg/l d'eau de boisson, il y a manifestation de gastro-entérites.

### **I.4.3. Zinc :**

Le zinc est l'un des métaux les plus abondants de la croûte terrestre, soit entre 0,9 mg/kg à 169 mg/kg. Sous sa forme métallique, il possède un aspect blanc bleuté, résiste bien à la corrosion et est insoluble dans l'eau bien que plusieurs de ses formes, notamment celles complexées avec du soufre. La structure chimique et physique du zinc ressemblant beaucoup à celle du cadmium, ce dernier est pratiquement toujours présent sous forme d'impuretés dans les gisements de zinc (**ATSDR, 2005**).

➤ **Principaux usages:**

Aujourd'hui, la majorité du zinc est utilisée dans le processus la galvanisation de l'acier, du fer et de plusieurs autres métaux afin de rendre ceux-ci résistants à la

corrosion. Aux États-Unis, cette industrie représente 55 % de son utilisation totale, le reste étant attribué à la formation d'alliages de toutes sortes (37 %) ainsi qu'à l'ajout dans les peintures, la pharmacologie, la chimie et la médecine (8 %) (USGS, 2012).

➤ **Toxicité du Zinc:**

L'intoxication aiguë par ingestion de zinc est relativement rare, elle provoque des problèmes gastro-intestinaux et des diarrhées. L'inhalation chronique de zinc peut mener à une diminution de l'absorption du cuivre diététique et à des problèmes liés à une carence cuivrique par une diminution du nombre d'érythrocytes.

Une inhalation aiguë d'oxyde de zinc peut occasionner les symptômes associés à une fièvre des métaux : douleurs thoraciques, fièvre, nausées, toux, grelottements et une leucocytose. Le potentiel cancérigène du zinc n'a pas été démontré jusqu'à ce jour. Par ailleurs, une carence peut s'avérer néfaste chez l'humain (Liu et al., 2008).

**I.4.4. Cadmium :**

Le cadmium est un métal résistant à la corrosion, malléable et ubiquitaire dans la croûte terrestre (ATSDR, 2008).

Dans le sol, le Cd se trouve sous les formes chimiques suivantes :  $Cd^{2+}$ ,  $CdSO_4$ ,  $CdCl^+$ ,  $CdHCO_3^+$ ,  $CdO$ ,  $CdCO_3$ ,  $Cd(PO_4)_2$ ,  $CdS$  (ATSDR, 2008).

En raison de sa forme divalente et de sa structure chimique, le cadmium ressemble à plusieurs autres métaux, dont le zinc qu'il remplace partiellement dans la presque totalité des gisements de zinc, sous sa forme métallique (Cd), observable principalement après raffinage (Santé Canada, 1986).

Le cadmium est insoluble dans l'eau, mais certains de ses composés, dont le sulfate de cadmium, sont comme la plupart des métaux, il possède une faible pression de vapeur et est donc une substance considérée comme pratiquement non volatile (ATSDR, 2008).

➤ **Principaux usages:**

Le cadmium a de multiples utilisations : pour le cadmiage ou plaquage protecteur de cadmium sur des métaux ou alliages potentiellement oxydables, en galvanoplastie, pour les soudures spéciales (circuit électriques ou électroniques, alliages à températures de fusion basse...), en électrochimie (fabrication de cathode type pour accumulateur au cadmium et/ou au plomb, pour batteries rechargeables nickel

cadmium) mais aussi notamment dans les écrans de télévision, les barres de contrôles des réacteurs ou piles nucléaires, les colorants (**Baize, D et al., 1999**).

➤ **Toxicité du Cd :**

Malgré ses faibles teneurs dans le sol, cet ETM est le plus redouté car très toxique. Considéré comme assez mobile et assez facilement biodisponible, il risquerait soit de passer dans la chaîne alimentaire par l'intermédiaire des végétaux, soit de migrer en profondeur pour aller contaminer les nappes phréatiques.

Le plus grand danger reste cependant l'ingestion directe de poussières contaminées dans certaines zones de loisirs comme les terrains de jeux ou les terrains de sport.

Dans les régions fortement exposées (à proximité d'industries métallurgiques) on constate dans les populations des lésions rénales très importantes.

Le Cd est stocké dans le foie, les os, mais le rein est l'organe le plus sensible au Cd. La dose journalière admissible (DJA) est de 0.0057mg Cd/g.

Les symptômes de toxicité se manifestent par des troubles respiratoires, atteinte hépato digestive avec vomissement, douleurs abdominales et diarrhées (**Liu et al., 2008**).

### **I.5. Les paramètres physico-chimiques influençant la mobilité des métaux lourds dans le sol :**

#### **I.5.1 Le pH :**

Le pH constitue un facteur dont le rôle est crucial pour la mobilité des ions métalliques, car il influence le nombre de charges négatives pouvant être mises en solution (**McLaughlin, et al., 2000**). Les protons proviennent majoritairement de la respiration végétale et microbienne, ainsi que de l'oxydation des sulfures. A l'inverse, ils sont consommés par l'hydrolyse des minéraux altérables. D'une façon générale, lorsque le pH augmente, les cations sont moins solubles et les anions sont plus solubles (**Blanchard, 2000**).

De plus, l'augmentation de pH induit souvent la formation d'espèces précipitées qui peuvent limiter la solubilité et la biodisponibilité de toutes les espèces ioniques (**Deneux-Mustinet al., 2003**).

#### **I.5.2 Le potentiel redox :**

Le potentiel d'oxydoréduction (Eh) dépend du degré d'aération du sol, des pratiques culturales et des conditions climatiques. En conditions anoxiques, les composés ferriques et manganiques sont plus solubles et libèrent les métaux qui leur sont associés. En revanche en conditions aérobies, les oxydes de Fe et Mn étant peu solubles, ils immobilisent les métaux (**Deneux, Mustin et al., 2003**).

#### **I.4.3 L'activité biologique :**

La compréhension globale des phénomènes biologiques jouant sur la solubilité des métaux lourds dans les sols est rendue difficile par la multiplicité des actions et interactions à tous les niveaux. Les végétaux supérieurs étant au centre de notre étude, et les microorganismes ayant une influence sur l'ensemble du milieu aux échelles de temps et d'espace considérées, nous nous attacherons à développer principalement l'action des microorganismes et des plantes.

Les principaux phénomènes d'action sur la mobilité des polluants métalliques sont la solubilisation, l'insolubilisation et la volatilisation :

##### **a- Solubilisation :**

Proviens de la production de composés acides tels que les acides carboxyliques, phénoliques, aliphatiques, nitrique et sulfurique. Certaines bactéries chimiolithotrophes (*Thiobacillus*, *Leptospirillum*, *Galionella*) oxydent les formes réduites du fer et du soufre contenues dans les sulfures et produisent de l'acide sulfurique, susceptible de dissoudre les silicates, les phosphates, les oxydes et les sulfures, libérant ainsi les métaux lourds contenus. Les champignons et les racines des plantes excrètent eux aussi des acides afin d'augmenter leur absorption de nutriments, ou tout simplement comme déchets métaboliques (**Foy et al., 1978 ; Chaignon, 2001 ; Deneux-Mustinet al., 2003**).

##### **b- L'insolubilisation :**

Constitue le phénomène opposé. Bien que le phénomène de détoxication externe des métaux lourds par des exsudats racinaires n'ait jamais été démontré (**Baker & Walker, 1990**), certains acides organiques de faible masse moléculaire, comme les acides oxalique, citrique ou fumarique qui interviennent dans la complexation intracellulaire d'éléments nutritifs, peuvent être sécrétés dans le milieu extérieur. Ils

limiteraient ainsi les transferts par des processus de complexation (**Baker & Walker, 1990**).

#### **c- Volatilisation :**

Repose sur l'action directe de certains microorganismes sur le degré d'oxydation de l'espèce métallique. C'est le cas du mercure, de l'arsenic et du sélénium (Se). La biométhylation permet le transfert de groupements méthyl directement aux atomes, Pb, Sn (étain), As, Sb (antimoine) et Se, permettant leur volatilisation dans l'atmosphère.

#### **I.5.4 La température :**

La température du sol dépend en premier lieu de la météorologie, et donc du climat, mais elle est également liée à l'activité biologique et influence rétroactivement la formation de complexes avec des ligands inorganiques, en modifiant l'activité de l'élément en solution (**Deneux- Mustinet al., 2003**). La température a un impact direct sur la mobilité des éléments métalliques en déplaçant les équilibres des réactions de dissolution - précipitation et co-précipitation, et un impact indirect, en modifiant la teneur en eau du sol.

### **2. Les métaux lourds dans la plante :**

Parmi l'ensemble des métaux lourds, une vingtaine d'entre eux sont indispensables aux processus physiologiques majeurs, en particulier la respiration, la photosynthèse ou l'assimilation des macronutriments (e.g. azote, soufre...) (**Kabata-Pendias et Pendias, 2001**).

Nombre de ces métaux, Cu, Zn, Ni, Fe, Co, Se et Ba sont aussi impliqués au niveau de processus moléculaires tels que le contrôle de l'expression des gènes ; la biosynthèse des protéines, des acides nucléiques, des substances de croissance, de la chlorophylle et des métabolites secondaires ; le métabolisme lipidique ou la tolérance au stress (**Rengel, 1999**).

#### **2.1 Absorption racinaire :**

La voie principale d'absorption des métaux se fait par simple diffusion au travers de l'apoplaste du cortex racinaire et de l'endoderme (voie apoplastique). Le transport des éléments métalliques à travers la paroi cellulaire se fait passivement (non métabolique et donc dans le sens du gradient de concentration) par les pores du

réseau de la cellulose, 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**). Puis au niveau de l'endoderme, le transport peut devenir actif au niveau de la membrane plasmique des cellules de la bande de Caspary (voie symplastique), autorisant cette fois un transfert contre le gradient de concentration. Cependant, les mécanismes exacts de l'absorption sont encore mal connus, en particulier pour certains éléments comme le Cu (**Greger, 1999 ; Chaignon, 2001**), et différent selon l'espèce métallique. On considère de nos jours que le plomb et le nickel sont absorbés passivement via certaines protéines de type porine, alors que le zinc et le cuivre sont absorbés activement par une protéine de transport sélective, nécessitant de l'énergie (**Kabata-Pendias and Pendias, 2001**).

## 2.2 Translocation

Après leur absorption, le transport des éléments dans le xylème de la plante vers les parties aériennes, appelé « translocation », peut nécessiter ou non la prise en charge des éléments par des agents complexants, tels que les acides organiques, les acides aminés et divers peptides : le fer est pris en charge par le citrate ; le zinc peut être transporté par un complexe anionique (**Alloway, 1995**) ; la majorité du cuivre et une partie du nickel sont chélatées par un acide polyaminopolycarboxylique encore non identifié chez la tomate (**Foy et al., 1978**) ; le cadmium est transporté sous forme libre (**Greger, 1999**).

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 (**Foy et al., 1978**).

Le transport des éléments toxiques par le phloème est moins évident du fait que les cellules qui le constituent sont vivantes et forment un piège supplémentaire (**Greger, 1999**). Toutefois, chez certaines plantes, la nicotianamine, dérivée de la méthionine, pourrait être responsable du transport des métaux, Fe, Cu, Zn et Mn, dans la sève du phloème (**Briat et Lebrun, 1999**).

### 2.3 Accumulation

Certaines plantes accumulent des quantités inhabituelles d'éléments métalliques ; 100 mg/kg de matière sèche pour le Cd, 1000 mg/kg pour le Ni, le Cu, le Co ainsi que 10 000 mg/kg pour le Zn et le Mn. Ces espèces sont alors qualifiées de plante « hyperaccumulatrice ».

Ainsi, plus de 400 espèces hyperaccumulatrices sont recensées, dont plus de 300 pour le nickel et seulement une pour le cadmium.

A part une possible résistance à la sécheresse et aux herbivores (Boyd, 1998), le tableau suivant explique les localisations des métaux dans la plante.

**Tableau 1** : les formes des métaux absorbés et leur location dans la plante (Centre national de la recherche scientifique de la France ,2008).

Métal	Localisation principale dans la plante	Formes absorbées
As	Racines et vieilles feuilles	Sels solubles de $AsO_4^{3-}$ , $As^{3+}$ et $As^{5+}$
Cd	Racines et feuilles	Complexé, chélaté, $Cd^{2+}$
Cr	Racines et feuilles (mais en faible quantité)	Facilement absorbé dans les sols acides, $Cr(III)$ , $Cr(VI)$ , $CrO_4^{2-}$
Cu	Feuilles	Chélates organiques à 99 %
Fe	Retrouvé partout	$Fe^{2+}$ , chélates et complexes organiques
Pb	Racines	Difficilement absorbé car adsorbé par les argiles
Ni	Sève et racines	Différents oxydes et chélates
Se	Graines et bourgeons Notamment	Formes solubles (sélénate, sélénite)

### 3. toxicité et tolérance aux métaux lourds chez les végétaux :

Certains éléments métalliques sont essentiels aux organismes vivants à de faibles concentrations. Mais, ils agissent à de fortes concentrations comme un facteur de stress qui entraîne une modification de la réaction physiologique. Le terme « sensibilité » décrit les effets du stress, qui peuvent aller jusqu'à la mort de la plante.

Par opposition, le terme « résistance » fait référence à la réaction de la plante qui lui permet de survivre face au stress métallique et d'assurer sa descendance (**Levitt, 1980**).

Le premier effet des métaux lourds observable chez les végétaux est une inhibition de la croissance. Celle-ci s'accompagne très souvent de nombreux autres indices de dysfonctionnement : chlorose foliaire, importantes lésions nécrotiques, jaunissement progressif, repliement ou dessèchement du feuillage... (**Devi and Prasad, 1999 ; Dietz et al., 1999 ; Cheng, 2003**).

A l'heure actuelle, les bases moléculaires de ces perturbations sont encore mal connues, mais on admet généralement qu'elles résultent d'un stress oxydatif, dû à la production d'espèces réactives de l'oxygène ou « Réactive OxygenSpecies » (ROS).

Les ROS altèrent toute une série de substrats biologiques importants, avec comme conséquence la modification des domaines fonctionnels des biomolécules : inhibition de l'activité enzymatique, perturbation du métabolisme végétal (notamment la photosynthèse et la respiration), oxydation de protéines, altération des membranes cellulaires via l'induction de phénomènes de peroxydation lipidique, apparition de cassures au sein de l'ADN, pouvant conduire à la mort cellulaire (**Devi etPrasad, 1999 ; Dietz et al., 1999 ; Cheng, 2003**).

### **3.1 La membrane plasmique :**

Le transport actif à travers la membrane plasmique des cellules racinaires est un processus important, car les ions ne peuvent pas diffuser librement à travers la double couche phospholipidique (**Lasat, 2002**), même passivement.

La membrane plasmique peut limiter l'accumulation des ions toxiques, soit en modifiant l'ensemble du flux ionique, soit en employant des systèmes ultra spécifiques autorisant un flux ionique qui ne transporterait pas les ions toxiques (**Meharg, 1993**). Cependant, si la membrane plasmique apparaît comme étant la première barrière face à l'entrée des éléments métalliques dans le cytosol, elle constitue également une cible importante pour la toxicité métallique. En effet, il a été montré que le cuivre pouvait endommager la membrane par oxydation des protéines membranaires, peroxydation lipidique (**Dietz et al., 1999**) ou inhibition des ATPases(**Meharg, 1993**).

Les caractéristiques de ce transporteur et les données physiologiques indiquent que ce système n'est pas spécifique ; il pourrait également transporter d'autres ions divalents comme le zinc et le cadmium (**Briart et Lebrun, 1999**).

- **Des transporteurs membranaires :**

Des transporteurs membranaires de type pompe ATPasique, spécifiques du cadmium seraient présents chez *A. thaliana* et réaliseraient un efflux actif des ions métalliques à l'extérieur des cellules (**Briat et Lebrun, 1999**).

- **L'accumulation des métaux dans les feuilles âgées :**

L'accumulation des métaux dans les feuilles âgées juste avant leur abscission diminuerait ainsi les concentrations métalliques dans la plante. En général, la concentration dans les feuilles augmente avec l'âge. Chez *Armeria maritima* subsp. *halleri*, dans les feuilles marron (les plus âgées), les concentrations en Cu, Cd, Zn et Pb sont 3 à 8 fois celles des jeunes feuilles (**Dahmani-Muller, 1999**). Cette observation suggère un transport interne depuis des feuilles vertes, encore actives d'un point de vue photosynthétique, vers les feuilles qui sont sur le point de tomber, préservant ainsi la photosynthèse tout en détoxiquant la plante. Une accumulation de Cd a été également observée dans les trichomes de plusieurs espèces (**Salt et al., 1995**).

- **Les protéines de choc thermique (Hsp) :**

Les protéines de choc thermique (Hsp) déjà réputées pour leur implication dans le stress lié à un choc thermique, seraient également responsables de la tolérance aux métaux toxiques. En effet, des stress très variés, ayant en commun de dénaturer les protéines (stress protéotoxique), sont capables d'induire cette réponse de type « choc thermique ».

- **La biosynthèse d'éthylène :**

La biosynthèse d'éthylène dans les racines et les feuilles est provoquée par certains métaux, comme le cadmium. L'éthylène serait alors un messenger stimulant la lignification capable de limiter les flux de métaux dans les systèmes vasculaires et accélérant la réponse anti-oxydante par induction de l'activité ascorbate peroxydase, ainsi que la synthèse de métallothionéines (**Sanita di Toppi et Gabrielli, 1999**).

- **Les réponses au stress oxydatifs :**

Une accumulation trop importante de métaux peut générer un stress oxydatif chez les plantes qui réagiront en activant des mécanismes de défense. Par exemple, un excès de fer libre provoque des déséquilibres dans les rapports glutathion réduit-glutathion oxyde et ascorbate-dehydroascorbate. La synthèse d'ascorbate peroxydase et de Cu-Zn superoxyde dismutase augmente alors en cas de toxicité ferreuse. Dans le cas d'une toxicité aluminique, la synthèse de peroxydases, de Cu-Zn superoxyde dismutase et de glutathion transférase est stimulée (**Briat JF, Lebruit M. 1999**).

## **II- La Phytoremédiation :**

### **1. Définition :**

La phytoremédiation est définie comme l'utilisation des plantes pour éliminer ou transformer les polluants en composés moins toxiques. Bien que les plantes soient utilisées depuis longtemps pour dépolluer les sols, d'importantes découvertes scientifiques réalisées au cours de ces dernières années ont contribué améliorer le processus et à étendre son champ d'application. Elle peut être utilisée aussi bien contre les polluants organiques que les polluants inorganiques présents dans les milieux solides (sols), liquides (eaux de surface et souterraines) et gazeux.

La phytoremédiation regroupe : La phytoextraction, la rhizofiltration, la phytostabilisation, la phytovolatilisation, la phytodégradation (**ChedlyA,2007**).

### **2. Historique :**

Cette technique utilisée dès l'antiquité par les Grecs et les Romains, n'aura été utilisée à grande échelle qu'à la fin du XIXème siècle avec la dépollution des eaux usées par les cultures agricoles (**Adolphe-Auguste Mille et Alfred-Durand Claye, 1871**).

Dans les années 1980-90, les techniques de phytoremédiation se perfectionnent et se développent à travers le monde avec la création de villes incluant in situ des systèmes de traitement des eaux usées (**Ecolonia, Pays-Bas ; Kolding, Danemark**).

ce concept se généralise dans le monde au début des années 2000 ; l'agence de protection de l'environnement des Etats-Unis publie le premier guide de phytoremédiation (United States Environmental Protection Agency (**EPA**) 2000).

### 3. Différentes techniques de la phytoremédiation :

#### 3.1 Rhizofiltration :

Cette méthode s'applique spécifiquement à la restauration des eaux de surface et souterraines polluées. L'adsorption, l'absorption ou la précipitation des métaux toxiques par les racines jouent un rôle clef dans cette technique et en conséquence, d'importantes surfaces de racines sont requises (Ghosh et Singh, 2005).

#### 3.2 Phytostabilisation :

La phytostabilisation est l'implantation d'un couvert végétal sur une surface contaminée qui protège le sol contre l'érosion éolienne et hydrique, les polluants sont ainsi immobilisés dans les écosystèmes (Alkorta et al., 2004 ; Ghosh et Singh, 2005).

#### 3.3 Phytoextraction :

La phytoextraction représente la seule voie biologique d'extraction in situ des métaux. Cette technique est basée sur le prélèvement des métaux par leurs racines et de les transporter ensuite vers les parties aériennes (Xiaomei et al., 2005 ; Lestan, 2006), où ils sont généralement séquestrés sous la forme de complexe dans les vacuoles (Montarges-Pelletier et al., 2009). Cette voie de décontamination des sols a été testée au laboratoire puis au terrain, avec la découverte d'espèces nouvelles pour l'extraction de métaux toxiques comme le cadmium (Schwartz et al., 2003)

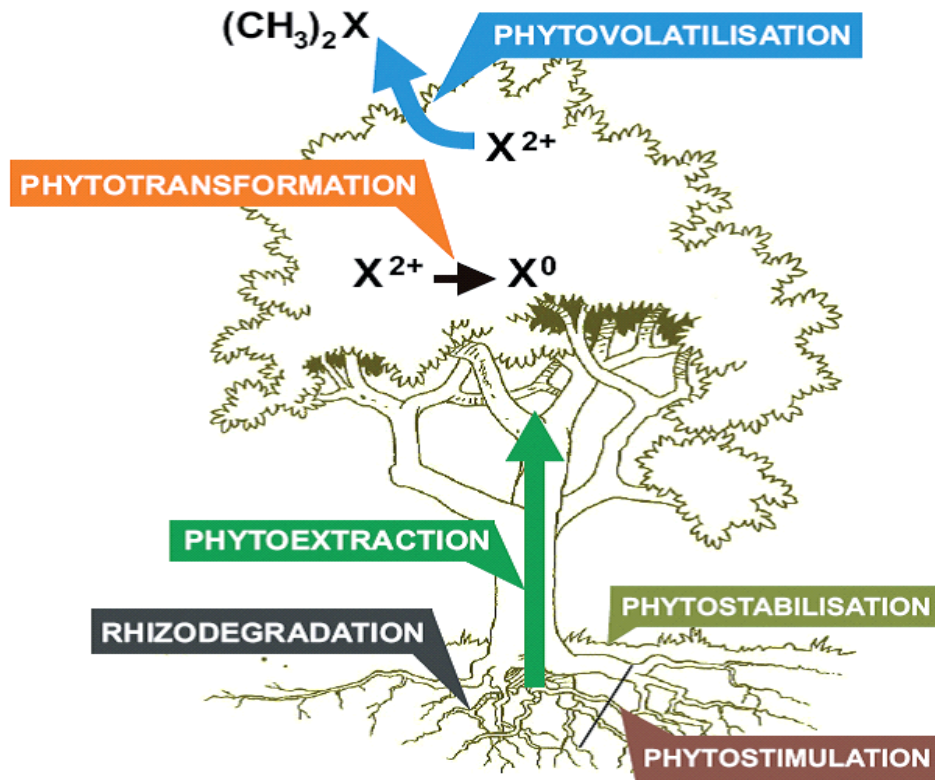
#### 3.4 Phytodégradation :

La phytodégradation (ou phytotransformation) repose sur l'effet rhizosphère qui stimule la dégradation des composés organique des sols. Cette décomposition est réalisée grâce à des enzymes variées, internes ou sécrétées par la plante (Chaudhry et al, 1998 ; Ann Peer et al., 2005).

#### 3.5 Phytovolatilisation :

Dans ce procédé, les contaminants solubles sont absorbés par les racines, transportés vers les feuilles et volatilisés dans l'atmosphère par les stomates sous des formes moins toxiques ou après une modification métabolique. Ainsi, le sélénium peut être relâché dans l'atmosphère sous forme de diméthyl sélénite ou de diméthylsélénite (Ann Peer et al, 2005).

Le schéma si dessus explique les différentes techniques de la phytoremediation (Figure 4).



**Figure 4 :** Exprime les différentes techniques de la phytoremédiation  
(Alain Vavasseur, et *al.*, 2009).

**Tableau 2 :** Présente les caractéristiques des procédés de phytoremédiation.

Procédés de la phytoremédiation	Rhizofiltration	Phytostabilisation	Phytoextraction	Phytovolatilisation	Phytodégradation
Mécanismes	Accumulation, adsorption, précipitation	Complexation, adsorption, précipitation	Accumulation et Hyperaccumulation	Volatilisation	Dégradation rhizosphérique
Type de polluant	Inorganique	Inorganique	Inorganique	Organiques / inorganiques (As, Hg, Se)	Organiques (solvants chlorés, herbicides)
Substrats traités	Milieux aqueux	Sols, sédiments, boues	Sols, sédiments, boues	Sols, sédiments, boues	Eaux, sols, sédiments, boues
Plantes utilisées	<i>H. annuus, B. juncea, N. tabacum, Zea mays</i>	Plantes exclusives ( <i>Agrostis tenuis</i> )	Hyperaccumulatrices ou accumulatrices à forte biomasse	Plantes modifiées génétiquement	Tout type de plante hébergeant des rhizobactéries
Avantages	Utilisation <i>in situ</i> et <i>ex situ</i>	Limite le risque de lixiviation et d'érosion Solution rapide	Utilisation <i>in situ</i> Adaptée aux pollutions diffuse	Dilution de la pollution dans l'air Pas de traitement des déchets végétaux	Pas de traitement des déchets végétaux
Inconvénients	Dépend du système racinaire	Dépend du système racinaire Nécessite une surveillance N'élimine pas le polluant du sol	Dépend du système racinaire Retraitement des déchets produits	Le risque d'exposition atmosphérique n'a pas été quantifié Utilisation d'OGM	Limité à des polluants facilement dégradables Dépend des rhizobactéries associées
Références	(Dushenkov et al., 1995)	(Cunningham et Berti, 2000)	(Garbisu et Alkorta, 2001 ; McGrath et Zhao, 2003)	(Chaney et al., 1997)	(Black, 1995)

#### 4. Avantages et limites de la phytoremédiation :

##### 4.1 Avantages :

- Le coût de la phytoremédiation est bien moindre que celui de procédés traditionnels *in situ* et *ex situ*.
- une technique efficace et sûre.
- Les plantes peuvent être facilement surveillées.
- Récupération et réutilisation de métaux de valeur (des entreprises se spécialisent dans le « phytominage »).

- C'est la méthode la moins destructrice car elle utilise des organismes naturels et préserve l'état naturel de l'environnement (micro-organismes, animaux et structure du sol) (contrairement à l'emploi de procédés chimiques, il n'y a pas d'impacts négatifs sur la fertilité des sols).
- C'est une technique rentable : dans de nombreux cas, la biomasse produite sur des sites pollués peut être exploitée (pour donner de l'énergie, du fourrage en cas de non-transfert des polluants aux parties aériennes, des métaux...).
- C'est une technique applicable à de vastes surfaces (sites industriels ou miniers, anciennes raffineries...) (**Federal Remediation Technologies Roundtable**)

#### **4.2 Limites :**

- La phytoremédiation est limitée à la surface et la profondeur occupées par les racines (noter que de nombreux polluants à base de métaux restent aussi dans la couche de sol supérieure).
- Croissance lente et biomasse faible demandent un investissement en temps assez important, ou/et parfois l'adjonction de chélateurs ou autres substances (pour les pollutions inorganiques comme les ETM).
- On peut cependant utiliser des plantes à croissance rapide.
- Le niveau et le type de contamination influence la phytotoxicité des polluants, dans certains cas, la croissance ou la survie des plantes peut être réduite.
- Bioaccumulation possible de contaminants passant dans la chaîne alimentaire, du niveau des consommateurs primaires à ceux du niveau secondaire.
- Pour que la technique se perfectionne, une sélection végétale est indispensable. Mais cela prend du temps pour sélectionner, hybrider, reproduire, etc(**Federal Remediation Technologies Roundtable**).

### **III - Présentation de l'espèce :**

#### **1. Les *Atriplex* :**

Les *Atriplex* sont des plantes halophytes dotées d'une série de caractères écologiques et physiologiques permettant la croissance et la reproduction dans un environnement salin. (**Haddioui et Baaziz, 2006**).

Les *Atriplex* appartiennent à la famille des Chénopodiacées, qui fait, elle-même, partie de la classe des dicotylédones. Il se caractérisent par leur grande diversité

(Kinet et al., 1998). Les études anatomiques montrent que 40 % des *Atriplex* étudiées sont des plantes en C3 et 60 % en C4 (Smaoui, 1972 ; Osmond et al., 1980).

Le nombre de chromosomes (l'haploïdie) chez les *Atriplex* est 9, il existe des espèces diploïdes ( $2n=18$ ) tandis que d'autres sont tétraploïdes ou hexaploïdes. Selon l'index plantarum de Kew le genre *Atriplex* renferme (417) espèces dans le monde (Le Houérou, 1992). Selon (Kaocheki, 1996) le nombre total des espèces d'*Atriplex* est estimé à 400, Certaines sont herbacées, d'autres arbustives ; elles peuvent être annuelles ou pérennes. D'après Choukr-Allah (1996), dans le bassin méditerranéen, le genre *Atriplex* inclut 48 espèces et sous espèces.

## 2. Géobotanique :

### 2.1. Répartition dans le monde :

Près de 420 espèces réparties dans les diverses régions arides du monde, les zones tempérées, méditerranéennes et subtropicales, entre 20° et 50° de latitude Nord et Sud (Le Houérou, 1993). Il est récapitulé dans le tableau ci-dessous (Tableau 3).

**Tableau 3 :** Répartition numérique des espèces d'*Atriplex* dans le monde (Le Houérou, 1992).

Pays regions	Nombre d'espèces et/ou sous espèces	Pays regions	Nombre d'espèces et/ou sous espèces
Etats-Unis	110	Baja Californie (Mexique)	25
Australie	78	Afrique du nord	22
Bassin méditerranéen	50	Texas	20
Europe	40	Afrique du sud	20
Ex. URSS	36	Iran	20
Proche-Orient	36	Syrie	18
Mexique	35	Palestine & Jordanie	17
Argentine	35	Algérie & Tunisie	17
Californie	32	Bolivie & Pérou	16

## 2.2 Répartition en Afrique :

En Afrique du nord le genre *Atriplex* comprend 15 espèces spontanées, 2 espèces naturalisées et 2 espèces introduites. Ces espèces se répartissent en 9 espèces vivaces, une espèce biannuelle et 9 espèces annuelles (FAO, 1971).

## 2.3. Répartition en Algérie :

En Algérie, l'*Atriplex* est spontané dans les étages bioclimatiques semi-arides et arides. Les plus grandes superficies correspondent aux zones dites steppiques (Batna, Biskra, Bousaâda, Djelfa, saïda, Tebessa et Tiaret) (Pouget, 1980).

Les zones arides et semi-arides sont les loges écologiques préférentielles de la plupart des espèces du genre *Atriplex*. Toutes ces espèces présentent des adaptations particulières à ce type d'habitat. En effet, l'introduction d'arbustes fourragers résistants à l'aridité est l'un des moyens utilisés pour la valorisation des sols dégradés (Pouget, 1980).

En raison de leur intérêt écologique et pastoral, les espèces du genre *Atriplex* ont particulièrement retenu l'attention des organismes étatiques (Kinet et al., 1998). Les *Atriplex* sont les arbustes les mieux adaptés aux régions arides et aux sols pauvres. La couverture d'*Atriplex* accroît considérablement la perméabilité des sols et l'augmentation de drainage dans les horizons superficiels. Elle permet la reconstitution d'un tapis végétal herbacé (Herrero, 1992). Le tableau 4 explique la répartition d'*Atriplex* en Algérie.

**Tableau 4 :** Répartition des différentes espèces d'*Atriplex* en Algérie (Qezel et Santa, 1962).

Espèces	Nom	Localisation
Annuelles (Diffèrent généralement par la forme des feuilles, du port et des valves fructifères)	A. Chenopodioides Batt.	(Bouhanifia Mascara) très rare)
	A. littoralis L.	Environ d'Alger (rare).
	A. hastata L.	Assez commune dans le Tell et très rare ailleurs.
	A. patula L.	Assez commune dans le Tell et très rare à Aflou.
	A. tatarica L.	. Annaba et Sétif (très rare)
	A. rosea L.	Biskra et sur le littoral d'Alger et d'Oran (très rare).
	A. dimorphostegia Kar et Kir.	Sahara septentrional (assez commune), Sahara central (rare).
	A. tornabeni 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).	A. portulacoides L.	Assez commune dans le Tell
	A. halimus L.	Commune dans toutes l'Algérie
	. A. mollis Desf	Biskra et Oued-el-Khir (très rare).
	A. coriacea Forsk	

**2.4. Botanique:**

Le genre *Atriplex* renferme des espèces de plantes d'une morphologie très variable. Elles peuvent être vivaces ; en forme de sous-arbrisseaux ou herbacées annuelles. Les *Atriplex* sont d'une couleur verte ou faiblement blanchâtre, ou encore blanche argentée. Les feuilles de ces plantes sont hastées ou lancéolées, caractérisées par un

limbe bien développé, toujours apparent, dilaté, plane, entier ou lobé. Les plantes de ce genre ont comme caractère commun des fleurs unisexuées, monoïques ou dioïques et parfois elles peuvent être hermaphrodites. Les fleurs mâles sont sans bractées mais elles possèdent un périanthe composé de 4 à 5 sépales entourant 3 à 4 étamines (**Quezel et Santa, 1962**).

Par contre, d'après (**Bonnier et Douin 1994**), elles ont 2 sépales qui sont comme aplatis, libres ou soudés entre eux, où il se trouve 3 à 5 étamines insérées à la leur base. Ces derniers auteurs décrivent les fleurs femelles comme étant dépourvues de bractées et possédant un calice à 5 sépales. L'ovaire est uniloculaire et uniovulé lié à 2 styles filiformes, soudées entre eux dans leur partie inférieures. Le fruit est membraneux, à contour ovale et comprimé entre les 2 bractées de la fleur femelle ou hermaphrodite. La graine est lenticulaire, noire et disposée verticalement (**Quezel et Santa, 1962 ; Bonnier et Douin, 1994**).

**a -*Atriplexcanescens* :**

Espèce originaire du Nord West américain, se trouve au Colorado, Utah, Wyoming, Nevada, New Mexico, Ouest du Texas et au Nord du Mexique, Arbuste buissonneux de 1 à 3 m de haut, formant des touffes de 1 à 3 m de diamètre.

Port plus au moins intriqué, rameaux blanchâtres, feuilles courtement pétiolées, entières, alternes, linéaires, lancéolées, uninervées, et grisâtre, de 3 à 5 cm de longueur sur 0,3 à 0,5 cm de largeur, accompagnées de feuilles axillaires plus petites (0,5 à 1,5 sur 0,1 à 0,3 cm), Inflorescence dioïque en épis simple ou paniculée au sommet des rameaux pour les mâles, axillaires ou en épis subterminaux pour les femelles (**Francllet et LeHouérou, 1971**).



Figure 5 : La morphologie d'*Atriplex canescens* (Sturm, 1996).

#### b- Classification du genre *Atriplex canescens* :

Tableau 5 : Classification classique et phylogénétique du genre *Atriplex canescens* (www.Telabotanica.org. 2011).

Classification classique	
Règne	Plantae
Sous-règne	Tracheobionta
Division	Magnoliophyta
Classe	Magnoliopsida
Sous-classe	Caryophyllidae
Ordre	Caryophyllale
Famille	Chenopodiaceae
Classification phylogénétique	
Ordre	Caryophyllale
Famille	Amaranthaceae

### 3. Les intérêts d'*Atriplex Canescens* :

#### 3.1 Intérêts fourragers :

Les Chénopodiacées qui comprennent les genres *Atriplex*, *Chenopodium*, *Rhagodia* et *Halimione* ont une appétibilité très variable mais constituent un élément important des pâturages arbustifs arides et semi-arides dans bien des pays (FAO, 2008).

Ils fournissent une quantité considérable de fourrage dans les périodes où la nourriture se fait spécialement rare, c'est l'un des *Atriplex* les mieux appréciés par les ovins, avec une ingestion volontaire supérieure aux autres *Atriplex*. Les rameaux feuillés sont consommés frais, fanés ou sèches. Sa valeur fourragère varie de 0,25 à 0,68 UF/kg MS. (Andueza et al., 2000).

### 3.2 Intérêts économiques :

De nombreuses études ont mis en évidence le fait qu'en associant la culture des céréales aux arbustes fourragers appartenant au genre *Atriplex* ; la production des céréales à augmenter de 25% (Brandie, 1987). De plus en été et en automne ; le bétail peut éventuellement brouter les chaumes d'orge et les arbustes d'*Atriplex* par ailleurs, la structure ligneuse des *Atriplex* constituent une source d'énergie intéressante (Abbad et al., 2004).

### 3-3 Intérêts thérapeutiques :

Certains espèces d'*Atriplex* sont largement connue pour leur intérêt médicinale traditionnelle à savoir dans le traitement digestif, respiratoire, uro-génitale ; vasculaire, et possède des propriétés anti hyper cholestérolémiante ; anti peritique anti rhumatismal et anti hyper glycémique (Defeo et Senatore , 1993).

C'est une plante très utilisée pour la prévention contre les fibromes utérins chez les femmes célibataires âgées, ce sont des tumeurs bénignes hormono-dépendantes qui atteints l'utérus et même les seins des femmes célibataires âgées qui n'ont pas eu l'occasion de tomber en grossesse (Ishakvet, 2012).

# Matériels et méthodes

### 1. Lieu d'expérimentation :

Cette expérimentation a été réalisée sous une serre en verre situé à Mazagran à 5 Km environ de la ville de Mostaganem (Algérie), qui repose sur une latitude de 35,8879489 Nord 35° 53' 16,616 '' et une longitude 0 ,60663699 Est 0° 3' 38, 89'' et dans le laboratoire de biodiversité et conservation des eaux et des sols à l'université d'Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem.

### 2. Préparation du substrat :

Le substrat contenu dans les cylindres est constitué d'un mélange de sable, de terreaux, avec les proportions 2V/V. L'arrosage s'effectue à la capacité de rétention. Le sable est prélevé au bord de la mer ; pour son usage, il a subi plusieurs opérations de préparation, en commençant par le tamisage pour éliminer les débris végétaux, animaux et toutes les pierres, ensuite, on utilise l'esprit de sel pour le lavage, rincé abondamment à l'eau distillé pour éliminer les chlorures et les carbonates puis laisser séché à l'air (figure6). Le fond des cylindres est tapissé d'une couche de graviers pour assurer le drainage. Les cylindres en plastiques sont remplis de 7000 g de substrat cette valeur de poids sert à déterminer la capacité de rétention de ce substrat.



Figure 6 : le lavage du sable.

### 3. Conduite de la culture :

#### 3.1 Matériel végétal :

Nous avons utilisé comme matériel végétal des graines de l'*Atriplex* (*Atriplex canescens*) de la famille chénopodiacées, proviennent de la région d'El

Bayedh au mois d'Octobre 2016.

#### A- Préparation des graines :

Dans la serre, les graines sont décortiquées manuellement, désinfectées à l'eau de javel pendant 5 minutes puis rincées abondamment à l'eau distillée pour éliminer toute trace de chlore. Séché avant la mise en germination (figure7).



Figure 7 : Les graines d'*Atriplex* (*Atriplex canescens*).

#### B- Semis en alvéole :

Les graines sont semées soigneusement dans des alvéoles pour la production des plantules. Le substrat contenu dans les alvéoles est constitué de tourbe industrielle « Terreau » à raison 1 plant/alvéole puis irrigué à l'eau de distillée une fois tous les deux jours (figure8).



Figure 8 : Semis en alvéole.

**C- Repiquage :**

Après 25 jours de germination, et au stade 6 feuilles, les plantules ont été repiquées en raison d'un plant par cylindre, dans des cylindres ont 50 cm de hauteur et 20 cm de diamètre (figure 9). Ils sont tapissés au fond par du gravier pour assurer le drainage suivi par un remplissage d'un substrat constitué d'un mélange de sable et de Terreau (2V/V) remplis à raison un plant/cylindre.

Elles sont ensuite mises en culture pendant 90 jours dans les mêmes conditions que pour la germination.



**Figure 9 :** Repiquage.

**D- L'arrosage :**

La nutrition hydrominérale des plantes est assurée par l'arrosage fait trois fois par semaine à l'eau de distillé substituée une fois sur trois par une solution nutritive équilibrée de **Hoagland (1938)** jusqu'à l'obtention d'un matériel végétal suffisant pour à concurrence de 500 ml/cylindres. Ce qui correspond à la capacité au champ (c.c).

**Tableau 6 :** Composition de la solution nutritive de **Hoagland (1938)**.

Solution mère	Poids g.l <sup>-1</sup>	Mole.l <sup>-1</sup>
<b>Macroéléments</b>		
KNO <sub>3</sub>	191.90	1.90
(NO <sub>3</sub> )Ca, 4H <sub>2</sub> O	129.80	0.55
NO <sub>3</sub> NH <sub>4</sub>	210.00	0.26
S <sub>0</sub> <sub>4</sub> Mg, 7H <sub>2</sub> O	61.50	0.25
P <sub>0</sub> <sub>4</sub> H <sub>2</sub> K	54.40	0.40
PC>4K <sub>2</sub> H, 3H <sub>2</sub> O	34.23	0.15
<b>Oligoéléments</b>		
Cl <sub>2</sub> Mn, 4H <sub>2</sub> O	1.80	
CuSO <sub>4</sub> , 7H <sub>2</sub> O	0.176	
ZnSO <sub>4</sub> , 7H <sub>2</sub> O	0.219	
BO <sub>4</sub> H <sub>3</sub>	2.861	
MO <sub>7</sub> O <sub>2</sub> 4(NH <sub>4</sub> ), 4H <sub>2</sub> O	0.285	
EDTA ferrique (C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> FeNaO <sub>8</sub> )	0.05	

### 3.2. Application de stress :

Après 60 jours de 16/02/2017 jusqu'au 16/04/2017 le stress métallique est appliqué pendant deux semaines et le tableau suivant explique les différentes doses du stress appliqué (Tableau 7).

**Tableau 7 :** Différentes dose du stress métallique.

Stress appliqué	Concentration en ppm
Cuivre	2000ppm -2500ppm - 3000ppm -3500ppm
Plomb	2500ppm -5000ppm -7500ppm -10000ppm
Zinc	2500ppm -5000ppm -7500ppm -10000ppm
Cadmium	2500ppm -5000ppm -7500ppm -10000ppm



Figure 10 : Application du stress

### 3-3 Prélèvement et préparation du matériel végétal pour les analyses :

Après deux semaines de l'application du stress, les plantes de l'espèce sont prélevées. Les feuilles et les racines sont séparées, ces dernières ont été rincées soigneusement à l'eau du robinet pour éliminer les traces du substrat. Chaque organe a été enveloppé dans du papier aluminium et amené au laboratoire de biodiversité et conservation des eaux et des sols à l'université d'Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem.

#### 4- Paramètres étudiés :

##### 4-1 Paramètres morphologique :

Dans cette étude, nous avons noté les changements ou les anomalies morphologiques qui ont touché l'aspect extérieur de la plante.

- La longueur de la tige et la racine principale en centimètre (cm).
- La surface foliaire (SF) est déterminée par la méthodes **Clarke et Mc Caig (1982), Jaradat et Konzak (1983), Clarke et Townely-Smith (1986) et (Clarke et al., 1989)**. Elle est basée sur la détermination du taux de déperdition d'eau dans des feuilles excisées, appelée pour cette raison par **(Clarke et Richards, 1988 in Benchallel, 1994)** « La transpiration résiduelle » et par **(Mushow et Sinclair, 1989 in Benchallel, 1994)**.
- La biomasse sèche aérienne (BSA) et racinaire (BSR), exprimée en gramme a été effectuée par pesée de la matière sèche après étuvage à 85° C de la matière fraîche pendant 48h.

- Rapport de la longueur de la partie aérienne, racinaire et longueur de la racine/longueur de la tige (LR/LT) et celui en biomasse : biomasse sèche racinaire/biomasse sèche aérienne (BSR/BSA) ont été déduits à partir des valeurs moyennes des longueurs et des poids de la matière sèche.

#### 4-2 Dosage de la chlorophylle :

L'extraction de la chlorophylle **a** et **b** est réalisée selon la méthode de **Lichtenthaler (1987) et Shabalaet al.,1998)** et au niveau de l'avant dernière feuille.

Les teneurs de la chlorophylle **ont**, de la chlorophylle **b** et les chlorophylles totales sont calculées par les formules suivantes :

$$\text{Chl a} = 9,784 \times \text{Do (662)} - 0,99 \times \text{Do (664)}.$$

$$\text{Chl b} = 21,42 \times \text{Do (664)} - 4,65 \times \text{Do (662)}.$$

$$\text{Chlorophylle totale} = \text{Chl a} + \text{Chlo b}.$$

Les analyses statistiques :

L'étude de comportement morphologique et la synthèse de chlorophylle de *Atriplex canescens* se fait par le logiciel de statbox version (6. 40), pour la détermination de l'effet de stress métallique appliqué sur cette espèce.

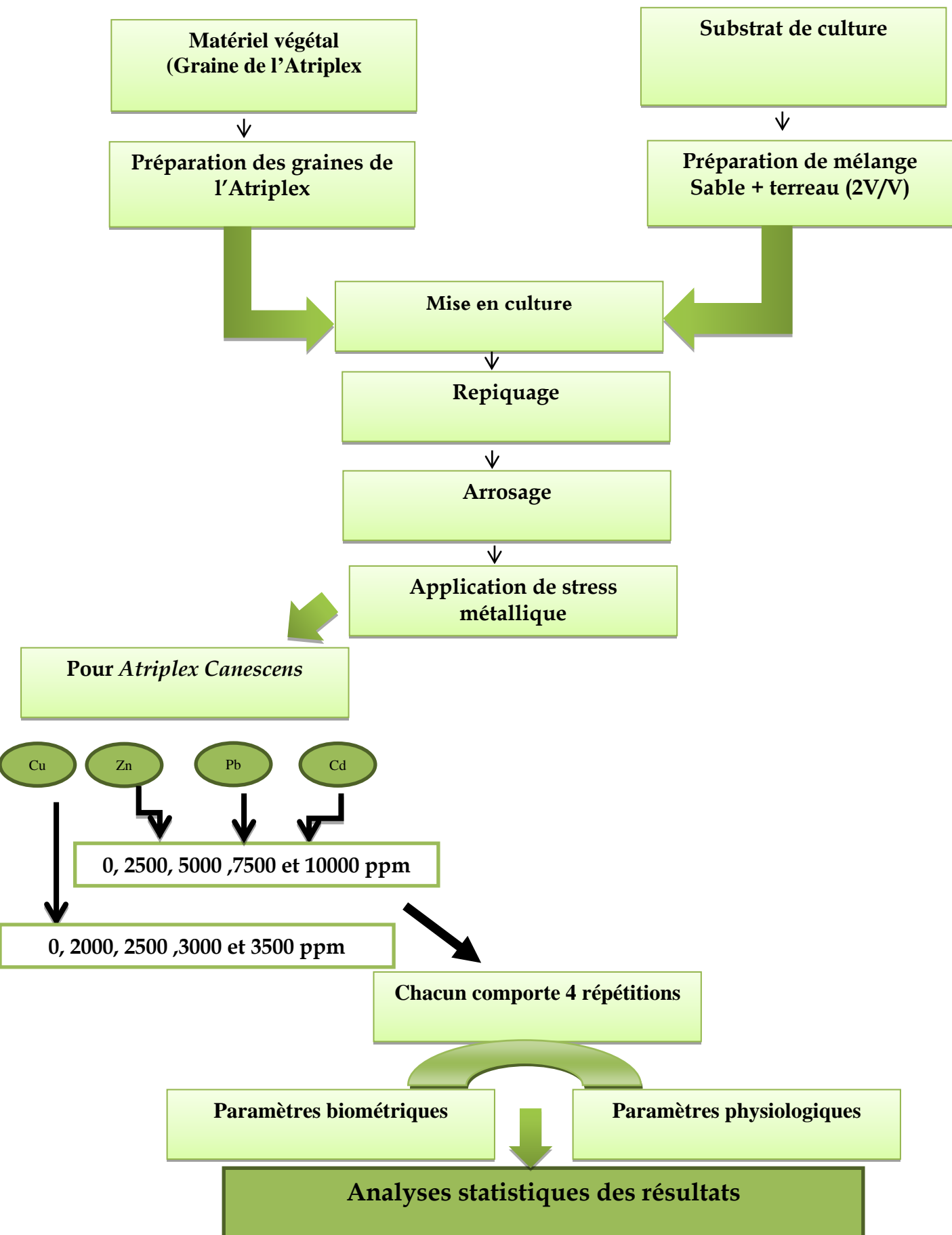


Figure 11 : Le protocole de travail expérimental

Résultats  
Et  
discussions

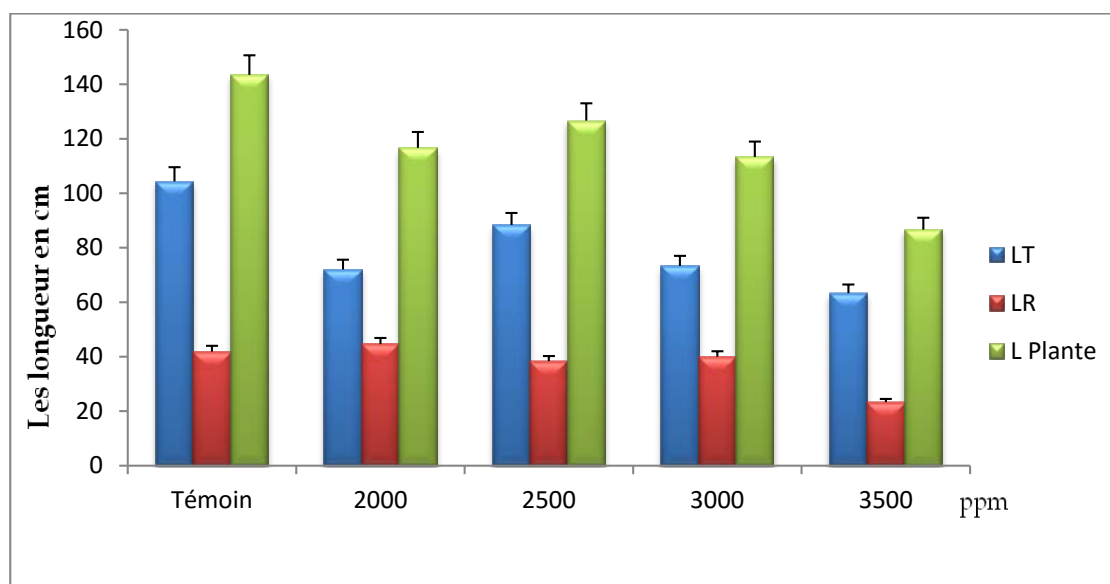
**I-Paramètres biométriques :** les résultats ont été obtenus à l'aide de logiciel stat box 6.40

**1 - Effet des métaux lourds sur la longueur des tiges, des racines, et de la plante entière :**

**1 -1 Effet de cuivre sur la longueur des tiges, des racines, et de la plante entière**

Les résultats obtenus (figure 12) montrent une diminution importante de la longueur de tiges, des racines, et de la plante entière des plantes stressées par le cuivre par rapport à la plante témoin.

On note également une chute de la longueur des tiges de 72 cm à 2500ppm jusqu' au 63,33cm à 3500ppm, chez les racines la diminution est de 44.66 cm à 2500ppm.



**Figure12 :** Effet de cuivre sur la longueur des tiges, des racines, et de la plante entière chez l'*Atriplex canescens*.

**Tableau 8 :** Analyse statistique de la longueur de l'*Atriplex canescens* (cm) sous l'effet de cuivre.

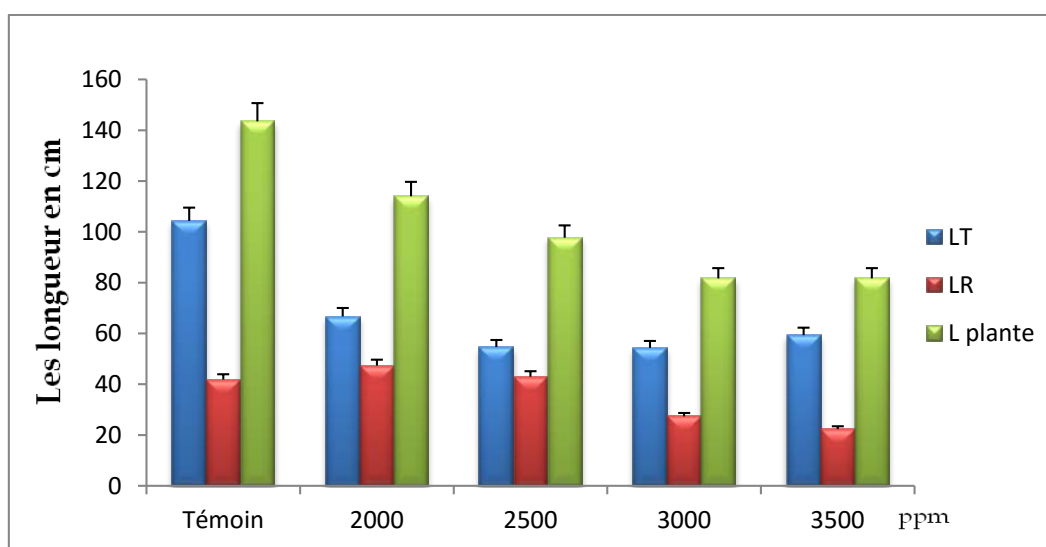
	Témoin	2000ppm	2500ppm	3000ppm	3500ppm
<b>LT</b>	104,33± 8,38	72±15,87	88,33±7,63	73,33± 5,77	63,33±15,27
<b>LR</b>	41,83± 2,75	44.66±8,08	38.33 ± 7,63	40±0	23.33 ±5,77

LP	143,50±11,32	116.66±15,27	126.66±15,27	113.33±5,77	86.66±11,54
----	--------------	--------------	--------------	-------------	-------------

L'analyse statistique à l'aide du test de Newman-keuls à P = 5% montre un effet hautement significatif (P = 0.00) du cuivre sur la longueur des tiges, des racines, et de la plante entière de l'*Atriplex canescens*.

### 1-2 - Effet de plomb sur la longueur des tiges, des racines, et de la plante entière :

Les résultats obtenus (figure 13) montrent que la longueur des tiges (Les tiges : 66, 66 cm à 2500ppm jusqu'à 59,33 cm à 10000ppm), des racines (Les racines : 47,33 cm à 2500ppm jusqu'à 22,33 cm à 10000ppm) et de la plante entière diminuent au fur et à mesure que la dose du plomb appliquée augmente.



**Figure 13 :** Effet du plomb sur la longueur des tiges, des racines, et de la plante entière chez l'*Atriplex canescens*.

**Tableau 9 :** Analyse statistique à l'aide de test de Newman-keuls

La longueur des tiges, des racines, et de la plante entière chez l'*Atriplex canescens* sous l'effet du plomb.

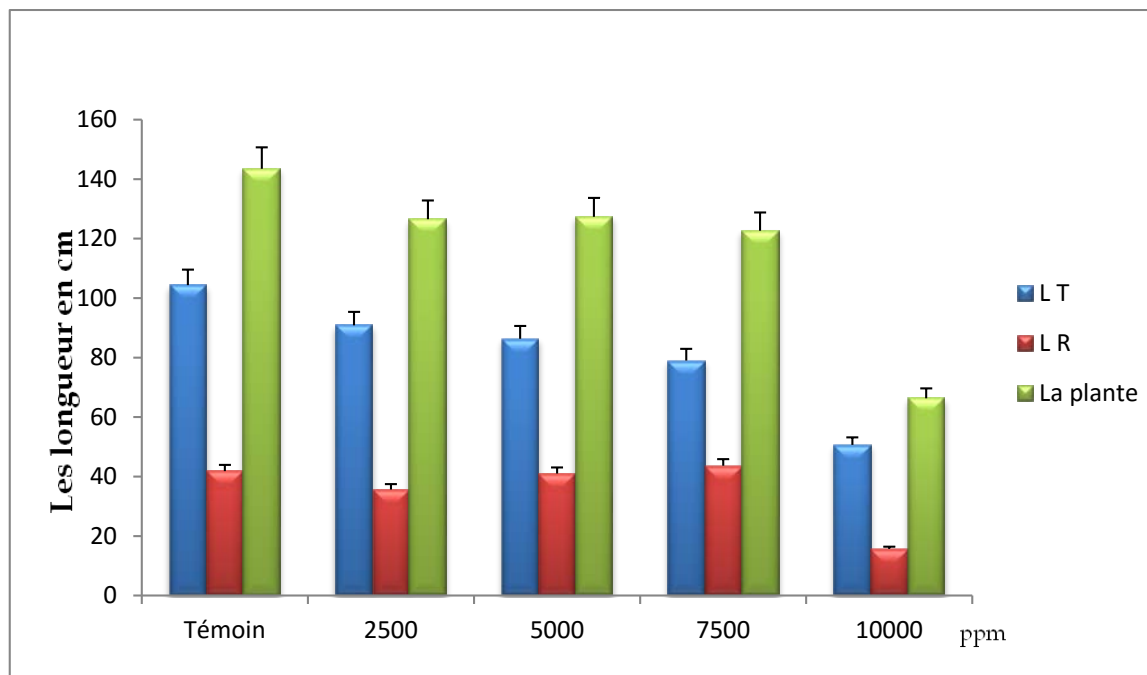
	Témoin	2500ppm	5000ppm	7500ppm	10000ppm
LT	104,33± 8,38	66,67±5,77	54,66±5,03	54,33± 25,02	59,33±11,01
LR	41,83± 2,75	47,33±2,30	43± 2,64	27,33±12,50	22,33±15,37
LP	143,5±11,32	114±7,21	97,66±2,64	81,66±37,52	81,66±25,65

L'analyse de la variance montre un effet hautement significatif du Plomb sur la longueur des tiges par rapport au témoin. Elle est significative chez les racines et la plante entière.

### 1-3 Effet de zinc sur la longueur des tiges, des racines, et de la plante entière chez *Atriplex canescens* :

La longueur des racines, des tiges et de la plante entière chez *Atriplex canescens* stressée par le zinc diminue considérablement par rapport au témoin.

La longueur des tiges des plantes stressées à 2500, 5000, 7500 et 10000 ppm est largement inférieure (90.83, 86.33, 79 et 50.66 cm) en comparaison avec le témoin (104.33 cm). On note une diminution plus importante de la longueur des racines des plantes traitées à 2500, 5000 et 10000 ppm (35.66, 41, 15.66 cm) par rapport au témoin (41.83 cm). La longueur de la plante entière diminue au fur et à mesure avec la dose du zinc appliquée à la plante, elle passe de 126.5 cm sous le traitement à 2500 ppm à 66.33 cm sous le traitement à 10000 ppm.



**Figure 14 :** Effet de zinc sur la longueur des tiges, des racines, et de la plante entière chez *Atriplex canescens*.

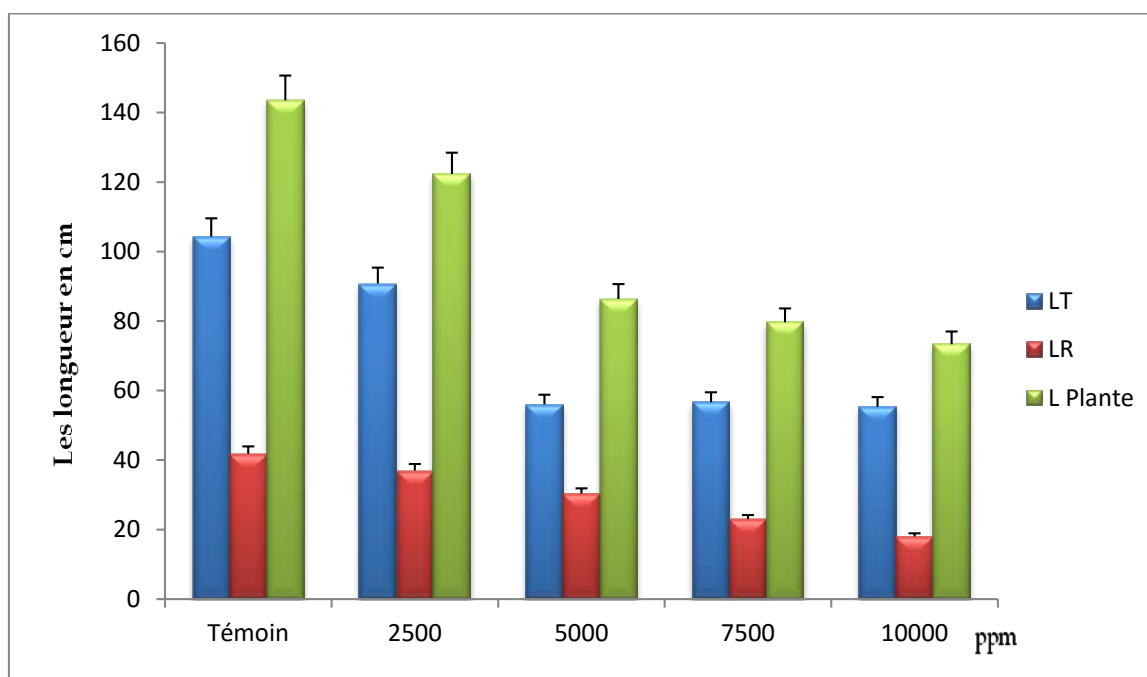
**Tableau10** : Analyse statistique à l'aide de test de Newman-keuls de la longueur des tiges, des racines et de la plante entière chez l'*Atriplex canescens*(cm) sous l'effet de zinc.

	Témoin	2500ppm	5000ppm	7500ppm	10000ppm
<b>LT</b>	104,33± 8,38	90,83±3,32	86,33±25,54	79± 17,39	50,66±8,32
<b>LR</b>	41,83± 2,75	35,66±16,81	41± 1,73	43,67±10,07	15,66±3,78
<b>LP</b>	143,5±11,32	126,5±14,77	127,33±27,00	122,67±22,19	66,33±12,09

L'analyse statistique à l'aide de test de Newman-keuls montre un effet hautement significatif du Zn sur la longueur des tiges, des racines et de la plante entière chez l'*Atriplex canescens*.

#### 1-4 Effet de cadmium sur la longueur des tiges, des racines et de la plante entière chez l'*Atriplex canescens* :

Selon la figure 15, la longueur des tiges, des racines et de la plante entière diminue au fur et à mesure avec l'augmentation de la concentration de cadmium.



**Figure 15** : Effet de cadmium sur la longueur des tiges, des racines, et de la plante entière chez l'*Atriplex canescens*.

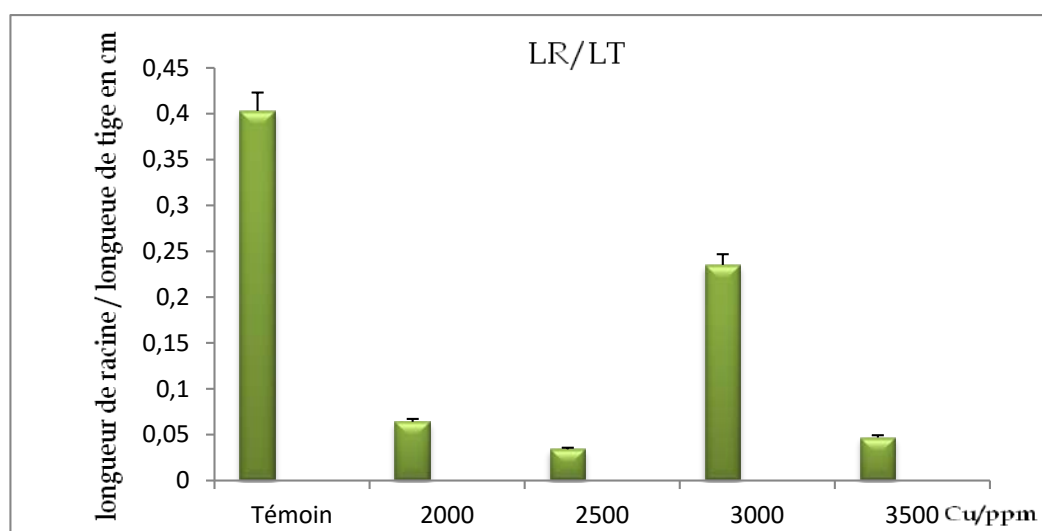
**Tableau 11** : Analyse statistique à l'aide de test Newman-keuls de la longueur de l'*Atriplex canescens*(cm) sous l'effet de cadmium.

	Témoin	2500ppm	5000ppm	7500ppm	10000ppm
LT	104,33± 8,36	86,33±10.97	56±13.528	56.66± 15.01	55.33±32.25
LR	41,83± 2,75	37±7.211	30.33± 17.78	23±8.54	18±14.73
LP	143,5±11,32	123.33±7.63	86.33±30.55	79.66±16.50	73.33±45.09

L'analyse de variance montre un effet significatif sur la longueur des tiges et la plante entière et non significatif sur la longueur des racines.

**2 - Effet de stress métallique sur Le rapport en longueur : longueur des racines/longueur des tiges (LR/LT) :**

**2-1- le cuivre :**



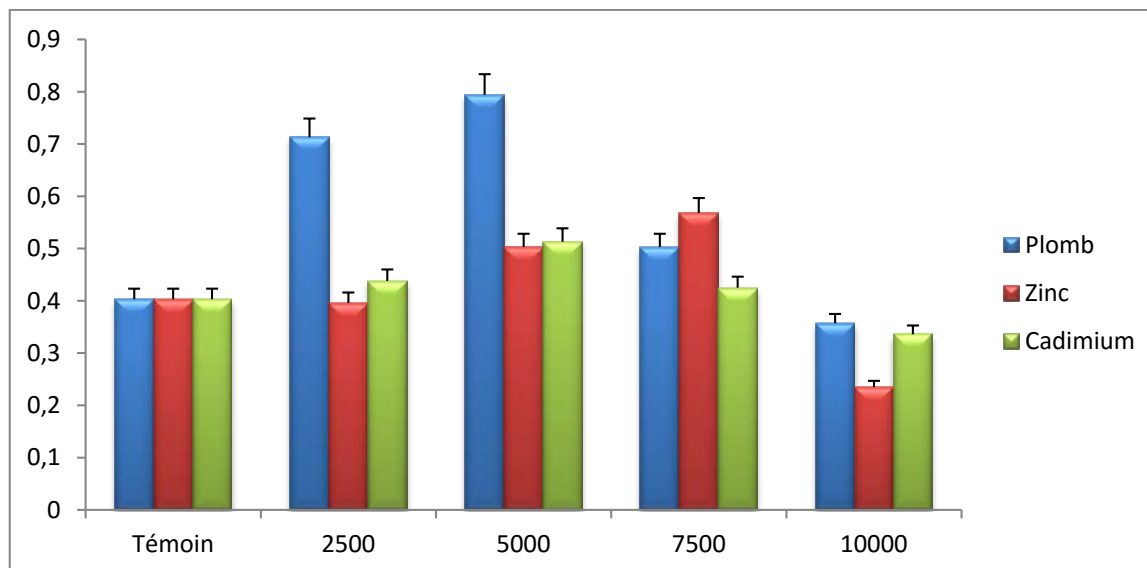
**Figure 16** : Rapport longueur des racines/longueur des tiges(LR/LT) (en cm) de l'*Atriplex canescens*.

**Tableau 12** : Analyse statistique à l'aide de test Newman-keuls du rapport LR/LT en cm de l'*Atriplex canescens*.

Treatment de Cu	Témoin	2000ppm	2500ppm	3000ppm	3500ppm
LR/LT (cm)	0,40 ± 0,05	0,06±0,18	0,03±0,05	0,23±0,04	0,04 ± 0,18

L'étude statistique a montré que l'effet de cuivre sur le rapport LR/LT est non significatives  $p > 0.05$ .

## 2-2- Sous stress de Pb, Zn, Cd :



**Figure 17 :** la variation du rapport de longueur des racines/longueur des tiges LR/LT (en cm) de l'*Atriplex canescens*.

**Tableau 13 :** Analyse statistique à l'aide de test de Newman-keuls du rapport LR/LT en cm de l'*Atriplex canescens*.

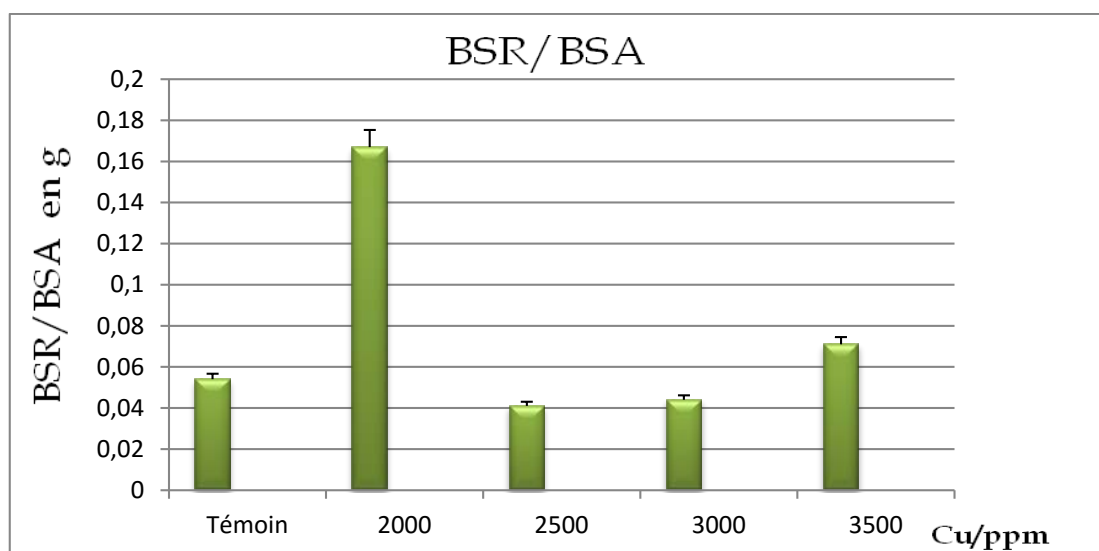
	Témoin	2500ppm	5000ppm	7500ppm	10000ppm
Plomb	0,40±0,05	0,71±0,05	0,79±0,11	0,50±0,00	0,35±0,18
Zinc	0,40±0,05	0,39±0,19	0,50±0,14	0,56±0,148	0,23±0,10
Cadimium	0,40±0,05	0,43±0,12	0,51±0,24	0,42±0,20	0,33±0,14

L'étude statistique à l'aide du test de Newman-keuls nous a montré que l'effet du stress de Pb sur le rapport LR/LT de la plante est hautement significatif ( $p = 0.001$ ), par contre l'effet du stress de Zn et Cd sur les rapports étudiés est non significatif.

## 3 - Effet du stress métallique sur le rapport : biomasse sèche racinaire/biomasse sèche aérienne (BSR/BSA) :

### 2-1- Sous stress de cuivre :

L'effet du cuivre sur le rapport BSR/BSA a montré une diminution remarquable de 0,16 g à 2500ppm jusqu'à 0,07 g à 3500ppm.



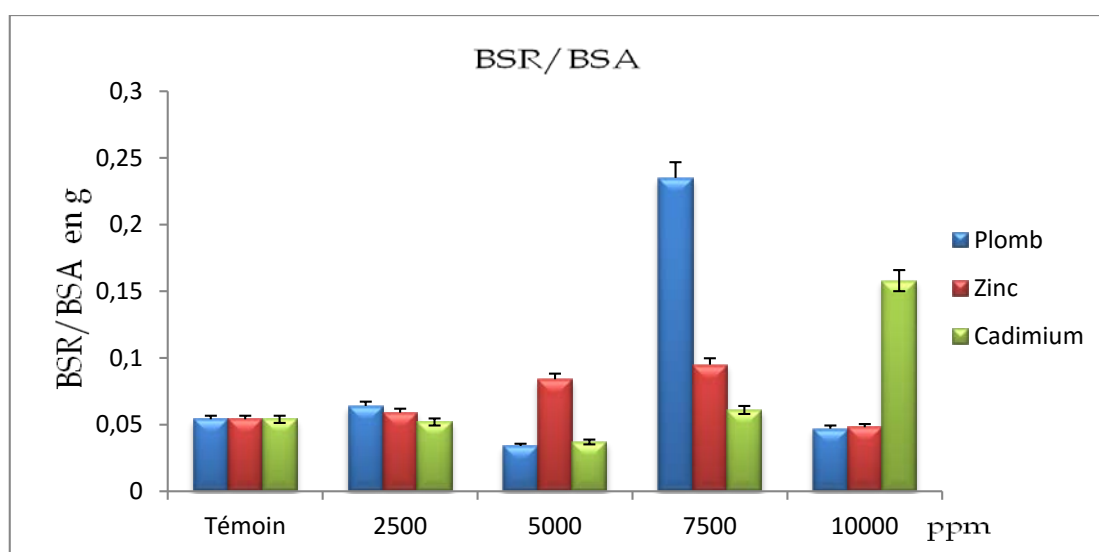
**Figure 18 :** Variation de rapport de la biomasse sèche racinaire/biomasse sèche aérienne (BSR/BSA en (g)) de *Atriplex canescens*.

**Tableau 14 :** Analyse statistique à l'aide de test de Newman-keuls du rapport BSR/BSA en gramme d'*Atriplex canescens*.

Traitement de Cu	Témoin	2000ppm	2500ppm	3000ppm	3500ppm
BSR/BSA en (g)	0,05±0,01	0,16±0,08	0,04±0,01	0,04±0,008	0,07±0,03

L'étude statistique a montré que l'effet de cuivre sur le rapport BSR/BSR est significatif ( $p= 0.02$ ).

## 2-2- Sous stress de Pb, Zn, Cd :



**Figure19 :** Variation de rapport de la biomasse sèche racinaire/biomasse sèche aérienne (BSR/BSA en (g)) de *Atriplex canescens*.

**Tableau 15 :** Analyse statistique à l'aide de test de Newman-keuls du rapport BSR/BSA en gramme de *Atriplex canescens*.

	Témoin	2500ppm	5000ppm	7500ppm	10000ppm
<b>Plomb</b>	0,05±0,01	0,06±0,006	0,03±0,02	0,23±0,27	0,04±0,03
<b>Zinc</b>	0,05±0,01	0,05±0,02	0,08±0,04	0,09±0,05	0,04±0,02
<b>Cadmium</b>	0,05±0,01	0,05±0,02	0,03±0,001	0,061±,03	0,15±0,04

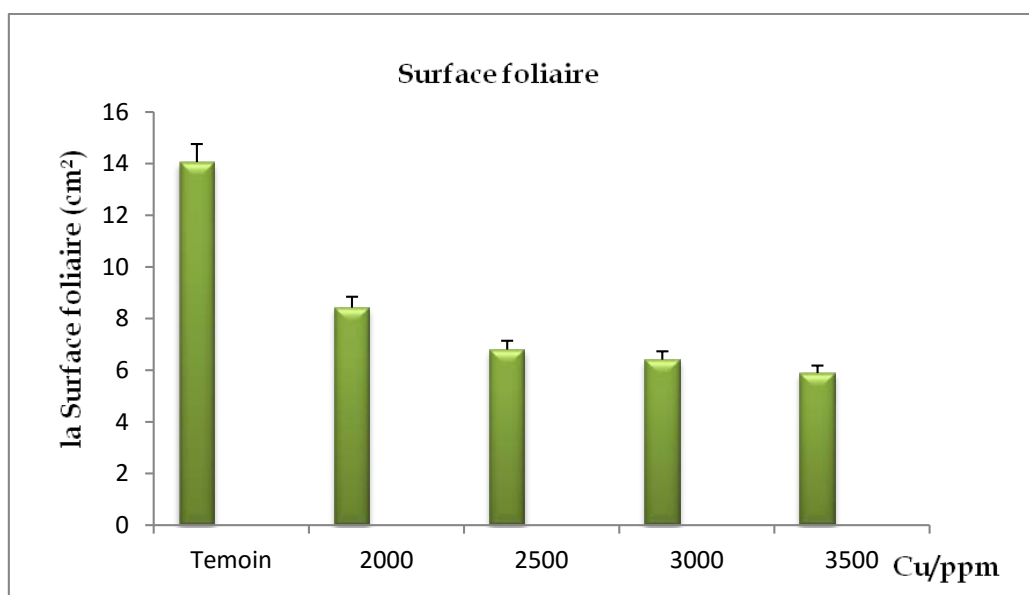
L'étude statistique révèle que l'effet du stress du Pb et du Zn sur le rapport BSR/BSA de la plante est non significatif. Elle est hautement significative pour le cadmium.

### 3-La surface foliaire :

#### 3-1 Sous traitement du Cuivre :

La plante stressée au Cu montre une décroissance de la surface foliaire par rapport à la plante témoin.

Les valeurs moyennes de la surface foliaire obtenues chez les plantes stressées sont inférieures à 10 cm<sup>2</sup> par rapport aux plantes témoins 14,05 cm<sup>2</sup>. La surface foliaire des plantes stressées aux Cu (2500, 3500 ppm) exprime une diminution conséquente de 8.42cm<sup>2</sup> et 5.88cm<sup>2</sup> respectivement par rapport à la plante témoin.



**Figure 20 :** Effet du cuivre sur La surface foliaire de *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt.

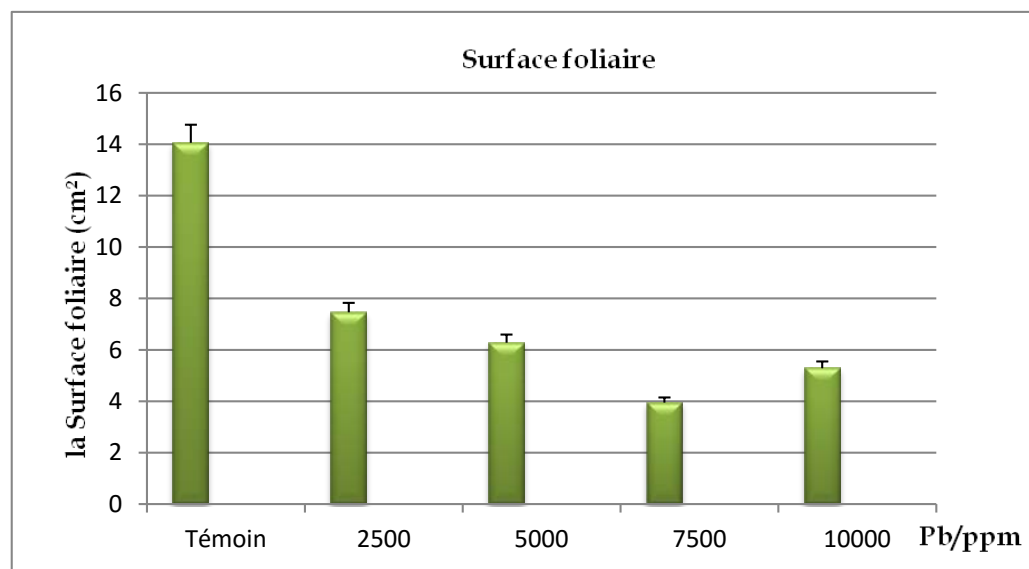
**Tableau 16 :** Analyse de variance à l'aide de test de Newman-Keuls de la surface foliaire de *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt stressée au Cu.

Traitement	Témoin	2000ppm	2500ppm	3000ppm	3500ppm
Surface foliaire (cm <sup>2</sup> )	4,05±1,52	8,42±2,63	6,803±1,26	6,41±1,26	5,88±5,92

L'analyse de la variance montre un effet significatif de la surface foliaire par rapport à la plante témoin dans l'ensemble des traitements aux Cu, ( $P < 0.05$ ).

### 3-2 Sous traitement du Plomb :

Les valeurs moyennes de la surface foliaire mesurées respectivement (7,45, 6,28 ; 3,95 ; 5,28) chez les plantes stressées par le Plomb, montrent une régression par rapport aux plantes témoins.



**Figure 21 :** Effet du plomb sur la surface foliaire de l'*Atriplex canescens* (Pursh) Nutt.

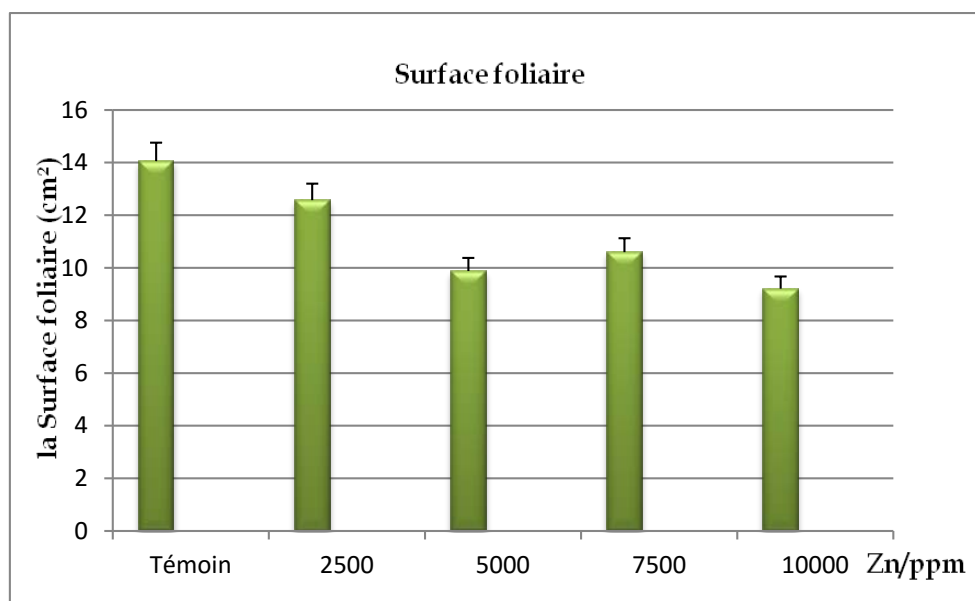
**Tableau 17 :** Analyse de variance à l'aide de test de Newman-Keuls de la surface foliaire de l'*Atriplex canescens* (Pursh) Nutt stressée au Pb.

Traitement	Témoin	2500ppm	5000ppm	7500ppm	10000ppm
Surface foliaire(cm <sup>2</sup> )	14,05±1,52	7,45±3,35	6,28±0,78	3,95±2,01	5,28±1,54

L'analyse de la variance présente un effet hautement significatif du plomb sur la surface foliaire par rapport à la plante témoin (P=0.01).

### 3-3 Sous traitement du Zinc :

Les résultats obtenus montrent une réduction de la surface foliaire de la plante par rapport au témoin.



**Figure 22 :** La surface foliaire de l'*Atriplex canescens* (Pursh) Nutt stressée au Zn.

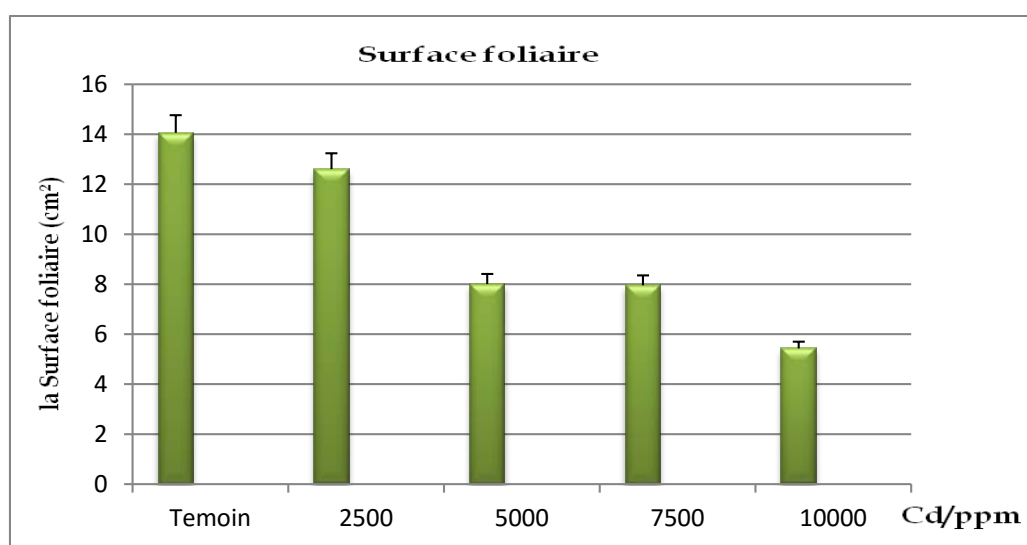
**Tableau 18 :** Analyse de variance à l'aide de test Newman-Keuls de la surface foliaire des plantes de l'*Atriplex canescens* (Pursh) Nutt stressée au Zn.

Traitement	Témoin	2500ppm	5000ppm	7500ppm	10000ppm
Surface foliaire(cm <sup>2</sup> )	14,05±1,52	12,57±4,25	9,88±3,94	10,59±3,11	9,21±3,25

L'analyse statistique révèle que l'effet du zinc est non significatif sur la surface foliaire de plantes stressées.

### 3-4 Sous traitement du Cadmium :

Les résultats obtenus en figures 23 montrent que les moyennes de la surface foliaire des plantes stressées au Cd sont légèrement au- dessous de la moyenne de plantes témoins 14,07, et leurs valeurs varient entre (12,66 ; 8,00 ; 7,95 et 5,43 cm<sup>2</sup>) respectivement.



**Figure 23 :** Effet du cadmium sur La surface foliaire de l'*Atriplex canescens*

**Tableau 19 :** Analyse de variance de la surface foliaire des plantes de l'*Atriplex canescens* (Pursh) Nutt stressée au Cd.

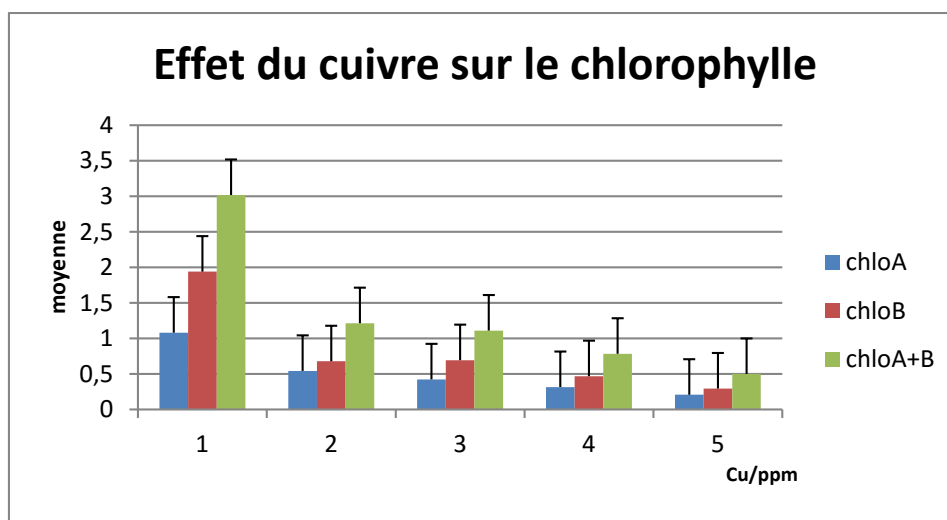
	Témoin	2500ppm	5000ppm	7500ppm	10000ppm
<b>S.F (cm<sup>2</sup>)</b>	14,05±1,52	12,60±2,62	8,007±3,29	7,95±1,55	5,43 ±1,04

L'analyse statistique montre un effet hautement significatif du cadmium sur la surface foliaire des plantes (2500, 5000, 7500, 10000 ppm).

## II -Synthèse de chlorophylle :

### II-1Effet du cuivre sur la chlorophylle a, b, a+b

La présence du cuivre dans le milieu a diminué la teneur en chlorophylle **a** jusqu'à une valeur moyenne de 0,28 mg. G<sup>-1</sup> de PF obtenue par un traitement de 3500ppm par rapport au témoin (1,08mg.g<sup>-1</sup> de PF). On note également une diminution de la teneur en chlorophylle (b) jusqu'à une valeur moyenne de 0,29mg.g<sup>-1</sup> de PF obtenue par un traitement de 3500ppm.



**Figure24** : Variation des teneurs en chlorophylles a, b et totales (mg. G<sup>-1</sup> de PF) dans les feuilles d'*Atriplex canescens* stressée au cuivre.

**Tableau 20** : Analyse de la variance à l'aide de test de Newmen-Keuls de l'effet du cuivre sur la teneur en chlorophylle a.

Traitement en Cu	Témoin	2000ppm	2500ppm	3000ppm	3500ppm
Chl a	1,08±0,03	0,54±0,01	0,42±0,01	0,31±0,03	0,208±0,03

L'analyse de la variance montre une différence très hautement significative de la teneur en chlorophylle a(p=0).

**Tableau 21** : Analyse de la variance à l'aide de test Newmen-Keuls de l'effet du cuivre sur la teneur en chlorophylle b.

Traitement en Cu	Témoin	2000ppm	2500ppm	3000ppm	3500ppm
Chl b	1,94±0,09	0,67±0,10	0,69±0,13	0,46±0,02	0,29±0,02

Le test montre un effet hautement significatif des traitements appliqués sur la teneur en chlorophylle b chez *Atriplex canescens*.

**Tableau 22** : Analyse de la variance à l'aide de test de Newman-Keuls de l'effet du cuivre sur la teneur en chlorophylle a+b.

Traitement en Cu	Témoin	2000ppm	2500ppm	3000ppm	3500ppm
<b>Chla+b</b>	3,01±0,12	1,21±0,09	1,11±0,12	0,78±0,01	0,50±0,05

Selon l'analyse statistique du tableau, la teneur en chlorophylle montre que les valeurs obtenues sont hautement significatives.

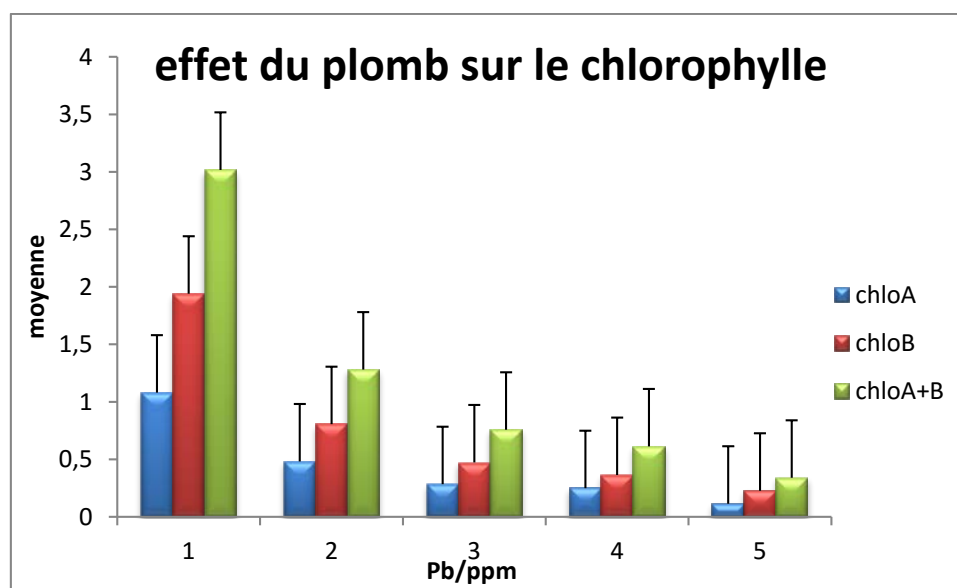
### II-2 Effet du plomb sur la chlorophylle a, b, a+b.

Les résultats obtenus montrent que le plomb influe négativement sur la teneur en chlorophylle (a), chlorophylle (b) et chlorophylle (a+b) chez *Atriplex canescens*.

La moyenne la plus élevée de la teneur en chlorophylle (a) est enregistrée pour le témoin chez *A. canescens*. La présence du plomb dans le milieu diminue la teneur en chlorophylle (a) jusqu'à une valeur moyenne de 0,11mg.g<sup>-1</sup> de PF obtenue par un traitement de 10000ppm alors, le stress cause la baisse de la teneur en chlorophylle (a) par rapport au témoin, 08mg.g<sup>-1</sup> de PF.

La présence du plomb dans le milieu diminue la teneur en chlorophylle (b) jusqu'à une valeur moyenne de 0,22mg.g<sup>-1</sup> de PF obtenue par un traitement de 10000ppm alors, le stress cause la baisse de la teneur en chlorophylle (b) par rapport au témoin 1,94mg.g<sup>-1</sup> de PF.

Le stress plomb a causé une baisse de la teneur en chlorophylle (a+b) de 3,01mg.g<sup>-1</sup> de PF au témoin jusqu'à 0,34mg.g<sup>-1</sup> de PF au dernier dose 10000ppm.



**Figure 25 :** Variation des teneurs en chlorophylles a, b et totales (mg. G<sup>-1</sup> de PF) dans les feuilles d'*Atriplex canescens* stressée au plomb.

**Tableau 23 :** Analyse de la variance de l'effet du plomb sur la teneur en chlorophylle a.

Traitement	Témoin	2500ppm	5000ppm	7500ppm	10000ppm
<b>Chl a</b>	1,08±0,03	0,48±0,01	0,28±0,01	0,24±0,07	0,11±0,02

L'analyse de la variance montre une différence très hautement significative de moyennes ( $p=0$ ) pour la teneur en chlorophylle a.

**Tableau 24 :** Analyse de la variance à l'aide de test de Newman-Keuls de l'effet du plomb sur la teneur en chlorophylle b.

traitement	Témoin	2500ppm	5000ppm	7500ppm	10000ppm
<b>Chl b</b>	1,94±0,09	0,80±0,11	0,47±0,06	0,36±0,03	0,22±0,036

L'analyse de la variance montre une différence hautement significative, de teneurs ( $p=0$ ) pour la teneur en chlorophylle b.

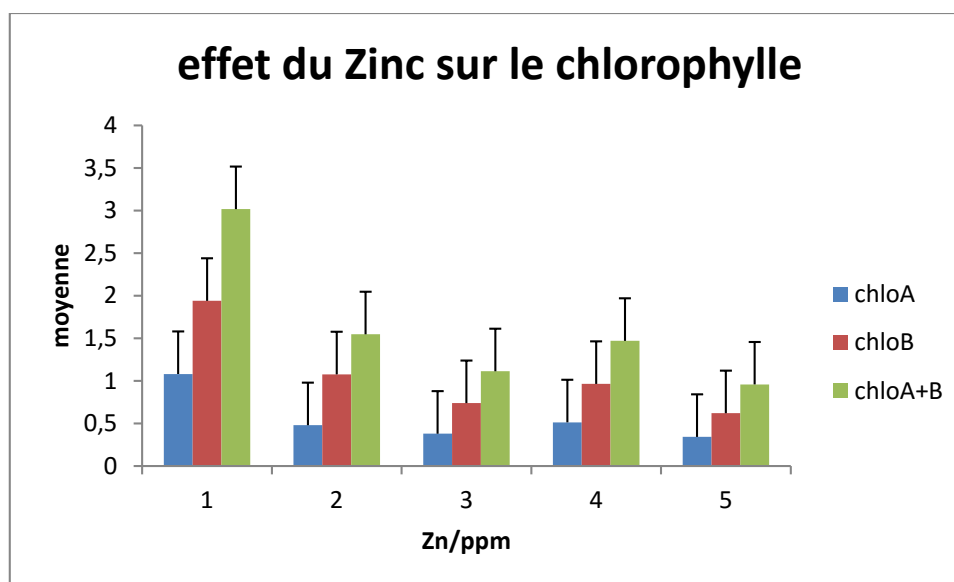
**Tableau 25** : Analyse de la variance à l'aide de test Newman-Keuls de la moyenne de l'effet du plomb sur la teneur en chlorophylle a+b.

Traitement	Témoin	2500ppm	5000ppm	7500ppm	10000ppm
Chla+b	3,01±0,12	1,28±0,10	0,75±0,08	0,61±0,05	0,34±0,03

### II-3 Effet du Zinc sur la chlorophylle a, b, a+b.

La teneur la plus élevée de la teneur en chlorophylle (a) est enregistrée pour le témoin chez *Atriplex canescens* (1,08mg.g<sup>-1</sup> de PF), cette teneur diminue jusqu'à 0,34mg.g<sup>-1</sup> de PF pour la dose 10000ppm.

La présence du zinc dans le milieu diminue la teneur en chlorophylle (b) jusqu'à une valeur moyenne de 0,62mg.g<sup>-1</sup> de PF obtenue par un traitement de 10000ppm, il faut noter également que l'application du stress a causé une baisse en teneur de la chlorophylle (b) par rapport au témoin (1,94mg.g<sup>-1</sup> de PF). On enregistre une diminution de la teneur en chlorophylle (a+b).



**Figure 26** : Variation des teneurs en chlorophylles a, b et totales (mg. G<sup>-1</sup> de PF) dans les feuilles d'*Atriplex canescens* stressée au zinc.

**Tableau 26** : Analyse de la variance de l'effet du Zn sur la teneur en chlorophylle a.

Traitement	Témoin	2500ppm	5000ppm	7500ppm	10000ppm
<b>Chl a</b>	1.08±0.03	0.47±0,03	0.37±0,02	0,51±0,03	0,34±0,02

L'analyse de la variance montre une différence très hautement significative ( $p=0$ ) pour la teneur en chlorophylle a.

**Tableau 27** : Analyse de la variance à l'aide de test Newman-Keuls de l'effet du zinc sur la teneur en chlorophylle b.

Traitement	Témoin	2500ppm	5000ppm	7500ppm	10000ppm
<b>Chl b</b>	1.94±0.09	1.07±0.12	0.73±0.10	0.96±0.11	0.62±0.05

L'analyse de la variance montre une différence hautement significative pour la teneur en chlorophylle b.

**Tableau 28** : Analyse de la variance à l'aide de test Newman-Keuls de l'effet du zinc sur la teneur en chlorophylle a+b.

Traitement	Témoin	2500ppm	5000ppm	7500ppm	10000ppm
<b>Chla+b</b>	3.07±0.12	1.57±0.1	1.13±0.11	1.47±0.11	0.97±0.02

L'analyse de la variance montre une différence hautement significative pour la teneur en chlorophylle a+ b.

#### **II-4 Effet du cadmium sur la chlorophylle a, b, a+b**

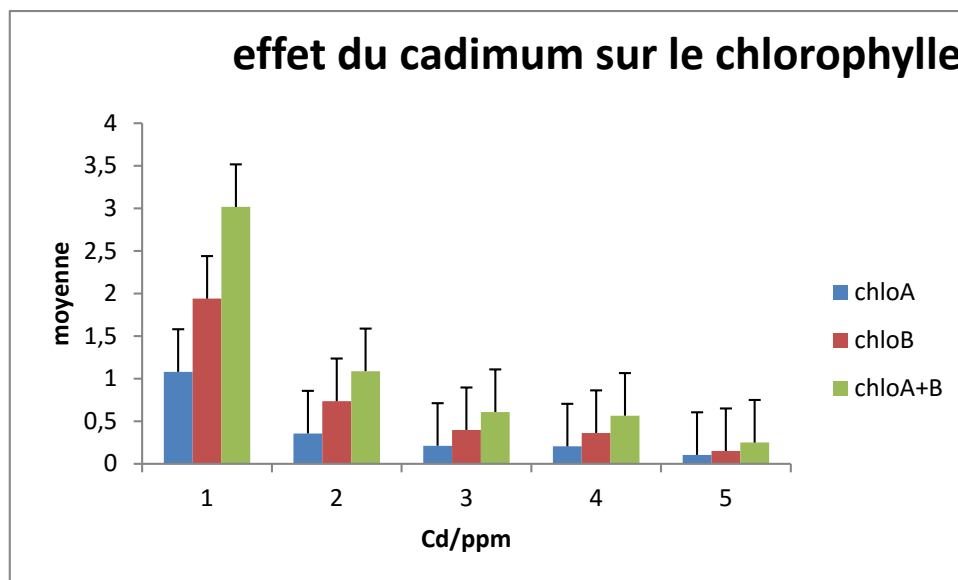
Les résultats obtenus montrent que le cadmium influe sur la teneur en chlorophylle (a), chlorophylle (b) et chlorophylle (a+b) chez l'*Atriplex canescens*.

La présence du cadmium dans le milieu diminue la teneur en chlorophylle (a) jusqu'à une valeur de 0, 10mg.g<sup>-1</sup> de PF obtenue par un traitement de 10000ppm. Le stress au cadmium a fait diminuer la teneur en chlorophylle (a) par rapport témoin (1,08 mg. G<sup>-1</sup> de PF).

La présence du cadmium dans le milieu a diminué la teneur en chlorophylle (b) jusqu'à une valeur moyenne de 0, 15mg.g<sup>-1</sup> de PF obtenue par un traitement de

10000ppm alors, on note une baisse de la teneur en chlorophylle (b) par rapport au témoin (1, 94mg.g<sup>-1</sup> de PF).

La teneur en chlorophylle (a+b) a diminué, elle passe de 3, 01mg.g<sup>-1</sup> de PF chez la plante témoin à 0, 25mg.g<sup>-1</sup> de PF chez la plante stressée à 10000ppm.



**Figure 27 :** Variation des teneurs en chlorophylles a, b et totales (mg. G<sup>-1</sup> de PF) dans les feuilles *d'Atriplex canescens* stressée au cadmium.

**Tableau 29 :** Analyse de la variance à l'aide de test de Newmen-Keuls de l'effet du cadmium sur la teneur en chlorophylle a.

Traitement	Témoin	2500ppm	5000ppm	7500ppm	10000ppm
Chla	1.08±0.032	0.35±0.06	0.21±0.03	0.20±0.03	0.10±0.01

L'analyse de la variance montre une différence très hautement significative de moyennes (p=0) pour la teneur en chlorophylle a.

**Tableau 30 :** Analyse de la variance de l'effet du Cadmium sur la teneur en chlorophylle b.

Traitement	Témoin	2500ppm	5000ppm	7500ppm	10000ppm
Chl b	1.94±0.09	0.73±0.10	0.39±0.09	0.36±0.06	0.15±0.01

L'analyse de la variance à montre une différence hautement significative ( $p=0$ ) pour la teneur en chlorophylle b.

**Tableau 31** : Analyse de la variance à l'aide de test de Newmen-Keuls de l'effet du cadmium sur la teneur en chlorophylle a+b.

Traitement	Témoin	2500ppm	5000ppm	7500ppm	10000ppm
<b>Chla+b</b>	3.01±0.12	1.08±0.16	0.60±0.12	0.56±0.08	0.25±0.02

L'analyse de la variance à montre une différence hautement significative ( $p=0$ ) pour la teneur en chlorophylle a+b.

**Discussion :**

Les résultats obtenus montrent que :

- 1) Pour les paramètres biométriques :
  - a) Une diminution de la surface foliaire dans toutes les plantes stressées aux métaux lourds par rapport aux plantes témoins. Plusieurs travaux ont démontré que lorsque le stress métallique augmente, la transpiration et la surface foliaire diminuent. La transpiration varie en fonction de la surface foliaire, par relation de proportionnalité (**Auge et al., 1986**) les concentrations élevées réduisent fortement la surface foliaire et augmentent la densité stomatique : on en déduit donc que les feuilles de *Atriplex canescens*(Pursh) Nutt ferment généralement leurs stomates lorsque le stress salin s'intensifie pour minimiser les pertes en eau. Une limitation de la surface foliaire et le contrôle de l'ouverture et la fermeture des stomates a été adopté par (**Begg et Turner, 1976 : Blum et al., 1981 : Araus et al., Ievett 2002**). L'excrétion des métaux à la surface des feuilles est sans doute un des moyens qui lui permet de résister au stress métallique. Toutes ces caractéristiques font d'*Atriplex canescens* une plante candidate pour son utilisation dans des stratégies de phytoremédiation (**Manousaki et al., 2008**).
  - b) La croissance racinaire en longueur est indifférente à la contrainte métallique et elle présente une variation significative vis-à-vis le stress métallique, pour les plantes stressées. Les tiges montrent aussi une dégradation remarquable en longueurs.

La réduction du développement des racines et des tiges est due aux effets toxiques des teneurs élevées de stress métallique et au déséquilibre de la disponibilité en nutriment (**Datta et al., 2009**).

En rapprochant tous les traitements ensemble, les résultats indiquent un effet non significatif sur le rapport LR/LT sauf le plomb qui a un effet hautement significatif.

Nos résultats montrent que *Atriplex canescens* résiste au stress métallique en tolérant une concentration élevée des métaux lourds dans le milieu, Chez

l'*Atriplex* étudiée, la partie aérienne est moins résistante aux métaux lourds que la partie racinaire. Ces résultats sont confirmés par des corrélations positives significatives entre la biomasse sèche racinaire et le rapport de biomasse. Ces résultats sont conformes à ceux de **(Araujo et al., 2006)** qui ont étudié l'effet des métaux lourds sur *Atriplex canescens*. Ils ont trouvé que les modifications induites par le stress métallique sur le poids sec sont plus enregistrées pour les feuilles que les racines. Nos résultats montrent que l'appareil racinaire d'*Atriplex canescens* est résistant au stress ;

En comparant les résultats obtenus, il apparaît que les paramètres mesurés peuvent être sujets à des rapports entre eux et de ce fait constituer des outils de compréhension globale sur la manière dont *Atriplex canescens* réagit au stress grâce à différents mécanismes **(Misri et al., 2006)** des biomasses totales des matières fraîches et sèches des parties aérienne et racinaire) a décelé des différences significatives pour les différentes concentrations du stress abiotique **(Benmahioul et al., 2008)**

La réduction de croissance semble associée à une forte accumulation des métaux lourds dans la plante **(Ben Ahmed et al., 2008)**

Le stress métallique est une contrainte majeure qui affecte la croissance et le développement des plantes **(Bouaouina et al., 2000)**.

Pour s'adapter au stress métallique, la plante peut éviter les dommages par la réduction de la croissance **(Yeo, 1983, Zhu, 2002 in Lamzeri, 2007)** : c'est l'effet le plus commun des stress abiotiques sur la physiologie des plantes. La réduction de la croissance est une capacité adaptative nécessaire à la survie d'une plante exposée à un stress abiotique. En effet, ce retard de développement permet à la plante d'accumuler de l'énergie et des ressources pour combattre le stress avant que le déséquilibre entre l'intérieur et l'extérieur de l'organisme n'augmente jusqu'à un seuil ou les dommages seront irréversibles **(Zhu, 2001 in Bois, 2005)**

## 2) La chlorophylle :

a) L'accumulation de la chlorophylle est liée à la teneur du milieu de culture

en métaux lourds.

- b) Les teneurs en chlorophylle baissent en présence de métaux lourds et augmentent à son absence.
- c) La chlorophylle **a** s'accumule moins par rapport au chlorophylle **b**, aussi bien pour les témoins que pour les plantes stressées. Une diminution de la teneur en chlorophylle est observée au niveau des plantes soumises au stress métallique.

Ces résultats sont conformes à, (**Mench et Aulen, 2008**) ont montré pour *Beaupré*. (**Chugh et Sawhney, 1999**), ont été signalés, l'effet de Cu sur la photosynthèse des *Elsholtziasplendens* a été discuté. Il a été suggéré que Cu à basse concentration accrue du contenu de la chlorophylle a, tandis que la hausse concentration de Cu qu'il a diminué. Mais le contenu du chlorophylle b est moins influencé par la haute ou basse concentration de Cu (**Li et al. 2003**)

La diminution du taux de chlorophylle chez les plantes exposées aux métaux lourds est un phénomène très courant et supposé comme étant préliminaire à l'inhibition de la photosynthèse (**Prasad, 1999**). La réduction de la chlorophylle **a** est peut-être liée à la sensibilité d'une des étapes de sa biosynthèse au métaux lourds ; selon (**Tewari et Singh, 1991**), les métaux lourds affectent moins la voie de biosynthèse de la chlorophylle b.

La phytoremédiation constitue une nouvelle approche permettant de dépolluer les sols contaminés par l'utilisation de plantes. Parmi les différents aspects possibles de cette méthode, figure la phytoextraction basée sur l'absorption et l'accumulation du polluant dans les parties aériennes. Pour être efficace, il est nécessaire de disposer de plantes présentant un potentiel adaptatif conséquent et une biomasse élevée (**BADACHE, 2014**).

**Conclusion :**

Cette étude montre que l'espèce de *Atriplex canescens* semble être tolérante aux métaux lourds : le cuivre, le plomb, le zinc, et le cadmium sous ses conditions expérimentales.

Il serait importé de tester la capacité phytoremédiatrice de cette espèce sous d'autre conditions expérimentales en tenant compte de l'âge de la plante car elle répond aux contraintes environnementales de manière différente au cours de son développement. Il serait intéressé de tenir compte de la durée du stress pour mieux valoriser la réponse de la plante, et augmentes les contraintes phytoremédiantes vis-à-vis des sols très pollués.

# Références bibliographiques

## Références bibliographiques :

- **Abbad A. Cherkaoui et al.** (2004). Variabilités phénotypique et génétique de trois populations naturelles d'*Atriplex halimus* (L). Comptes rendus biologie. Vol 327- 380.
- **Adolphe-Auguste Mille et Alfred-Durand Claye.** (1971). La dépollution du sol par les plantes testée en France.
- **Alain Vavasseur, Pierre Richaud, Julie Misson-Pons** (2009). Plantes pour dépolluer ou stabiliser des éléments toxiques dans les sols et les eaux, p 38- 39.
- **Alkorta et al.** (2004) . Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide, 4-31 - In-situ biological treatment/Phytoremediation.
- **Alloway B.J.** (1995) Heavy metals in soils. Londres: Blackie Academic and Professional. 368p.
- **Ann Peer W., et al** (2005) Phytoremediation and hyperaccumulator plants. Topics Curr. Genet, p100.
- **Araujo et al.** (2006). The significance of mycorrhizae.
- **ATSDR** (2008). Mycorrhizae in a Californian serpentine grassland community.
- **Baba Ahmed Abderrazzak**(2012). Etude de contamination et d'accumulation de quelques métaux lourds dans des céréales, des légumes, des sols agricoles irrigués par des eaux usées de la ville de Hammam Boughrara, Thèse de magistère, p56.
- **BADACHE, 2014.** Biochimie végétale, p 56.
- **Baize D** (2009). Eléments traces dans les sols - Fonds géochimiques, fonds pédogéochimiques naturels et teneurs agricoles habituelles - Définitions et utilités.
- **Baize D., Sterckeman T.** (2001). The necessity of knowledge of the natural pedogeochemical background content in the evaluation of the contamination of soils by trace elements, p 127.

- **Baize et T. Sterckeman. (1997).** Importance de la détermination du fond pédogéochimique pour évaluer la pollution des sols par des métaux. L'exemple du site de Dornach. Rencontre nationale de la recherche sur les sites et sols pollués. Paris. ADEME, p6.
- **Baker A.J.M et Brooks R.R (1989).** Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements. A review of their distribution, ecology and phytochemistry. *Biorecovery*.
- **Baker A.J.M., Reeves R.D., Hajar A.S.M. (1994)** Heavy metal accumulation and tolerance in British populations of the metallophyte *Thlaspi caerulescens* J. et C. Presl (Brassicaceae). *New Phytol*, p 68.
- **Ben Ahmed et al., 2008)** Potentialités d'utilisation stratégique des plantes des genres *Atriplex* et *opuntia* dans la lutte contre la désertification.
- **Benchallel, 1994)** Quelques aspects de la tolérance de *l'Atriplex halimus* L. au chlorure de sodium: multiplication, croissance, composition minérale. *Oecol. Plant.*, p 35.
- **Boyd, 1998** Daily and seasonal patterns of leaf water relations and gas exchange of regulated deficit-irrigated almond trees under semiarid conditions. *Environment and Experimental Botany* p56.
- **Brandie J. R. (1987).** Windbreaks and crop production. SAF National Convention, Minneapolis (USA), p18.
- **Briat J-F., Lebrum M. (1999)** Plant responses to metal toxicity. *Plant Biol Pathol.* 322: 43-54.
- **Brooks, R S (1998).** Hyperaccumulation as a plant defensive strategy, p 181.
- **Chaignon V (2001).** Biodisponibilité du cuivre dans la rhizosphère de différentes plantes cultivées - Cas de sols viticoles contaminés par des fongicides, p173.
- **Chaudhry T.M., Hayes W.J., Khan A.G., Khoo C.S. (1998)** Phytoremediation - Focusing on accumulator plants that remediate metal-contaminated soils. *Austral.J. of Ecotoxicol*, p 37.
- **Chedly Abdelly (2007).** Bioremédiation / Phytoremédiation.
- **Choukr Allah R., Hamdy A., Lahmer F.Z. (1997).** Germination *d'A triplex*

- **Baize et T. Sterckeman. (1997).** Importance de la détermination du fond pédogéochimique pour évaluer la pollution des sols par des métaux. L'exemple du site de Dornach. Rencontre nationale de la recherche sur les sites et sols pollués. Paris. ADEME, p6.
- **Baker A.J.M et Brooks R.R (1989).** Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements. A review of their distribution, ecology and phytochemistry. *Biorecovery*.
- **Baker A.J.M., Reeves R.D., Hajar A.S.M. (1994)** Heavy metal accumulation and tolerance in British populations of the metallophyte *Thlaspi caerulescens* J. et C. Presl (Brassicaceae). *New Phytol*, p 68.
- **Ben Ahmed et al., 2008)** Potentialités d'utilisation stratégique des plantes des genres *Atriplex* et *opuntia* dans la lutte contre la désertification.
- **Benchallel, 1994)** Quelques aspects de la tolérance de *l'Atriplex halimus* L. au chlorure de sodium: multiplication, croissance, composition minérale. *Oecol. Plant.*, p 35.
- **Boyd, 1998** Daily and seasonal patterns of leaf water relations and gas exchange of regulated deficit-irrigated almond trees under semiarid conditions. *Environment and Experimental Botany* p56.
- **Brandie J. R. (1987).** Windbreaks and crop production. SAF National Convention, Minneapolis (USA), p18.
- **Briat J-F., Lebrum M. (1999)** Plant responses to metal toxicity. *Plant Biol Pathol.* 322: 43-54.
- **Brooks, R S (1998).** Hyperaccumulation as a plant defensive strategy, p 181.
- **Chaignon V (2001).** Biodisponibilité du cuivre dans la rhizosphère de différentes plantes cultivées - Cas de sols viticoles contaminés par des fongicides, p173.
- **Chaudhry T.M., Hayes W.J., Khan A.G., Khoo C.S. (1998)** Phytoremediation - Focusing on accumulator plants that remediate metal-contaminated soils. *Austral.J. of Ecotoxicol*, p 37.
- **Chedly Abdelly (2007).** Bioremédiation / Phytoremédiation.
- **Choukr Allah R., Hamdy A., Lahmer F.Z. (1997).** Germination *d'A triplex*

*halimus* L. dans des milieux salés. International Conférence on Water management, salinity and pollution control towards sustainable irrigation in the Mediterranean région, IAM Valenzano Bari (Italy), p 22.

- **Dabouineau et al.** (2005). Phytoremediation - Transformation and control of contaminants. Par S.C. McCutcheon et J.L. Schnoor (2003). Dans Wiley-interscience, Inc., NJ, USA.
- **Dabouineau et al., 2005** Salt-induced vésiculation in mesophyll cells of *Atriplex* species. Plant Science Letters 12, pp 63-68.
- **Defeo et Senatore** (1993). Chemical composition and antimicrobial screening of the essential oil, journal of essential oil research, p61.
- **Dietz et al., 1999** Forage quality of rill scale (*Atriplex suckleyi*) grown on amended bentonite mine spoil. Great Basin Naturalist 50, pp57-62.
- **Elmsley J.** (2001) Nature's Building Blocks. A-Z guide to the elements. Oxford University Press, Oxford, UK.
- **F.A.O.** (2008) Global network on integrated soil management for sustainable use of salt-affected soils. Rome, Italy: FAO Land and plant nutrition management service. (<http://www.fao.org/ag/agl/agll/spush>)
- **Federal Remediation Technologies Roundtable** [archive], Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide, 4-31 - In-situ biological treatment/Phytoremediation).
- **Foy et al** (1978). The physiology of metal toxicity in plants. Annual Review of Plant Physiology and plant molecular biology, p29.
- **Gautry et Bailly., 2012 ; Chevrier.** (2013). ; Report Efficient Atmospheric Cleansing of Oxidized Organic Trace Gases by Vegetation.
- **Gautry et Bailly., 2012.** Making the life of heavy metal stressed plants a little easier. Funct. Plant Biol. 32:481-494.
- **Ghosh et Singh** (2005). A review on of heavy metals and utilization of tis byproducts, p18.
- **Greger** (1999). Metal availability and bioconcentration in plants, Berlin, p27.
- **Haddioui et Baaziz, (2006)** Possible involvement of some secondary métabolites in salt tolerance of sugarcane. J Plant Physiology 163, pp.723-730

- **Juste, 1988**) Polygamie chez *Atriplex halimus* L. (Chenopodiaceae). C.R. Acad. Sci. PARIS, Sciences de la Vie 324, p 107.
- **Kabata-Pendias and Pendias** (2001). Trace elements in soils and plants. Thirded. CRC Press, Boca Raton, LLC.
- **Kaocheki, 1996** Substrate relations for rillscale (*Atriplex suckleyi*) on bentonite mine spoil. Journal of Range Management p44.
- **Kinet et al** (1998). Réseau Atriplex. Allier biotechnologie et écologie pour une sécurité alimentaire accrue en régions arides et semi - aride. Cahier agricultures, p 505.
- **Koller et al** (2003) The use of transgenic plants in the bioremediation of soils contaminated with trace element. Appl. Microbiol. Biotechnol, p 661.
- **Lasat MM., Pence NS., Garvin DF., Ebbs SD. and Kochian LV.** (1998). Molecular physiology of zinc transport in the Zn hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*, J, p: 403.
- **Le Houérou** (1971). L' Atriplex en Tunisie et en Afrique du nord, Rome : ONU/FAO, p 271.
- **Lebourg et al., 1996**). Possible involvement of some secondary metabolites in salt tolerance of sugarcane. J Plant Physiology p163.
- **Levitt J** (1980). Respons of plants to environmental stresses: water, radiation, salt and other stresses, Academic Press, New York, p365.
- **Liu et al., 2008**).
- **Marinussen, et al (1997)**. Global inventory of natural and anthropogenic emissions of trace metals to the atmosphere.
- **Marinussen, et al**(1997). Bioavailability and biogeochemistry of metals in the terrestrial environment. Metallons in biological systems, p44.
- **Mc Bride MB** (1994). Environmental soil chemistry. Oxford university press, New York, p 67.
- **McLaughlin, et al.** (2000) Phytoextraction of metals and metalloids from contaminated soils. Curr. Opin. Biotechnol. 14: 277-282
- **Meharg, 1993** Vesiculated hairs: a mechanism for salt tolerance in *Atriplex halimus* L, Plant Physiology p45.

- **Misri et al., 2006** La génétique face au problème de la tolérance des plantes cultivées à la sécheresse: espoirs et difficultés. Sécheresse, Vol.8, N° 1, p. 29.
- **Montarges-Pelletier E., et al (2009)** Identification of nickel chelators in three hyperaccumulating plants: An X-ray spectroscopic study, *Phytochemistry*, p69.
- **Morel G. M. 1996.** Producing virus-free cymbidiums. *American Orchid Society Bulletin*. 29
- **Naval (2011).** Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals
- **Pignol et Coves (2003).** Des sources de pollution des sols, p77.
- **Pignol et Coves. (2003).** Application of Floating Wetlands for Enhanced Stormwater Treatment: A Review]; Independent study undertaken by NIWA (National Institute of Water and Atmospheric research of New Zealand.
- **Pilon-Smits 2005).** Phytoremédiation des sols contaminés Des plantes pour guérir les sols.
- **Pouget (1980).** Les micropolluants métalliques et les sols amendés par des boues résiduaires urbaines.
- **Raskin I., Kumar P.B.A.N., Dushenkov S., Salt D.E. (1994).** Bioconcentration of heavy metals by plants. *Curr. Opin. Biotechnol* , p90..
- **Robert et Juste, 1997).** Daily and seasonal patterns of leaf water relations and gas exchange of regulated deficit-irrigated almond trees under semiarid conditions. *Environment and Experimental Botany*, p56.
- **Rudolph., 2010 ; Ben Chekroun et Baghour., 2013 ; Paz-Ferreiro et al. (2014).** La phytoremédiation s'attaque aux sols gorgés de polluants [archive]. Article par Chantal Houzelle dans le journal "Les Echos", section "Environnement.
- **Rudolph (2010).** Physiology of salt tolerance in *Atriplex halimus* L.: ion uptake and distribution, oxalic acid content, and catalase activity.
- **Salt D E et al (1998).** Les mécanismes de la phytoaccumulation cellulaire. La phytotolérance chez les plantes hyperaccumulatrices, p43.
- **Salt D.E., Krämer U. (2000)** Mechanisms of metal hyperaccumulation in plants. In: Raskin I., Ensley B.D. (Eds.), *Phytoremediation of Toxic Metals: Using plants to Clean up the Environment*. John Wiley, New York, p46.

# Annexes

## Annexe 01: effet du plomb sur les longueur (tige, racine, plante)

- tige

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	7037,733	14	502,695				
VAR.FACTEUR 1	5284,399	4	1321,1	7,535	0,0048		
VAR.RESIDUELLE 1	1753,333	10	175,333			13,241	19,51%

- racine :

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	2243,233	14	160,231				
VAR.FACTEUR 1	1418,067	4	354,517	4,296	0,02818		
VAR.RESIDUELLE 1	825,167	10	82,517			9,084	24,98%

### C-plante :

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	12598,9	14	899,922				
VAR.FACTEUR 1	8092,401	4	2023,1	4,489	0,02484		
VAR.RESIDUELLE 1	4506,5	10	450,65			21,229	20,47%

## Annexe 02: effet du Zinc sur les longueur (tige,racine,plante)

### A-tige :

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	6966,434	14	497,602				
VAR.FACTEUR 1	4758,267	4	1189,567	5,387	0,01437		
VAR.RESIDUELLE 1	2208,167	10	220,817			14,86	18,07%

### B-racine :

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	2406,933	14	171,924				
VAR.FACTEUR 1	1591,267	4	397,817	4,877	0,01946		
VAR.RESIDUELLE 1	815,667	10	81,567			9,031	25,39%

### C-plante :

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	13923,43	14	994,531				
VAR.FACTEUR 1	10494,43	4	2623,608	7,651	0,00455		
VAR.RESIDUELLE 1	3429	10	342,9			18,518	15,79%

## Annexe 03: effet du Cadmium sur les longueur (tige,racine,plante)

- tig

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
--	-------	-----	------	--------	-------	------	------

VAR.TOTALE	9336,934	14	666,924				
VAR.FACTEUR 1	6058,267	4	1514,567	4,619	0,02286		
VAR.RESIDUELLE 1	3278,667	10	327,867			18,107	25,24%

- racine

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	2478,233	14	177,017				
VAR.FACTEUR 1	1146,4	4	286,6	2,152	0,14807		
VAR.RESIDUELLE 1	1331,833	10	133,183			11,541	38,43%

- c- plante

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	18072,43	14	1290,888				
VAR.FACTEUR 1	11221,26	4	2805,316	4,095	0,03226		
VAR.RESIDUELLE 1	6851,167	10	685,117			26,175	25,86%

### Annexe 04: effet du Cuivre sur les longueur (tige,racine,plante)

- tige

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	4436,934	14	316,924				
VAR.FACTEUR 1	3142,267	4	785,567	6,068	0,00986		
VAR.RESIDUELLE 1	1294,667	10	129,467			11,378	14,18%

- racine

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	1162,233	14	83,017				
VAR.FACTEUR 1	833,067	4	208,267	6,327	0,00861		
VAR.RESIDUELLE 1	329,167	10	32,917			5,737	15,25%

- C-plante

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	6709,233	14	479,231				
VAR.FACTEUR 1	5186,066	4	1296,517	8,512	0,00314		
VAR.RESIDUELLE 1	1523,167	10	152,317			12,342	10,52%

### Annexe 05: effet du cuivre sur LR/LT

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	0,291	14	0,021				
VAR.FACTEUR 1	0,14	4	0,035	2,319	0,12763		
VAR.RESIDUELLE 1	0,151	10	0,015			0,123	25,40%

### Annexe 06: effet du plomb sur LR/LT

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	0,548	14	0,039				

VAR.FACTEUR 1	0,44	4	0,11	10,209	0,00164		
VAR.RESIDUELLE 1	0,108	10	0,011			0,104	18,74%

**Annexe 07: effet du Zinc sur LR/LT**

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	0,382	14	0,027				
VAR.FACTEUR 1	0,191	4	0,048	2,511	0,10796		
VAR.RESIDUELLE 1	0,19	10	0,019			0,138	32,79%

**Annexe 08: effet du cadmium sur LR/LT**

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	0,336	14	0,024				
VAR.FACTEUR 1	0,049	4	0,012	0,425	0,78864		
VAR.RESIDUELLE 1	0,287	10	0,029			0,169	40,06%

**Annexe 09: effet du cuivre sur le BSR/BSA**

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	0,052	14	0,004				
VAR.FACTEUR 1	0,033	4	0,008	4,41	0,02615		
VAR.RESIDUELLE 1	0,019	10	0,002			0,043	57,39%

**Annexe 10: effet du plomb sur le BSR/BSA**

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	0,236	14	0,017				
VAR.FACTEUR 1	0,084	4	0,021	1,369	0,3119		
VAR.RESIDUELLE 1	0,153	10	0,015			0,124	142,26%

**Annexe 11: effet du Zinc sur le BSR/BSA**

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	226,9	14	16,207				
VAR.FACTEUR 1	134,348	4	33,587	3,629	0,04475		
VAR.RESIDUELLE 1	92,552	10	9,255			3,042	36,58%

**Annexe 12: effet du cadmium sur le BSR/BSA**

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	0,017	14	0,001				
VAR.FACTEUR 1	0,005	4	0,001	1,053	0,4289		
VAR.RESIDUELLE 1	0,012	10	0,001			0,035	51,18%

**Annexe 13: effet du cuivre sur la surface foliaire**

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	0,036	14	0,003				
VAR.FACTEUR 1	0,028	4	0,007	9,07	0,00251		
VAR.RESIDUELLE 1	0,008	10	0,001			0,028	38,54%

**Annexe 14: effet du Plomb sur la surface foliaire**

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	227,042	14	16,217				
VAR.FACTEUR 1	185,801	4	46,45	11,263	0,00114		
VAR.RESIDUELLE 1	41,241	10	4,124			2,031	27,42%

**Annexe 15: effet du Zinc sur la surface foliaire**

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	160,895	14	11,493				
VAR.FACTEUR 1	48,261	4	12,065	1,071	0,42094		
VAR.RESIDUELLE 1	112,634	10	11,263			3,356	29,80%

**Annexe 16 : effet du Cadmium sur la surface foliaire**

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	201,7	14	14,407				
VAR.FACTEUR 1	154,604	4	38,651	8,207	0,00357		
VAR.RESIDUELLE 1	47,096	10	4,71			2,17	22,58%

**Annexe17 : tableau de variance effet du cuivre sur la chlorophylle A**

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	1,396	14	0,1				
VAR.FACTEUR 1	1,388	4	0,347	434,291	0		
VAR.RESIDUELLE 1	0,008	10	0,001			0,028	5,50%

**Annexe18 : tableau de variance effet du cuivre sur la chlorophylle B**

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	5,155	14	0,368				
VAR.FACTEUR 1	5,075	4	1,269	159,189	0		
VAR.RESIDUELLE 1	0,08	10	0,008			0,089	10,96%

**Annexe 19 : tableau de variance effet du cuivre sur la chlorophylle A+B**

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	11,762	14	0,84				
VAR.FACTEUR 1	11,678	4	2,92	348,726	0		
VAR.RESIDUELLE 1	0,084	10	0,008			0,091	6,91%

**Annexe20 : tableau de variance effet du plomb sur la chlorophylle A**

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	1,753	14	0,125				
VAR.FACTEUR 1	1,737	4	0,434	259,705	0		
VAR.RESIDUELLE 1	0,017	10	0,002			0,041	9,25%

**Annexe21 : tableau de variance effet du plomb sur la chlorophylle B**

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	5,818	14	0,416				
VAR.FACTEUR 1	5,759	4	1,44	240,74	0		
VAR.RESIDUELLE 1	0,06	10	0,006			0,077	10,15%

**Annexe 22 : tableau de variance effet du plomb sur la chlorophylle A+B**

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	13,842	14	0,989				
VAR.FACTEUR 1	13,767	4	3,442	456,785	0		
VAR.RESIDUELLE 1	0,075	10	0,008			0,087	7,23%

**Annexe 23: tableau de variance effet du Zinc sur la chlorophylle A**

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	1,089	14	0,078				
VAR.FACTEUR 1	1,08	4	0,27	318,129	0		
VAR.RESIDUELLE 1	0,008	10	0,001			0,029	5,22%

**Annexe 24: tableau de variance effet du Zinc sur la chlorophylle B**

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	8,15	14	0,582				
VAR.FACTEUR 1	8,026	4	2,006	160,946	0		
VAR.RESIDUELLE 1	0,125	10	0,012			0,112	6,89%

**Annexe 25 : tableau de variance effet du Zinc sur la chlorophylle A+B**

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	1,892	14	0,135				
VAR.FACTEUR 1	1,876	4	0,469	296,346	0		
VAR.RESIDUELLE 1	0,016	10	0,002			0,04	10,17%

**Annexe26 : tableau de variance effet du Cadmium sur la chlorophylle A**

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	6,207	#DIV/0!	0,443				
VAR.FACTEUR 1	6,139	4	1,535	225,72	0		
VAR.RESIDUELLE 1	0,068	10	0,007			0,082	11,50%

**Annexe 27 : tableau de variance effet du Cadmium sur la chlorophylle B**

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	14,906	14	1,065				
VAR.FACTEUR 1	14,773	4	3,693	277,789	0		
VAR.RESIDUELLE 1	0,133	10	0,013			0,115	10,43%

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
--	-------	-----	------	--------	-------	------	------

VAR.TOTALE	3,346	14	0,239				
VAR.FACTEUR 1	3,242	4	0,81	77,707	0		
VAR.RESIDUELLE 1	0,104	10	0,01			0,102	9,57%

**Annexe 28 : tableau de variance effet du Cadmium sur la chlorophylle A+B**

- **Santé Canada, 1986).** Pathway of régulation of the content of excess absorbed ions in plant tissues
- **Schwartz C., Echevarria G, Morel J.L. (2003)** Phytoextraction of cadmium with *Thlaspi caerulescens*.
- **Shabala et al. (1998).** - Differential Expression and Function of *Arabidopsis Thaliana* NHX NA/H antiporters in the salt stress réponse.
- **Sturm (1996).** Crop management under saline water irrigation, page 108 in *Water, Soil and Crop Management Relating to the use of Saline Water*.
- **Templeton et al. (2000).** Evaluation of *Atriplex* Unes for sélénium accumulation, salt tolerance and suitability for a key agricultural insect pest. *Environmental Pollution*, p20.
- **Tewari et Singh (1991).** Botanique générale, Spectrométrie d'Absorption Atomique, Applications à l'analyse chimique, p120.
- **Ure AM, Davidson CM. (2007).** Chemical speciation in soils and related materials by selective chemical extraction. In: *Chemical Speciation in the Environment*. Eds Ure AM, Davidson CM, Blackwell Science, London. P 265.
- **USGS (2012).** Characterization of Cd translocation and identification of the Cd form in xylem sap of the Cd hyperaccumulator *Arabidopsis halleri*. *Plant Cell Physiol*.
- **Xiaomei L., Qitang W., Banks M.K., Ebbs S.D. (2005)** Phytoextraction of Zn and Cu from sewage sludge and impact on agronomic characteristics. *J. Environ. Sci. Health A Tox. Hazard Subst. Environ.* P 40.
- **Zemmerli, 1989).** Characteristics of cadmium uptake in two contrasting ecotypes of the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. *J*, p53.
- **Zhu (2001).** Studies on the microscopic structure of *Puccinellistenuis floras* roots under different salinity stress. *Grassland of China*, p37.

*halimus* L. dans des milieux salés. International Conférence on Water management, salinity and pollution control towards sustainable irrigation in the Mediterranean région, IAM Valenzano Bari (Italy), p 22.

- **Dabouineau et al.** (2005). Phytoremediation - Transformation and control of contaminants. Par S.C. McCutcheon et J.L. Schnoor (2003). Dans Wiley-interscience, Inc., NJ, USA.
- **Dabouineau et al., 2005** Salt-induced vésiculation in mesophyll cells of *Atriplex* species. Plant Science Letters 12, pp 63-68.
- **Defeo et Senatore** (1993). Chemical composition and antimicrobial screening of the essential oil, journal of essential oil research, p61.
- **Dietz et al., 1999** Forage quality of rill scale (*Atriplex suckleyi*) grown on amended bentonite mine spoil. Great Basin Naturalist 50, pp57-62.
- **Elmsley J.** (2001) Nature's Building Blocks. A-Z guide to the elements. Oxford University Press, Oxford, UK.
- **F.A.O.** (2008) Global network on integrated soil management for sustainable use of salt-affected soils. Rome, Italy: FAO Land and plant nutrition management service. (<http://www.fao.org/ag/agl/agll/spush>)
- **Federal Remediation Technologies Roundtable** [archive], Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide, 4-31 - In-situ biological treatment/Phytoremediation).
- **Foy et al** (1978). The physiology of metal toxicity in plants. Annual Review of Plant Physiology and plant molecular biology, p29.
- **Gautry et Bailly., 2012 ; Chevrier.** (2013). ; Report Efficient Atmospheric Cleansing of Oxidized Organic Trace Gases by Vegetation.
- **Gautry et Bailly., 2012.** Making the life of heavy metal stressed plants a little easier. Funct. Plant Biol. 32:481-494.
- **Ghosh et Singh** (2005). A review on of heavy metals and utilization of tis byproducts, p18.
- **Greger** (1999). Metal availability and bioconcentration in plants, Berlin, p27.
- **Haddioui et Baaziz, (2006)** Possible involvement of some secondary métabolites in salt tolerance of sugarcane. J Plant Physiology 163, pp.723-730

- **Juste, 1988**) Polygamie chez *Atriplex halimus* L. (Chenopodiaceae). C.R. Acad. Sci. PARIS, Sciences de la Vie 324, p 107.
- **Kabata-Pendias and Pendias** (2001). Trace elements in soils and plants. Thirded. CRC Press, Boca Raton, LLC.
- **Kaocheki, 1996** Substrate relations for rillscale (*Atriplex suckleyi*) on bentonite mine spoil. Journal of Range Management p44.
- **Kinet et al** (1998). Réseau Atriplex. Allier biotechnologie et écologie pour une sécurité alimentaire accrue en régions arides et semi - aride. Cahier agricultures, p 505.
- **Koller et al** (2003) The use of transgenic plants in the bioremediation of soils contaminated with trace element. Appl. Microbiol. Biotechnol, p 661.
- **Lasat MM., Pence NS., Garvin DF., Ebbs SD. and Kochian LV.** (1998). Molecular physiology of zinc transport in the Zn hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*, J, p: 403.
- **Le Houérou** (1971). L' Atriplex en Tunisie et en Afrique du nord, Rome : ONU/FAO, p 271.
- **Lebourg et al., 1996**). Possible involvement of some secondary metabolites in salt tolerance of sugarcane. J Plant Physiology p163.
- **Levitt J** (1980). Respons of plants to environmental stresses: water, radiation, salt and other stresses, Academic Press, New York, p365.
- **Liu et al., 2008**).
- **Marinussen, et al** (1997). Global inventory of natural and anthropogenic emissions of trace metals to the atmosphere.
- **Marinussen, et al** (1997). Bioavailability and biogeochemistry of metals in the terrestrial environment. Metallons in biological systems, p44.
- **Mc Bride MB** (1994). Environmental soil chemistry. Oxford university press, New York, p 67.
- **McLaughlin, et al.** (2000) Phytoextraction of metals and metalloids from contaminated soils. Curr. Opin. Biotechnol. 14: 277-282
- **Meharg, 1993** Vesiculated hairs: a mechanism for salt tolerance in *Atriplex halimus* L, Plant Physiology p45.

- **Misri et al., 2006** La génétique face au problème de la tolérance des plantes cultivées à la sécheresse: espoirs et difficultés. Sécheresse, Vol.8, N° 1, p. 29.
- **Montarges-Pelletier E., et al (2009)** Identification of nickel chelators in three hyperaccumulating plants: An X-ray spectroscopic study, *Phytochemistry*, p69.
- **Morel G. M. 1996.** Producing virus-free cymbidiums. *American Orchid Society Bulletin*. 29
- **Naval (2011).** Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals
- **Pignol et Coves (2003).** Des sources de pollution des sols, p77.
- **Pignol et Coves. (2003).** Application of Floating Wetlands for Enhanced Stormwater Treatment: A Review]; Independent study undertaken by NIWA (National Institute of Water and Atmospheric research of New Zealand.
- **Pilon-Smits 2005).** Phytoremédiation des sols contaminés Des plantes pour guérir les sols.
- **Pouget (1980).** Les micropolluants métalliques et les sols amendés par des boues résiduaires urbaines.
- **Raskin I., Kumar P.B.A.N., Dushenkov S., Salt D.E. (1994).** Bioconcentration of heavy metals by plants. *Curr. Opin. Biotechnol* , p90..
- **Robert et Juste, 1997).** Daily and seasonal patterns of leaf water relations and gas exchange of regulated deficit-irrigated almond trees under semiarid conditions. *Environment and Experimental Botany*, p56.
- **Rudolph., 2010 ; Ben Chekroun et Baghour., 2013 ; Paz-Ferreiro et al. (2014).** La phytoremédiation s'attaque aux sols gorgés de polluants [archive]. Article par Chantal Houzelle dans le journal "Les Echos", section "Environnement.
- **Rudolph (2010).** Physiology of salt tolerance in *Atriplex halimus* L.: ion uptake and distribution, oxalic acid content, and catalase activity.
- **Salt D E et al (1998).** Les mécanismes de la phytoaccumulation cellulaire. La phytotolérance chez les plantes hyperaccumulatrices, p43.
- **Salt D.E., Krämer U. (2000)** Mechanisms of metal hyperaccumulation in plants. In: Raskin I., Ensley B.D. (Eds.), *Phytoremediation of Toxic Metals: Using plants to Clean up the Environment*. John Wiley, New York, p46.

- **Santé Canada, 1986).** Pathway of régulation of the content of excess absorbed ions in plant tissues
- **Schwartz C., Echevarria G, Morel J.L. (2003)** Phytoextraction of cadmium with *Thlaspi caerulescens*.
- **Shabala et al. (1998).** - Differential Expression and Function of *Arabidopsis Thaliana* NHX NA/H antiporters in the salt stress réponse.
- **Sturm (1996).** Crop management under saline water irrigation, page 108 in *Water, Soil and Crop Management Relating to the use of Saline Water*.
- **Templeton et al. (2000).** Evaluation of *Atriplex* Unes for sélénium accumulation, salt tolerance and suitability for a key agricultural insect pest. *Environmental Pollution*, p20.
- **Tewari et Singh (1991).** Botanique générale, Spectrométrie d'Absorption Atomique, Applications à l'analyse chimique, p120.
- **Ure AM, Davidson CM. (2007).** Chemical speciation in soils and related materials by selective chemical extraction. In: *Chemical Speciation in the Environment*. Eds Ure AM, Davidson CM, Blackwell Science, London. P 265.
- **USGS (2012).** Characterization of Cd translocation and identification of the Cd form in xylem sap of the Cd hyperaccumulator *Arabidopsis halleri*. *Plant Cell Physiol*.
- **Xiaomei L., Qitang W., Banks M.K., Ebbs S.D. (2005)** Phytoextraction of Zn and Cu from sewage sludge and impact on agronomic characteristics. *J. Environ. Sci. Health A Tox. Hazard Subst. Environ.* P 40.
- **Zemmerli, 1989).** Characteristics of cadmium uptake in two contrasting ecotypes of the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. *J*, p53.
- **Zhu (2001).** Studies on the microscopic structure of *Puccinellistenuis floras* roots under different salinity stress. *Grassland of China*, p37.