

LISTE DES ABREVIATIONS

AL: Alluminium

an : ans

B: Bore

Ca : Calcium

CaCO₃ : Carbonate de Calcium

Cl: Chlore

cm : centimètre

cm³ : centimètre cube

Co : Cobalte

Cu: Cuivre

ETM : Élément Trace Métallique

Fe: Fer

Fig : Figure

g: gramme

h : heure

HCl : Chlorure d'Hydrogène

K : Potassium

KCl : Chlorure de Potassium

kg: kilogramme

l : litre

m : mètre

M : Molaire

m³ : mètre cube

mg: milligramme

min: minute

ml : millilitre

mm : millimètre

Mn : Manganèse

MO : Molybdène

N : Normalité

Na: Sodium

NaCl : Chlorure de Sodium

NADP : Nicotinamide adénine nucléotide phosphate

nm : nanomètre

NO₃: Nitrate

P : Phosphore

P : Probabilité

Pb : Plomb

pH : Potentiel hydrogène

ppm : partie par million

PS : poids sec

V : Volume

Zn: Zinc

% : Pourcentage

°C : Degré Celcius

µg : microgramme

TABLE DES MATIERES

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des abréviations	
Table des matières	

INTRODUCTION

CHAPITRE 1-SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

I. DONNEES SUR LE STRESS

1-Définition du stress.....	1
2-Les différents types de stress.....	1
➤ Le stress ioniques.....	1
➤ Le stress hydriques.....	1
➤ Le stress thermique.....	1
➤ Le stress salin.....	1
3- La plante et le stress.....	2

II. LA POLLUTION PAR LES METAUX LOURDS2

1- Définition des métaux lourds (Cas du plomb).....	2
2- La pollution par le plomb.....	2
2.1- Le plomb dans l'air.....	2
2.2- Le plomb dans l'eau.....	3
2.3- Le plomb dans le sol.....	3
3- Devenir du plomb dans la plante.....	3
3.1- L'adsorption et l'absorption du plomb par les racines.....	3
3.2- La translocation du plomb vers les parties aériennes.....	5
3.3- L'effet du plomb sur la plante.....	5
3.4- Les mécanismes de tolérance des plantes au plomb.....	6

III. LA DÉPOLLUTION DU SOL.....6

1- La phytoremediation.....	7
-----------------------------	---

2- Les différentes techniques de phytoremediation.....	7
➤ La phytoextraction.....	7
➤ La rhizofiltration.....	7
➤ La phytostabilisation.....	7
➤ La phytovolatilisation.....	7
➤ La phytodégradation.....	8
3- Avantages et inconvénients de la phytoremediation.....	8
3.1- Les avantages	9
3.2- Les inconvénients.....	9
IV. LA PLANTE : l'atriplex	9
1- Classification.....	10
2- <i>Atriplex halimus</i> L.....	11
3- Description.....	12
4- Importances de l' <i>Atriplex halimus</i> L.....	12
5- <i>Atriplex canescens</i> (Pursh) Nutt.....	13
6- Description.....	13
7- Importance de l' <i>Atriplex canescens</i> (Pursh) Nutt.....	14
8- L'utilisation des atriplex en phytoremédiation	14

CHAPITRE II- MATERIELS ET METHODES

1- Matériel végétal	15
2- Méthodes	15
a- Préparation des graines.....	15
b- Préparation des plantules.....	15
c- Préparation du substrat.....	16
d- Repiquage.....	16
e- Préparation de la solution de l'arrosage.....	17
f- Préparation de la solution de stress.....	18
g- Dispositif expérimental.....	18
h- Prélèvement et préparation du matériel végétal pour les analyses	19
i- Extraction et dosage des composés.....	20
i.1-Extraction et dosage de proline.....	20
➤ Extraction.....	20
➤ Dosage.....	21

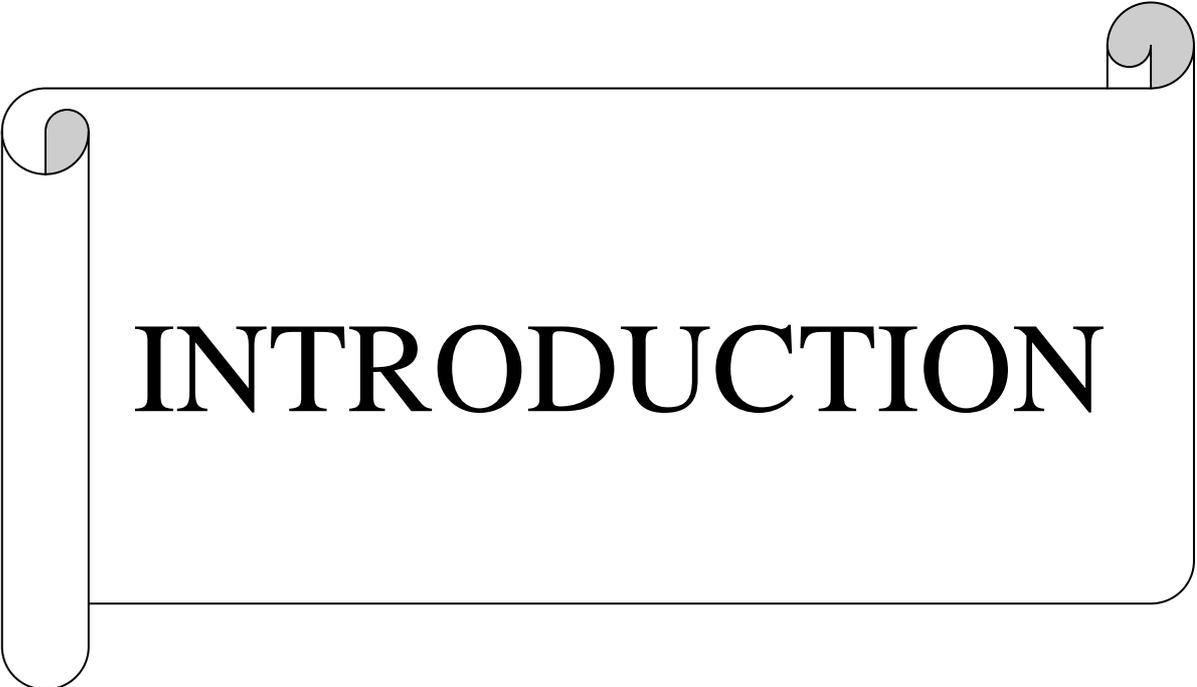
i.2-Extraction et dosage des sucres solubles.....	21
➤ Extraction.....	22
➤ Dosage.....	22
i.3- Extraction et dosage des éléments minéraux.....	23
➤ Extraction	23
➤ Dosage.....	24
a- La solution du potassium.....	24
b- La solution du sodium.....	24
c- La solution du calcium.....	24

CHAPITRE III-RESULTATS

I-Teneur en proline des feuilles et des racines des plantes stressées au nitrate de plomb.....	25
1- Plantes de l' <i>Atriplex halimus</i> L.....	25
2- Plantes de l' <i>Atriplex canescens</i> (Pursh) Nutt.....	26
II- Teneur en sucres solubles des feuilles et des racines des plantes stressées au nitrate de plomb.....	27
1- Plantes de l' <i>Atriplex halimus</i> L.....	27
2- Plantes de l' <i>Atriplex canescens</i> (Pursh) Nutt.....	29
III- Teneurs en éléments minéraux des feuilles et des racines des plantes stressées au nitrate de plomb.....	30
1- Le sodium.....	30
a- Plantes de l' <i>Atriplex halimus</i> L.....	30
b- Plantes de l' <i>Atriplex canescens</i> (Pursh) Nutt.....	31
2- Le potassium.....	33
a- Plantes de l' <i>Atriplex halimus</i> L.....	33
b- Plantes de l' <i>Atriplex canescens</i> (Pursh) Nutt.....	34
3- Le calcium.....	35
a- Plantes de l' <i>Atriplex halimus</i> L.....	35
b- Plantes de l' <i>Atriplex canescens</i> (Pursh) Nutt.....	37

CONCLUSION ET DISCUSSION.....39

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....49



INTRODUCTION

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).

La présence de plomb dans les déchets, en particulier, peut entraîner une contamination des sols et la réduction des possibilités de valorisation et de recyclage des déchets (Miquel., 2001). Ce phénomène pose un problème environnemental, car le plomb est classé parmi les métaux potentiellement toxiques pour l'homme (Pichard., 2002 ; Läid., 2012). Cet élément s'accumulant dans les sols peut être prélevé par les plantes (Sterckeman et *al.*, 2000 ; Pourrut., 2008), et par conséquent contaminer l'homme via la chaîne alimentaire, ce qui constitue un problème sanitaire majeur (Gonzales et *al.*, 2008 ; McLean et *al.*, 2009).

Dans les sols, le plomb peut induire une dégradation de l'activité biologique (Dumat et *al.*, 2006) et de la qualité des eaux et des plantes (Cecchi., 2008). De nombreux chercheurs se sont intéressés à l'impact du plomb sur les végétaux ; ce polluant affecte le métabolisme global de la plante, notamment la photosynthèse (Fargašová., 2001 ; Sharma et Dubey., 2005), inhibe l'élongation racinaire (Peng et *al.*, 2005) et peut causer des dommages membranaires (Seregin et Ivanov., 2001; Sharma et Dubey., 2005). Il présente également une forte affinité pour les protéines qui possèdent des groupements thiols ou des cofacteurs métalliques (métallo-enzymes) (Pourrut., 2008).

Le plomb peut minéraliser la paroi cellulaire, diminuant ainsi sa plasticité, et par conséquent influençant le potentiel hydrique de la cellule (Pourrut., 2008 ; Biteur., 2012). Ce phénomène est accentué par la diminution observée des concentrations en molécules maintenant la turgescence cellulaire (Barcelo et Poschenrieder., 1990). Cette modification du potentiel hydrique cellulaire, en particulier au niveau des cellules de gardes, pose des problèmes de régulation stomatiques (Kosobrukhov et *al.*, 2004; Weryszko-Chmielewska et Chwil., 2005). Pour maintenir la turgescence de ces cellules, la plante synthétise massivement des osmolytes, et en particulier de la proline (Qureshi et *al.*, 2007 ; Djerroudi-Zidane et *al.*, 2010) et des sucres (Annou et Ould El-Hadj Khelil., 2012 ; Belfakih et *al.*, 2013).

Une exposition au plomb perturbe par ailleurs le prélèvement et la translocation d'éléments essentiels à la plante, principalement le Ca^{+2} mais également le Fe^{+2} , Fe^{+3} , K^{+} , Mg^{+2} , Mn^{+} et Zn^{+} (Chatterjee et *al.*, 2004). De nombreuses techniques ont été développées afin de réduire la quantité totale et/ou la fraction disponible des métaux dans les sols pollués et d'apporter des réponses adaptées aux divers contextes de pollution (He et *al.*, 2005 ; Vanobberghen., 2009).

Certaines plantes sont capables d'adsorber et d'absorber les métaux au niveau de leurs racines, puis de 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).

Selon Komárek et *al.* (2008), la dépollution nécessite l'élimination des métaux du sol en faisant usage de plantes tolérant la présence du contaminant présent parfois en concentration élevée. De plus, pour certaines applications, ces plantes doivent être capables d'accumuler le polluant dans leurs racines ou dans leurs parties aériennes (Hall et Williams., 2003). Plusieurs espèces végétales sont connues pour certains éléments métalliques toxiques tels que le nickel ou le cadmium, alors que pour le plomb, peu d'espèces tolérant et/ou accumulant cet élément sont identifiées (Brunet., 2008).

En conditions stressantes, les plantes peuvent réagir en mettant en œuvre des mécanismes, entre autres, physiologiques (Tafforeau., 2002 ; Parida et Das ., 2005 ; Martinez et *al.*, 2007) et biochimiques (Brugnoli et Lauteri., 1991 ; Attia., 2007) impliquant une activité enzymatique (Chaffei et *al.*, 2004 ; Biteur., 2012). Ainsi la synthèse de composés organiques contribuerait à l'osmoprotection (Rathinasabapathi et *al.*, 2000) ou la régulation osmotique (El-Shintinawy et Hassanein., 2001). En effet, pour atténuer l'effet de toxicité dans les milieux hautement concentrés, les plantes, aussi bien les halophytes que les glycophytes, peuvent développer plusieurs mécanismes pour assurer leur cycle de croissance et de développement ; certaines espèces utilisent le mécanisme d'exclusion des sels en excès (Alem et Amri., 2005) ou les compartimentent dans la vacuole (Niu et *al.*, 1995). Le mécanisme le plus commun aux halophytes pour assurer leurs besoins en eau est l'ajustement osmotique en augmentant leur pression osmotique par rapport à celle du sol par l'absorption de sels et leur transport vers les feuilles (Zhu., 2001). Les atriplex possèdent par ailleurs, un système racinaire très développé, fixant les couches supérieures du sol et peuvent être utilisées comme moyen de lutte contre la désertification (Belkhodja et Bidai., 2004 ; Ben hassine et Bouzid ., 2008).

Nous avons choisi deux espèces pour notre expérimentation, l'*Atriplex halimus* L. et l'*Atriplex canescens* (Pursh) Nutt. pour étudier leur réponse au stress plombique et évaluer leur capacité phytoremédiate.

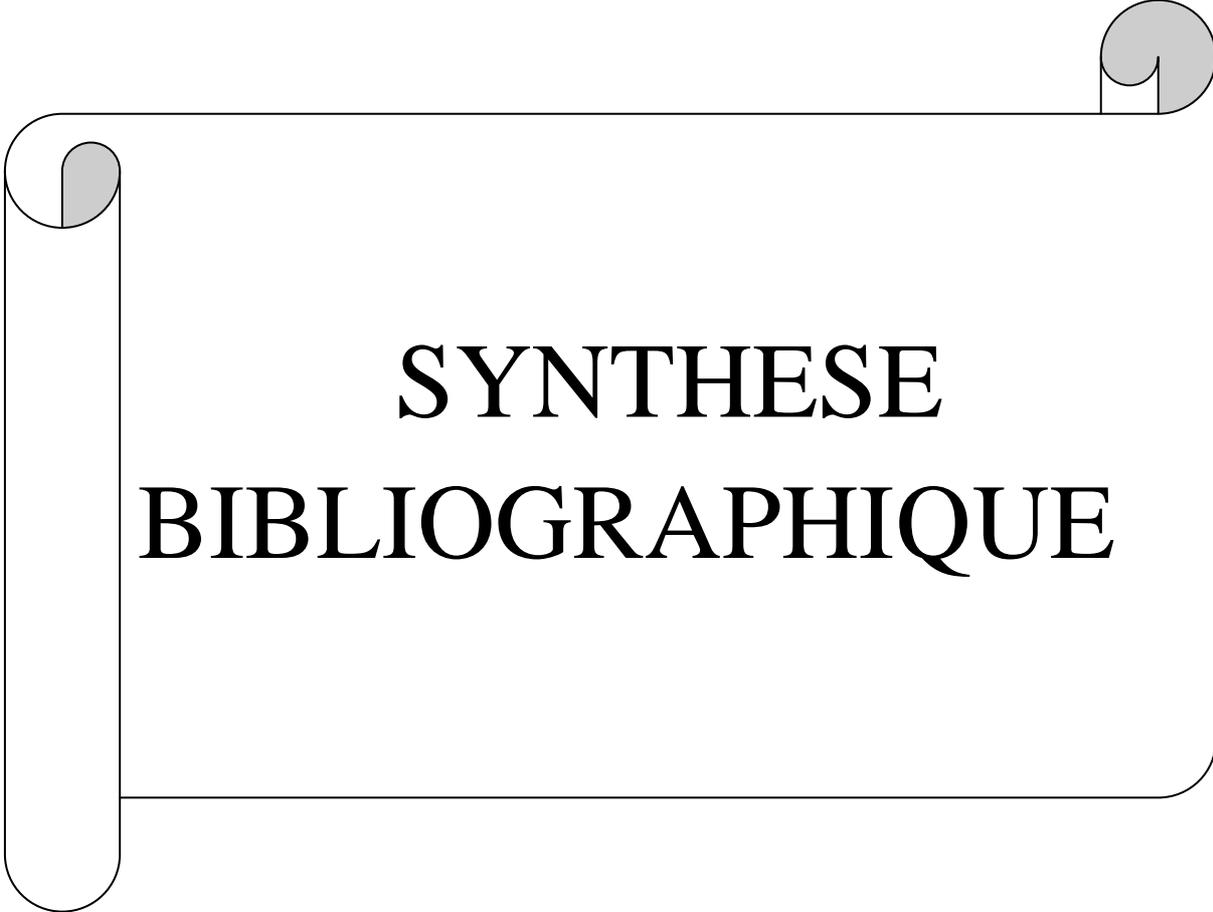
Nous proposons dans le premier chapitre une revue bibliographique sur les différents aspects du plomb et les techniques de la phytoremédiation dans la première partie puis apportons quelques éléments caractérisant les deux

Introduction

espèces. Dans une seconde partie nous décrivons la méthodologie adoptée au cours de cette expérimentation.

La troisième partie est consacrée aux résultats acquis pour les différents paramètres adoptés pour évaluer la réponse des plantes au stress métallique.

Enfin, les résultats sont discutés et conclus.



SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

[Clicours.COM](https://www.clicours.com)

CHAPITRE I – SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

I - DONNEES SUR LE STRESS

1- Définition du stress

Le stress est défini comme étant une force ou influence hostile qui tend à empêcher un système normal de fonctionner (Jones et *al.*, 1989). Selon Dutuit et *al.* (1994), le stress est un ensemble de conditions qui provoquent des changements de processus physiologiques résultant éventuellement en dégâts, dommages, blessures, inhibition de croissance ou de développement. Plus tard, pour Hopkins (2003), le stress est toute pression dominante exercée par un paramètre, perturbant le fonctionnement habituel de la plante. Par contre, Marouf et Reynaud (2007) rapportent que le stress est l'ensemble des perturbations physiologiques ou pathologiques provoqués dans un organisme par des agents biotiques ou abiotiques.

2- Les différents types de stress

Parmi ces contraintes environnementales on peut distinguer suivant leur nature :

➤ **Le stress ionique**, lié à la composition en éléments du sol (carences ou toxicité en certains ions) : un déficit en (P, MO, Cu, Zn, Fe, B,...) peut avoir des conséquences importantes sur le développement des plantes. Un excès de minéraux (AL, Na, Cl,...) peut avoir des effets toxiques (Monneveux et This., 1997).

➤ **Le stress hydrique**, le stress hydrique de l'atmosphère est défini comme des réductions de l'humidité relative de l'air, entraînant des modifications du pouvoir évaporant et de la transpiration foliaire. Un stress hydrique, peut limiter ainsi la croissance des végétaux, en modifiant le lien entre la disponibilité et les besoins (Bezzala., 2005).

En situation de déficit hydrique, la plante ferme ses stomates pour réduire ses pertes en eau (Tardieu et Dreyer., 1997) provoquant des modifications physiologiques, morphologiques et phénologiques.

➤ **Le stress thermique**, dans lequel on distingue les basses températures, gélives ou non gélives, et les hautes températures (Lu et *al.*, 2003).

➤ **Le stress salin**, La salinité de sol ou de l'eau est causée par la présence d'une quantité excessive de sels, généralement un taux élevé de Na⁺ et Cl⁻ ; ce qui cause le stress salin (Zhu., 2001) ; cette formation de sol salin ou sodique résulte généralement de l'accumulation des sels dans les horizons de surface (Essington., 2004).

Dans ce cas là, les plantes ont développé des stratégies d'adaptation pour répondre à ces changements en contrôlant et en ajustant leurs systèmes métaboliques (Hopkins., 2003).

3- La plantes et le stress

La croissance de la plante est, à tout instant, affectée par une multitude de stress environnementaux. Les plantes ont mis en place des mécanismes propres pour percevoir et répondre à toute une série de stress tels que la déshydratation, les basses températures, la chaleur, les stress mécaniques comme le toucher ou le vent, les blessures ou encore les infections provoquées par des espèces qui leur sont pathogènes. Tous ces stress sont donc perçus par la plante comme des stimuli qui, par un phénomène de transduction du signal au sein de la cellule végétale, vont à leur tour induire tout un ensemble de réponses biochimiques, moléculaires (expression ou répression de certains gènes) ou physiologiques (Tafforeau., 2002).

L'étude des plantes, placées dans ces conditions, est un aspect important de l'écophysiologie végétale pour trois raisons. D'abord, les plantes répondent souvent aux stress en modifiant leur physiologie et leurs métabolismes et leur réponse contribue à la compréhension des facteurs qui limitent la répartition des végétaux. Enfin, en agriculture, la capacité des cultures à résister aux stress est un facteur important de la détermination du rendement (Nebors., 2008).

II-LA POLLUTION PAR LES METAUX LOURDS

1- Définition des métaux lourds (Cas du plomb)

On appelle en général « métaux lourds » les éléments métalliques naturels, métaux ou dans certains cas métalloïdes caractérisés par une masse volumique élevée, supérieure à 5 g.cm⁻³ (Holleman et Wiberg., 1985). La plupart des scientifiques préfèrent à l'appellation « métaux lourds », l'appellation « éléments en traces métalliques » (ETM) (Chiffolleau et *al.*, 2001).

C'est un polluant primaire persistant, sa durée de vie dans le sol est de 1 700 ans, il peut être bio-accumulé dans les chaînes alimentaires et il est toxique pour l'homme (Carsignol et Calovi., 2004).

2- La pollution par le plomb

Le plomb peut se trouver dans différents milieux naturels (air, eau, sols) mais également dans l'eau de consommation, dans certains éléments de l'habitat et dans l'alimentation.

2.1- Le plomb dans l'air

Le plomb peut être retrouvé dans l'atmosphère sous forme de vapeurs, de gaz ou de particules parcourent de longues distances dans l'air et restent dans l'atmosphère d'origine anthropique et/ou naturelle (Boulkrah., 2008).

2.2- Le plomb dans l'eau

Le plomb est généralement d'origine industrielle ou des transferts entre les différents compartiments de l'environnement (sols pollués, retombées atmosphériques, *etc.*). Le plomb d'origine hydrique provient pour la majorité de la dissolution du plomb constitutif de certains éléments du système de distribution d'eau (Boukrah., 2008).

2.3- Le plomb dans le sol

On peut trouver le plomb dans le sol sous forme ionique, dissoute, ou liée plus ou moins fortement aux particules. Leur accumulation provenant des retombées atmosphériques, ou de déchets contaminés déposés sur le sol, se fait principalement dans les horizons de surface (Sterckeman *et al.*, 2000) et plus précisément dans les horizons riches en matières organiques. Les teneurs en Pb diminuent, ensuite, plus en profondeur (De Abreu *et al.*, 1998), ceci s'explique par le fait que le Pb est peu mobile.

Etant donné que le Pb^{+2} se lie facilement aux particules du sol, les quantités de Pb^{+2} accumulées dans les sols diffèrent selon la composition, notamment en argile, sable et matière organiques du sol (Brunet., 2008).

Les sols non contaminés contiendraient de 10 à 30 mg Pb kg^{-1} de sol sec ; des teneurs en plomb supérieures à 110 mg Pb kg^{-1} sont considérées comme des anomalies (Laperche *et al.*, 2004).

3- Devenir du plomb dans la plante

Le plomb a une forte capacité de liaison avec les particules du sol, il est donc plus difficilement extractible par les plantes, rendant le travail expérimental plus compliqué (Brunet., 2008).

Les plantes peuvent absorber le plomb présent dans le sol par l'intermédiaire de leurs racines. Une partie de ce métal, présent dans les retombées atmosphériques ou dans les amendements agricoles (impuretés), peut également être absorbée par leurs feuilles.

Cependant, en dehors de zones proches d'installations générant la production de grandes quantités de plomb dans l'atmosphère, la plus grande partie du plomb absorbée par les plantes est par l'absorption racinaire (Pourrut., 2008).

3.1- L'adsorption et l'absorption du plomb par les racines

Le plomb pénètre majoritairement dans la plante via les racines. Les couches supérieures du cortex racinaire (rhizoderme et collenchyme/parenchyme) constituent une barrière physique contre la pénétration du plomb dans la racine.

Le mécanisme, ou plus vrai semblablement les mécanismes par lesquels ce métal arrive à pénétrer dans les racines ne sont pas encore élucidés. Toujours est-il que dans un premier temps le plomb présent dans la solution de sol s'adsorbe à la surface de cet organe

(Glinski et Lipiec., 1990). Cette fixation en surface permet de restreindre le passage du plomb à l'intérieur de la racine.

Selon des nombreuses recherches sur diverses espèces végétales. Ces travaux ont révélé que le plomb, après s'être fixé au rhizoderme, pénètre dans le système racinaire de façon passive et suivait le système de conduction de l'eau. Cette absorption n'est pas uniforme le long de la racine, puisqu'il existe un gradient de concentration en plomb dans les tissus à partir de l'apex, qui est la zone la plus concentrée (Seregin et *al.*, 2004).

Les tissus jeunes, et en particulier la zone apicale (en dehors de la coiffe) où les cellules possèdent des parois encore fines, sont les zones absorbant le plus de plomb (Seregin et *al.*, 2004). Cette région apicale correspond également à la zone où le pH rhizosphérique est le plus bas. Ce pH bas favorise la solubilité du métal et conduit à une élévation locale de la concentration en plomb dans la solution du sol.

L'absorption racinaire en générale peut se faire de plusieurs manières :

Soit la pénétration des éléments dans les racines se fait grâce à un transport actif interne par le symplaste (cytoplasmes des cellules reliés entre eux par les plasmodesmes). Après avoir traversé la paroi cellulaire, les ions métalliques atteignent la surface de la membrane plasmique, puis pénètrent dans le symplaste. Ensuite, ces ions métalliques peuvent passer d'une cellule à l'autre en empruntant les plasmodesmes, qui relient les cellules. C'est la voie dite symplastique.

Soit ce transport peut aussi se faire par voie passive ou apoplastique, c'est-à-dire par un transport dans les espaces intercellulaires (ou Espaces Libres Apparents). Ce phénomène s'arrête le plus souvent au niveau de l'endoderme, du fait de la présence de cadres de subérines, ou bandes de Caspary, qui bloquent le passage des molécules et des ions. A ce moment là, l'eau et les molécules sont obligées de traverser les membranes plasmiques des cellules de l'endoderme, afin de pouvoir parvenir dans le cylindre central contenant les vaisseaux du xylème. Après avoir traversé la membrane plasmique de la face interne de l'endoderme, les ions peuvent à nouveau reprendre le chemin apoplastique. Il reste néanmoins possible qu'une faible partie de l'absorption des ions se fasse par l'apoplasme complètement. En effet, certaines cellules de l'endoderme, nommées cellules de transfert ne sont pas subérifiées (Cecchi., 2008).

Le Pb^{2+} présent dans la solution du sol se lie aux groupements carboxyle de l'acide uronique composant le mucilage autour des racines (Sharma et Dubey., 2005). Ce mucilage permet donc de restreindre le passage du plomb à l'intérieur des cellules racinaires, et constitue ainsi une protection du système racinaire. Une fois adsorbé à la surface des racines, la voie apoplastique pourrait être une voie importante pour le plomb qui peut être immobilisé par les charges négatives des parois cellulaires (espace libre de Donnan). Il aurait donc tendance à s'accumuler dans l'espace libre, étant fortement lié aux groupements carboxyliques des composés pectocellulosiques des parois. Des études

ont montré que le plomb était majoritairement présent dans l'apoplaste et que seule une faible proportion pénétrait dans l'endoderme (Patra et *al.*, 2004).

Si les sites apoplastiques de fixation du Pb^{+2} ne sont pas suffisamment nombreux, l'élément peut intégrer le symplasme. Les cellules des tissus concernés le séquestrent dans des vacuoles (Antosiewicz et Wierzbicka., 1999) et le rendent ainsi inactif. Le plomb entrant dans les cellules sous forme ionique est rapidement lié à des chélateurs internes tels que le glutathion ou les phytochélatines (Mehra et *al.*, 1995).

3.2- La translocation du plomb vers les parties aériennes

Une fois pénétrée dans le système racinaire, la très grande majorité du plomb va y rester (Huang et *al.*, 1997). Bien qu'il existe quelques espèces capables de transférer de grandes quantités de ce métal vers les parties aériennes, la racine agit comme une barrière très efficace contre les mouvements du plomb à l'intérieur de la plante (Pourrut., 2008).

Les bandes de Caspary peuvent en effet être un facteur majeur limitant le franchissement de l'endoderme jusqu'au cylindre central (Sharma et Dubey., 2005).

Les éléments prélevés dans le sol par les racines doivent être transportés dans le cortex puis déversés dans les vaisseaux du xylème (par circulation de la sève brute). Ce flux d'ions métalliques dans le xylème nécessite leur chélation à des acides organiques (tels que le citrate) ou à des acides aminés (comme l'histidine) (Briat et Lebrun., 1999).

Le transport des éléments toxiques par le phloème est moins important du fait que les cellules qui le constituent sont vivantes et forment un piège supplémentaire (Greger., 1999).

3.3- L'effet du plomb sur la plante

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

- Absorption des nutriments : Altération dans l'absorption des cations (K^+ , Ca^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} , Fe^{3+}) et des anions (NO_3^-)
- Régimes de l'eau : Diminution dans les composés maintenant la turgescence et la paroi cellulaire, le volume de cellules de garde, l'ouverture des stomates, le niveau de l'acide abscissique et la surface des feuilles.
- La photosynthèse des chloroplastes :
 - Altération de la composition des lipides des membranes des thylakoïdes.
 - Diminution dans la synthèse de chlorophylle, plastoquinone, caroténoïdes, activité de l'NADP oxydoréductase, le transport des électrons et l'activité des enzymes de cycle de Calvin.

- Irrégularités des Mitotiques nucléaire : Augmentation dans les formes irrégulières, décomposition du matériel nucléaire, propriété collante des chromosomes, les ponts d'anaphase, c- mitose et la formation des micronucléus.
- La respiration des mitochondries : Diminution dans le transport des électrons, des protons et l'activité enzymatique du cycle de Krebs.

3.4- Les mécanismes de tolérance des plantes au plomb

Les plantes cultivées dans un milieu contaminé par le plomb présentent un ralentissement de leur développement et une inhibition de la croissance des racines et des parties aériennes. Leurs feuilles ont généralement une surface inférieure à celle des témoins et des chloroses peuvent apparaître. Dans certains cas la présence de Pb peut mener à une mort des cellules (Seregin et Ivaniov., 2001).

La présence de Pb^{2+} dans le milieu extérieur induit une compétition avec les ions minéraux au niveau des transporteurs cellulaires altérant la perméabilité membranaire et induisant une carence en éléments nutritifs dans les plantes (Marschner., 1995).

A la surface des racines, les ions Pb^{2+} se lient aux groupements carboxyles des acides uroniques du mucilage sécrété par les cellules racinaires. Ainsi, celui-ci forme une barrière protectrice du système racinaire (Morel et *al.*, 1986).

Ces plantes hyper-accumulatrices utilisent alors des mécanismes spécifiques de tolérance pour détoxifier les métaux ou pour les rendre non disponibles pour leurs actions toxiques (Aoun., 2009). Marmioli et *al.* (2005) ont proposé l'idée que les plantes possèderaient deux mécanismes de séquestration/détoxication du plomb :

- l'un constitutif, correspondant à la liaison du plomb aux composants cellulaires
- l'autre inductible, correspondant à des molécules pouvant chélater le métal (phytochélatines).

Deux stratégies sont ainsi observées : l'exclusion qui consiste à éviter l'absorption des métaux, présents à concentrations élevées dans le sol et, l'accumulation voire l'hyperaccumulation, qui se traduit au contraire par une absorption importante des métaux, qui se réalise également avec de faibles concentrations en métal dans le sol (Aoun., 2009).

III- LA DEPOLLUTION DU SOL

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. Nous n'aborderons pas les conséquences de ces pollutions sur les écosystèmes mais plutôt comment des sols peuvent être dépollués. Cette accumulation peut être très importante aux abords des sites industriels et dans ce cas, la seule solution est l'excavation et le retraitement. C'est le concept de phytoremediation ou dépollution des sols par des plantes (Dabouineau et *al.*, 2005).

1- La phytoremediation

La phytoremédiation (grec phyto : plante, latin remedium : corriger un méfait) 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 dix dernières années ont contribué à améliorer le processus et à étendre son champ d'application (Jemal et Ghorbal., 2002).

Plusieurs études ont identifié des espèces végétales hyper accumulatrices, principalement des halophytes très prometteuses pour le dessalement des sols salins. La comparaison de la salure des sols en début et à la fin de l'expérimentation a également montré l'aptitude des halophytes à extraire une quantité appréciable de sel (Abdelly., 2006).

Un métal est dit hyperaccumulé lorsque sa masse dans les différents tissus de la plante est supérieure à 0,1 % de la masse sèche de la plante, soit 1 g / kg (Baker et Brooks., 1989). Il existe cependant des exceptions à cette définition (Huang et *al.*, 1998).

2- Les différentes techniques de phytoremédiation

➤ **La phytoextraction:** Elle utilise des plantes capables de prélever les éléments traces toxiques et de les accumuler dans les parties aériennes qui seront ensuite récoltées puis incinérées (Jemal et Ghorbal., 2002).

Les espèces végétales concernées absorbent, concentrent et stockent les métaux toxiques du sol contaminé dans leurs organes aériens (Gisbert et *al.*, 2003) celle-ci nécessite une répétition de cycles de culture avec récolte de la biomasse à la fin de chaque cycle de manière à ne présenter aucun risque de contamination pour l'environnement (Blaylock et Huang., 2000).

➤ **La rhizofiltration :** Correspond à l'utilisation des racines pour absorber et accumuler les polluants (métaux) des eaux usées (Jemal et Ghorbal., 2002), mettant en jeu leurs systèmes racinaires d'où le terme de rhizofiltration (Chaudhry et *al.*, 1998).

➤ **La phytostabilisation :** Elle consiste à installer des végétaux tolérants la présence de polluants toxiques dans le sol. Ils peuvent également sécréter des substances qui stabilisent chimiquement les métaux lourds au niveau de la rhizosphère, évitant en particulier leur migration vers les eaux de ruissellement et souterraines. Les plantes pouvant également accumuler les métaux lourds dans leur système racinaire sont intéressantes pour la phytostabilisation (Jemal et Ghorbal., 2002).

➤ **La phytovolatilisation:** c'est l'utilisation des plantes pour extraire les polluants du sol et les transformer en composés volatils (Jemal et Ghorbal., 2002), peu ou pas toxiques et les relâchant dans l'atmosphère via leurs feuilles (McGrath., 1998)

➤ **La phytodégradation:** c'est l'utilisation de l'association plantes/microorganismes pour dégrader les polluants organiques du sol (Jemal et Ghorbal., 2002).

Dans une autre définition, La phytodégradation est l'accélération de la dégradation des composés organiques polluants (hydrocarbures, pesticides, explosifs...) en présence de plante.

Cette dégradation peut avoir lieu soit hors de la plante, grâce à l'activité des microorganismes présents dans l'environnement des racines (rhizosphère), soit dans la plante après absorption du composé puis dégradation dans les cellules, les plantes produisent des enzymes qui aident catalyser et accélérer les réactions chimiques de dégradation.

Les structures moléculaires complexes des contaminants sont dégradées dans des molécules plus simples et moins toxiques (Rudolph., 2010).

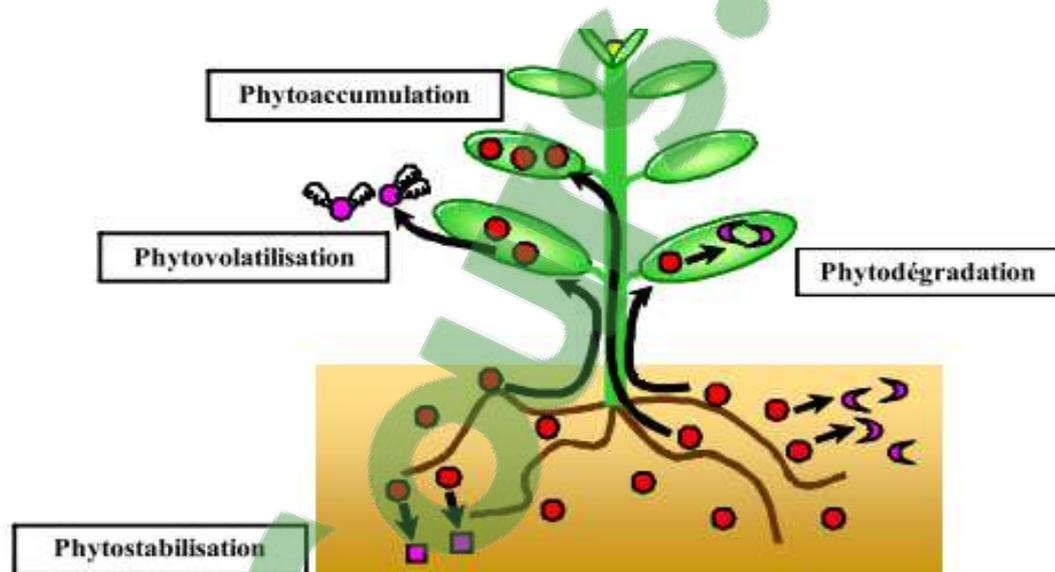


Fig. 1- Les différentes techniques de phytoremédiation (Moussavou Moudouma., 2010)

Donc, ce schéma représente les ETM (en rouge) qui peuvent s'accumuler dans la plante en conservant la même forme, ou ils peuvent être transformés de différentes manières : Dégradation dans le sol ou dans la plante (le symbole rose en croissant), volatilisation dans l'atmosphère (les ronds ailés), ou stabilisation dans le sol (les carrés).

3- Avantages et inconvénients de la phytoremédiation :

3.1- Les avantages

La technique présente de nombreux avantages :

- Par comparaison avec les traitements physico-chimiques, la phytoremédiation montre un faible coût (se situe en moyenne entre 2 et 100 dollars / m³).
- Ce faible coût permet de traiter de grandes surfaces.
- Elle provoque une perturbation minimale de l'environnement et permet même de réinitier le cycle de dégradation de la matière organique là où la végétation avait disparu.
- La décontamination par les plantes présente aussi l'avantage de réduire l'érosion et le lessivage des sites, ce qui maintient le polluant à proximité de la plante (Berti et al., 1995).
- Très peu de modification de la topographie existante du site.
- récupération et réutilisation de métaux de valeur peut être possible (des entreprises se spécialisent dans le « hytominage ») (Rudolph., 2010).

3.2- Les inconvénients

En regard de ses nombreux avantages, la phytoremédiation ne présente que peu de limitations :

- La phytoremédiation est limitée à la surface et la profondeur occupée par les racines- environ 80 cm (noter que de nombreux polluants à base de métaux restent aussi dans la couche de sol supérieure); peut-être plus profond en cas d'utilisation d'arbres.
- Le temps: croissance lente et biomasse faible demandent un investissement en temps assez important pour la dépollution pouvant aller jusqu'à des dizaines d'années.
- On ne peut pas, avec des systèmes de remédiation à base de plantes, totalement empêcher l'écoulement des contaminants dans la nappe phréatique.
- 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).
- Problème de multi-pollutions qui limite le choix des plantes.
- Possible de bioaccumulation de contaminants passant dans la chaîne alimentaire, du niveau des consommateurs primaires à ceux du niveau secondaire. Il est essentiel de disposer des plantes de façon responsable, et de ne pas consommer des plantes utilisées pour nettoyer un terrain (Rudolph., 2010).

D'après Rudolph (2010), il faut noter qu'il y a des recherches en cours concernant les plantes génétiquement modifiées pour améliorer la capacité hyperaccumulatrice de ces plantes afin de trouver des plantes plus résistantes à des niveaux de pollutions élevés, comme par exemple : *Eichornia crassipes* L., *Brassica*, *Festuca*, *Trifolium pratense* L..

IV- LA PLANTE : l'atriplex

L'atriplex est une plante arbustive, appartenant à la famille des Amaranthaceae qui comprend 1400 espèces, réparties en une centaine de genres. Le genre atriplex comprend environ 417 espèces dans le bassin méditerranéen (Le houerou., 1992).

En Afrique du nord, le genre *Atriplex* comprend 15 espèces spontanées et 2 espèces introduites, soit 7 espèces vivaces, 1 bisannuelle et 9 annuelles (Franclét et le houerou., 1971).

Les plantes du genre *Atriplex* sont des halophytes présentes dans la plupart des régions du globe. Ce sont des plantes qui poussent sur des terrains riches en chlorures et nitrates (terrains salés) (Le houerou., 1992). Ces plantes élèvent leur concentration osmotique à un niveau supérieur à celui du sol et accumulent une grande quantité de sels. Les *Atriplex* semblent actuellement les plantes les mieux adaptées pour stabiliser et augmenter la production fourragère en climat semi-aride et aride. Ils sont susceptibles de mettre en valeur des terres où la végétation naturelle est profondément dégradée et la production agricole très irrégulière; ou encore des terres chargés en sels sur les quelles peu d'espèces peuvent se développer. Leur production fourragère, bien qu'ayant un maximum en fin de printemps, peut être exploitée dans certains milieux presque, toute l'année (Froment., 1972).

En Algérie, l'*Atriplex* est spontané dans les étages bioclimatiques semi-aride et arides, les plus grandes superficies correspondent aux zones dites steppiques (Tébessa, Batna, M'sila, Boussaâda, Biskra, Djelfa, Tiaret, Saida...). Le genre *Atriplex* se rencontre aussi sur le littoral et même au Sahara, particulièrement dans la région de Béchar où les nappes longent les dépressions d'Oued (Benrebiha., 1987).

1- Classification

Pour *Atriplex halimus* L:

- **Nom scientifique:** *Atriplex halimus*
- **Nom vernaculaire français:** arroche halime ou pourpier de mer (Baba Sidi-Kaci., 2010).
- **Nom arabe:** G'ttaf, il est connu à l'Ouest Algérien et au Maroc sous le nom de "Chenane" (Aboura., 2005).

Pour *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt. :

- **Nom scientifique:** *Atriplex canescens*
- **Noms communs:** Saltbush Fourwing, quatre aile Saltbush, chamise, Chamize, Chamiso, Shadscale (<https://lookformedical.com>).

Tableau 1 - La classification de l'*Atriplex halimus* et l'*Atriplex canescens* selon deux classifications différentes.

Classification	<i>Atriplex halimus</i> L. (Chadefaut et Emberger., 1960)	<i>Atriplex canescens</i> (Pursh) Nutt. (Baba Sidi-Kaci., 2010)
Règne	Végétal	Végétal
Embranchement	Spermaphytes (Phanérogames)	Spermaphytes (Phanérogames)
S/Embranchement	Angiospermes	Angiospermes
Classe	Dicotylédones	Dicotylédones
S/classe	Apétales (Caryophyllidées selon APG II (2003))	Apétales (Caryophyllidées selon APG II (2003))
Ordre	Centrospermales (Caryophyllales selon APG II (2003))	Centrospermales (Caryophyllales selon APG II (2003))
Famille	Chénopodiacées (Amaranthacées selon APG II (2003))	Chénopodiacées (Amaranthacées selon APG II (2003))
Genre	<i>Atriplex</i>	<i>Atriplex</i>
Espèce	<i>Atriplex halimus</i> L.	<i>Atriplex canescens</i> (Pursh) Nutt.

2- *Atriplex halimus* L.

L'origine de cette espèce n'est pas bien connue, certains auteurs présumant qu'elle est native d'Afrique du Nord où elle est très abondante (Kinet et al., 1998), selon ces mêmes auteurs, il paraît qu'elle tolère bien les conditions climatiques et pédologiques des régions arides et semi-arides comme la sécheresse et la salinité.

D'autres estiment qu'elle est d'origine d'Australie, et s'étend aux parties arides et semi-arides du monde (Osman et Ghassalie., 1997).

C'est une espèce spontanée qui croît en bord de la mer sur le littoral de la Méditerranée, à l'intérieur de l'Algérie et de la Tunisie dans les sols un peu salés (Ozenda., 1977).

Dans l'Algérie, certaines espèces sont menacées de disparaître (Chamard., 1993), d'autre manifestent des mécanismes d'adaptation (Batanouny., 1993), c'est le cas des atriplex dans ces régions (Benabadji et Ghazlaoui., 2007).

En Algérie, des essais ont été réalisés sur le cordon dunaire dans la région de Djelfa et Boussaâda avec plusieurs espèces d'atriplex semblent donné des résultats satisfaisants dans la fixation des dunes (Benrebiha., 1987).

3- Description

C'est une plante spontanée vivace, ayant une tige dressé d'une couleur blanche-grisâtre, à racine blanchâtre s'orientant horizontalement pivotante en surface atteindre 3 à 5 fois la longueur de tige (Benrebiha., 1987), elle est très ramifiée, formant des touffes pouvant atteindre 1 à 3 m de diamètre (Bouchoukh., 2009).

Les feuilles d'*Atriplex halimus* sont alternes, pétiolées, plus au moins charnues, couvertes de poils vésiculeux blanchâtres, ovales, assez grandes et font 2 à 5 cm de longueur et 0,5 à 1 cm de largeur (Maalem., 2002).

Les fleurs sont unisexuées, monoïques jaunâtres, elles se regroupent en panicule allongées terminales (Kinet et al., 1998).

Les fruits composés par les deux bractéoles, arrondies en rêne, dentées ou entières, lisses ou tuberculeuses. La graine est verticale, lenticulaire de couleur brune foncée de 2 mm de diamètre environ. Elle est terne et entourée de péricarpe membraneux (Nègre., 1961).

4- Importance de l'*Atriplex halimus* L.

En effet, ces plantes possèdent un système racinaire très développé qui leur permet d'utiliser les réserves d'eau du sol et de former un réseau dense susceptible d'agréger le sol et de le rendre résistant à l'érosion (Dutuit et al., 1991).

En plus, ces racines peuvent fixer les couches supérieures du sol et donc considérer comme un moyen de lutte contre la désertification (Belkhodja et Bidai., 2004).

Ces plantes sont utilisées dans des terres où la végétation naturelle est profondément dégradée et la production agricole très irrégulière, ou dans des terres chargées en sel pour les déssaliniser (Benrebiha., 1987).

L'*Atriplex halimus* est utilisé fondamentalement comme plante fourragère. Son feuillage persistant, riche en protéines, est très apprécié durant la longue période de sécheresse estivale alors que les espèces herbacées ont disparu, cette plante peut produire jusqu'à cinq tonnes/hectare de matière sèche par an sur des sols dégradés ou salins inutilisables pour d'autres cultures (Dutuit et al., 1991).

C'est une plante bien adaptée à l'aridité, et constitue une source importante de fourrage pour les ovins (Abu-Zanat., 1995).

L'atriplex est une plante nutritive, riche en protéine (Francllet et Le houerou., 1971), en vitamines C, A, et D, et sels minéraux (Benrebiha., 1987).

Cette plante est aussi utilisée comme plante médicinale dans la pharmacopée traditionnelle (Dutuit et *al.*, 1991). Elle était préconisée aux malades présentant les symptômes de diabétiques.

Au Sahara occidental, les cendre de l'*Atriplex halimus*, reprise par l'eau, sont utilisées dans le traitement de l'acidité gastrique, les graines sont ingérées comme vomitif (Bellakhdar., 1997).

Les atriplex présentent une bonne tolérance aux conditions défavorables du milieu, l'*Atriplex halimus* L. supporte des concentrations de chlorure de sodium (NaCl) voisines de celles de l'eau de mer (30 g/l) (Zid et Boukheris., 1977).

L'examen de la répartition du genre atriplex, montre que la plupart des espèces se situent dans les régions où les précipitations varient entre 200 et 400 mm/an (Francllet et Le houerou., 1971). L'atriplex supporte des températures minimales de 5 à 10°C (Froment., 1972) et selon (H.C.D.S., 1996), l'*Atriplex halimus* peut supporter jusqu'à -10°C.

Selon Froment (1972), cette espèce peut s'adapter à des milieux divers, mais elle préfère les sols limoneux. Par contre l'*Atriplex canescens* se développe mieux dans les sols sableux et argileux.

5- *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt.

Espèce originaire du nord-ouest Américain, on la trouve au Colorado, Utah, Wyoming, Nevada, New Mexico, Ouest du Texas et le Nord du Mexique (Maalem., 2002). Elle s'est largement propagée en Afrique du Nord et au Moyen-Orient. Elle est cultivée dans les étages humides et subhumides, semi arides et arides (H.C.D.S., 1996).

6- Description

L'*Atriplex canescens* (Pursh) Nutt. est un arbuste buissonnant de 1 à 3 m de hauteur, formant des touffes de 1 à 3 m de diamètre. Les rameaux blanchâtres sont étalés, ascendants ou arqués, retombants vers l'extrémité. Les feuilles courtement pétiolées ou sub-sessiles, sont alternes, et leur limbe linéaire, lancéolé, uni nervé et vert grisâtre. Il peut atteindre 3 à 5 cm de longueur et 0,3 à 0,5 cm de largeur.

Les inflorescences dioïques en épis simples ou panicules sont au sommet des rameaux pour les fleurs mâles et axillaires ou en épis sub-terminaux pour les fleurs femelles (Benrbiha., 1987).

Les fleurs mesurent de 2 à 3 mm de long (Diggs et *al.*, 1999), les graines sont étroitement contenu dans les valves et mesurent environ 1 à 2 mm de diamètre (Welsh et *al.*, 1987). *Atriplex canescens* est la seule espèce de ce genre dont le fruit possède 4 larges ailes (Howard., 2003) d'où le nom anglais de cette espèce " four wing " : four = quatre, wing = aile.

Le système racinaire est très développé, formé d'une racine principale pouvant atteindre 6 m de profondeur et de racines latérales occupant les couches supérieurs du sol (Barrow., 1997).

7- Importance de l'*Atriplex canescens* (Pursh) Nutt.

La plante vivante est résistante au feu (s'enflamme difficilement) est utilisée dans la lutte contre le feu. Elle est considérée comme " a fire retardant " (Brown et *al.*, 2000) .

L'*Atriplex canescens* permet d'assurer la stabilisation dans les horizons superficiels du sol d'éléments comme le barium, chrome et nickel. Cette espèce permet de lutter efficacement contre l'érosion éolienne (Glenn et *al.*, 2001).

Cette espèce fournit le fourrage pour toutes les classes de bétail sauvage comme les cerfs communs, les élans, les mouflons d'Amérique ou domestique telles les moutons et les chèvres (USDA/NRCS., 2002). L'*Atriplex canescens* est utilisée généralement en automne et en hiver, quand les autres plantes sont rares et leurs teneurs en protéine, en phosphore et en énergie sont élevées (Otsyina et *al.*, 1982).

Elle est caractérisée par les plus faibles valeurs de protéines digestibles et d'azote total digestible; par conséquent les valeurs d'énergie digestible et d'énergie métabolisable par kg de matière sèche sont pénalisées tandis que les valeurs nutritionnelles relatives à *Atriplex lentiformis* et *nummularia* sont plus favorables (Silva et Pereira., 1976).

8- L'utilisation des atriplex en phytoremédiation

Plusieurs atriplex sp. ont des caractéristiques excellentes qui contribuent beaucoup à la réduction de l'érosion éolienne et hydrique du sol par la structure de son système racinaire (Grantz et *al.*, 1998), et par leur port rampant et marcottant naturellement (Dutuit., 1999).

Certains estiment qu'elle pourrait contribuer à la désalinisation des sols, dans les régions arides (Das sarma et Arora., 2001). Il est possible d'extraire d'un hectare 1100 Kg de NaCl en une année de cultures (Le houerou., 1971).

De même, les espèces d'atriplex annuelles sont connues pour contenir de fortes teneurs en fer, en manganèse, en aluminium et en molybdène (Voorhees et *al.*, 1991), ainsi que le sélénium en grandes quantités, dans ce dernier cas, la plante pourrait être capable d'en assurer la volatilisation (Vickerman et *al.*, 2002).

Des études récentes ont permis de souligner le caractère prometteur de l'*Atriplex halimus* qui, soumise à une importante dose de cadmium ou de zinc, est capable d'accumuler des quantités importantes de ces éléments sans présenter d'inhibition de croissance ou d'augmentation de la mortalité (Lutts et *al.*, 2004).

Les arbustes des zones salines naturelles sont coupés et utilisés pour la production importante de combustible par les habitants de ces lieux (Lailhacar et *al.*, 1996).

Dans les pays arides où existe de vastes superficies où l'on trouve une eau souterraine saline peu profonde ; on peut y planter des espèces tolérantes au sel pour pomper cette eau profonde grâce à leur système racinaire très développé (El Mzouri et *al.*, 2000).

Les arbustes qui atteignent environ 50 cm de haut et 6 mètres de diamètre, constituent un moyen possible d'éviter la poussière et d'améliorer à la fois les conditions d'existence et l'esthétique des lieux (Dutuit et *al.*, 1991).



**MATERIEL
ET METHODES**

CHAPITRE II – MATERIEL ET METHODES

1-Matériel végétal

Deux espèces du même genre : *Atriplex halimus* L. et *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt. sont mises en évidence.

Les graines de la première espèce sont récoltées de l'atriplexais du campus de l'Université d'Oran (l'IAP) au mois de Novembre 2012, les autres graines de la deuxième espèce proviennent de la région de Djelfa (de la station d'El Mesrane) de l'année 2011.

2- Méthodes

a- Préparation des graines

Les graines sont décortiquées manuellement, désinfectées à l'eau de javel à 8% pendant 5 minutes puis rincées abondamment à l'eau distillée pour éliminer toute trace de chlore. Elles sont ensuite imbibées puis sont mises à germer à moyenne de 10 graines par boîte de Pétrie tapissées de papier filtre dans l'étuve à 25°C pendant 5 à 7 jours et arrosées par de l'eau distillée.



Fig. 2- Graines de l'*Atriplex halimus* L.



Fig. 3- Graines de l'*Atriplex canescens* (Pursh) Nutt.

b- Préparation des plantules

On déplace les graines germées dans des alvéoles remplies de terreau à la serre contrôlée de l'Université de l'IAP, et on les laisse jusqu'au stade plante de cinq à six feuilles.



Fig. 4 - *Atriplex halimus* L.
après 25 jours de semis



Fig. 5- *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt.
après 25 jours de semis

c- Préparation du substrat

Le substrat utilisé dans ce travail est constitué du sable prélevé au bord de la mer et de la tourbe achetée du magasin.

Avant d'utiliser le sable, on passe par 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 mélangé avec de l'eau pour le lavage, dans le but d'éliminer le sel, et bien sûr on termine par le rinçage avec de l'eau distillée. À la fin, on le sèche à l'air libre.

Après ces préparations, le sable est mélangé à la tourbe (2V/V) et mis dans différents pots à raison de 700 g par pot, en respectant la capacité de rétention nécessaire pour chaque plante.

d- Repiquage

Les plantes des alvéoles âgées de 25 jours sont ensuite repiquées dans des pots en plastique remplis d'un mélange de sable et de terreau (2V/V) à fond tapissé d'une couche de graviers pour assurer le drainage.

Les plantes atteignent après deux mois à peu près 45 à 55 cm de hauteur de la partie aérienne.



Fig. 6- Dispositif expérimental des plantes d'*Atriplex halimus* L. de 70 jours



Fig. 7- Dispositif expérimental des plantes d'*Atriplex canescens* (Pursh) Nutt. de 70 jours

e- Préparation de la solution de l'arrosage

Les plantes sont arrosées par de l'eau distillée deux fois par semaine et par la solution nutritive une fois par semaine, pendant 70 jours jusqu'à l'application du stress métallique.

Tableau 2- Composition de la solution nutritive de Hoagland (1938).

Produit	Formule chimique	Concentration en g.l ⁻¹
Nitrate de potassium	KNO ₃	191.90
Nitrate de calcium	(NO ₃) ₂ Ca 4H ₂ O	129.80
Nitrate d'Ammonium	NO ₃ NH ₄	210
Sulfate de magnésium	SO ₄ Mg 7H ₂ O	61.5
Phosphate monopotassique	PO ₄ H ₂ K	54.40
Hydrogenophosphate di-potassium	PO ₄ K ₂ H 3H ₂ O	34.23
Chlorure de manganèse	Cl ₂ Mn 4H ₂ O	1.80
Sulfate de cuivre	CuSO ₄ 5H ₂ O	0.176
Sulfate de zinc	Zn SO ₄ 7H ₂ O	0.219
Acide borique	H ₃ BO ₃	2.861
Molybdate d'ammonium	MO ₇ O ₂₄ (NH ₄)7H ₂ O	0.285
Complexe ferrique EDTA ferrique	(C ₁₀ H ₁₂ FeN ₂ NaO ₈)	0.050

f- Préparation de la solution de stress

Le stress appliqué sur ces plantes est réalisé par le nitrate de plomb ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$), dont les concentrations sont les suivantes :

- La concentration 1 : Témoin sans nitrate de plomb.
- La concentration 2 : 1000 ppm de nitrate de plomb.
- La concentration 3 : 5000 ppm de nitrate de plomb.
- La concentration 4 : 10000 ppm de nitrate de plomb.

Remarque :

1000 ppm = 1 g.l^{-1} .

g- Dispositif expérimental

Nous avons réalisé cette expérimentation par le biais de 4 traitements, à raison de 5 pots par traitement (5 répétitions) pour chaque espèce.

Le stress est appliqué sur les deux espèces d'atriplex âgés de 70 jours pendant une semaine en respectant la capacité de la rétention.

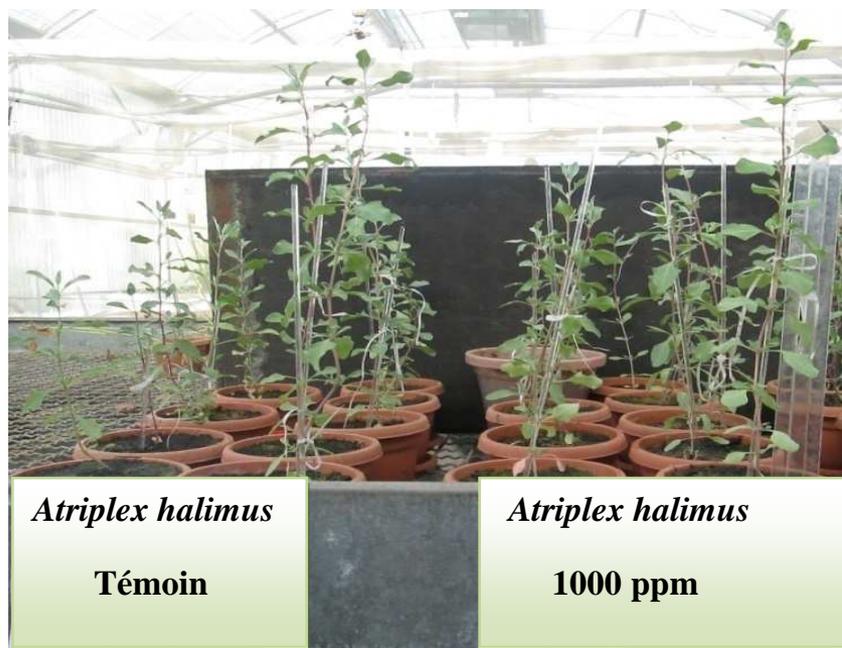


Fig. 8- Dispositif expérimental des plantes d'*Atriplex halimus* L. après le stress (Pour le témoin et 1000 ppm)



Fig. 9- Dispositif expérimental des plantes d'*Atriplex halimus* L. après le stress
(Pour 5000 et 10000 ppm)

h- Prélèvement et préparation du matériel végétal pour les analyses

Les plantes soumises à une semaine de stress, on commence la préparation de matériels expérimentaux par le déterrement des plantes de ses substrats à l'aide de l'eau de robinet, on rince rapidement les racines par de l'eau distillée en assurant de ne laisser aucune trace de substrat sur les racines et pour ne pas fausser les résultats des analyses après.



Fig. 10- *Atriplex halimus* L.
après le déterrement (Le témoin)



Fig. 11- *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt.
après le déterrement (Le témoin)

Ensuite, on sépare les feuilles et les racines de chaque plante de sa tige, et on les met, séparément, dans un papier d'aluminium avec des rotations.

Après la séparation de tous les organes, les lots de chacun des organes sont étuvés pendant 48 heures à 80°C pour les broyer à l'aide d'un mortier. La fine poudre obtenue est mise dans des piluliers fermés hermétiquement avec des bouchons plasmas; le tout est déposé dans un congélateur pour la suite des opérations.



Fig. 12- Des piluliers contiennent des broyages des feuilles et des racines d'*Atriplex halimus* L. et d'*Atriplex canescens* (Pursh) Nutt.

i- Extraction et dosage des composés

i.1-Extraction et dosage de la proline

➤ Extraction

L'extraction à l'éthanol modifiée par Nguyen et Paquin en 1971 consiste à utiliser la méthode suivante :

100 mg de matériel végétal sec est broyé avec 1,25 ml d'éthanol concentré à 95% dans un mortier, suivi de trois rinçages et lavages avec 1,25 ml d'éthanol 70% à chaque fois, la solution finale obtenue d'environ 5 ml, est recueillie dans un tube à essais.

On le laisse pendant 1 heure afin qu'on obtienne deux phases :

-La phase supérieure : de couleur verte claire contenant des acides aminés, des sucres, des acides organiques et d'autres composés.

-La phase inférieure : de couleur verte foncé contenant la chlorophylle et des lipides.



Fig. 13- Des tubes représentant les deux phases obtenues pendant l'extraction

On prélève 2,5 ml du surnageant, on le met dans un autre tube aux quel sont ajoutés 1ml de chloroforme et 1,5 ml d'eau distillée.



Fig. 14- Les tubes avant agitation



Fig. 15- Les tubes après agitation

Après agitation, la solution est maintenue au repos pendant 24 heures au froid pour une bonne séparation.

On distingue deux phases :

- Une phase supérieure : incolore contenant des acides aminés.
- Une phase inférieure : jaune verdâtre ou marron.



Fig. 16- Des tubes représentent la séparation après refroidissement (après 24 h)

➤ Dosage

Le dosage de la proline est réalisé selon la technique de Bergman et Loxley en 1970.

On met dans un tube à essais 1 ml de la phase supérieure du milieu d'extraction, on ajoute 2 ml de NaCl à 5M et 5 ml d'eau distillé, puis on passe à l'agitation.

On prend 2 ml de la dernière solution et on la met dans un autre tube, on ajoute 2 ml de la solution tampon phosphate, dont les caractéristiques sont les suivantes :

pH=3, $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ à 3,88 M + H_3PO_4 à 5,32 M et 4 ml de ninhydrine (préparée à 0,125 g de ninhydrine dans 2 ml de H_3PO_4 à 6 M dans 3 ml d'acide acétique glacial).

Après agitation et ébullition au bain marie à 100°C pendant 1 heure pour le développement de la coloration, les tubes sont laissés à la température ambiante pour refroidir durant 30 min à l'obscurité.

La densité optique est lue au moyen d'un spectrophotomètre à 515 nm.

i.2- Extraction et dosage des sucres solubles

L'extraction et le dosage sont faits par la méthode de Shilds et Burnett (1960) modifiée par Lewicki (1993).

➤ **Extraction**

Elle consiste à prendre 100 mg de matériel végétal à broyer dans 5,25 ml d'éthanol à 80 % pendant 24h à température ambiante.



Fig. 17- Les tubes pendant l'extraction

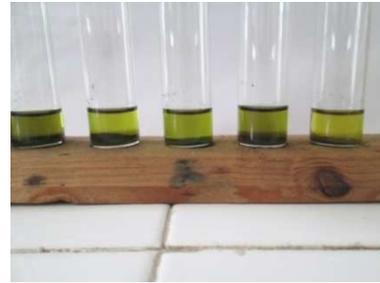


Fig. 18- Les tubes après 24h

Ensuite cet extrait (a) est dilué 10 fois à l'éthanol à 80%.

➤ **Dosage**

On prélève 2 ml de la solution (a) dans un tube à essai, on ajoute 4 ml de réactif (b) qui se prépare comme suit : 2 g d'anthrone pure dans 1L d'acide sulfurique H₂SO₄.

L'ensemble est maintenu dans un bac à glace pendant 5 min pour diminuer la température des tubes après l'ajout de l'acide sulfurique.



Fig. 19- Les tubes pendant le refroidissement

Juste après, on met ces tubes dans le bain- marie à 92°C pendant 8 min, puis on les laisse reposer à l'obscurité pendant 30 min. La densité optique est lue à 585 nm.



Fig. 20- Les tubes après 8 minutes de chauffage dans le bain-marie

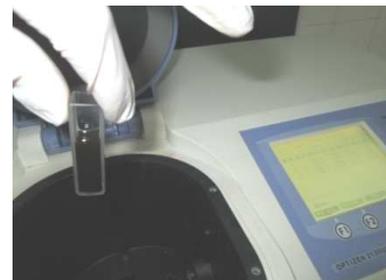


Fig. 21- la lecture par le spectrophotomètre

i.3- Extraction et dosage des éléments minéraux

L'extraction et le dosage des éléments minéraux sont faits par la méthode de Lafon *et al.* (1996) qui consiste à déterminer la composition en éléments minéraux d'une plante en procédant d'abord par calcination et puis par la destruction complète de la matière organique (Martin-Prevel *et al.*, 1984).

➤ Extraction

Après séchage de la poudre fine issue du broyage à l'étuve à 70°C pendant 16 heures, seulement 100 mg a été pris pour la calcination mis dans des creusets en porcelaine au four à moufle à 450°C pendant 2 heures.



Fig. 22- Les creusets dans le four à moufle



Fig. 23- Les échantillons après deux heures de calcination dans un bac de sable

Après refroidissement, 2ml d'acide nitrique (HNO_3) a été ajouté à chacun des échantillons, puis, les creusets ont été mis sur la plaque chauffante jusqu'à l'évaporation complète de cet acide, puis on les a remis au four une autre fois pour une heure.



Fig. 24- Les échantillons pendant l'évaporation



Fig. 25- Les échantillons après une heure de calcination

La cendre obtenue est dissoute dans 3 ml d'acide chlorhydrique (HCl) (6N), le volume a été amené par la suite à 50 ml (par de l'eau distillée). La solution obtenue sur laquelle le dosage de Na^+ , K^+ , et Ca^{2+} ont été effectués a été filtrée.

➤ Dosage

Pour la lecture des échantillons, on utilise le spectrophotomètre à flamme qui nous donne des valeurs en ppm, mais il faut qu'on prépare des solutions standards pour le calibrer.

a- La solution du potassium

Pour préparer une solution standard de potassium, il faut mettre 1g du chlorure de potassium (KCl) desséché dans une fiole jaugée d'un litre de capacité et compléter le volume avec de l'eau déminéralisée jusqu'au trait de jauge.

b- La solution du sodium

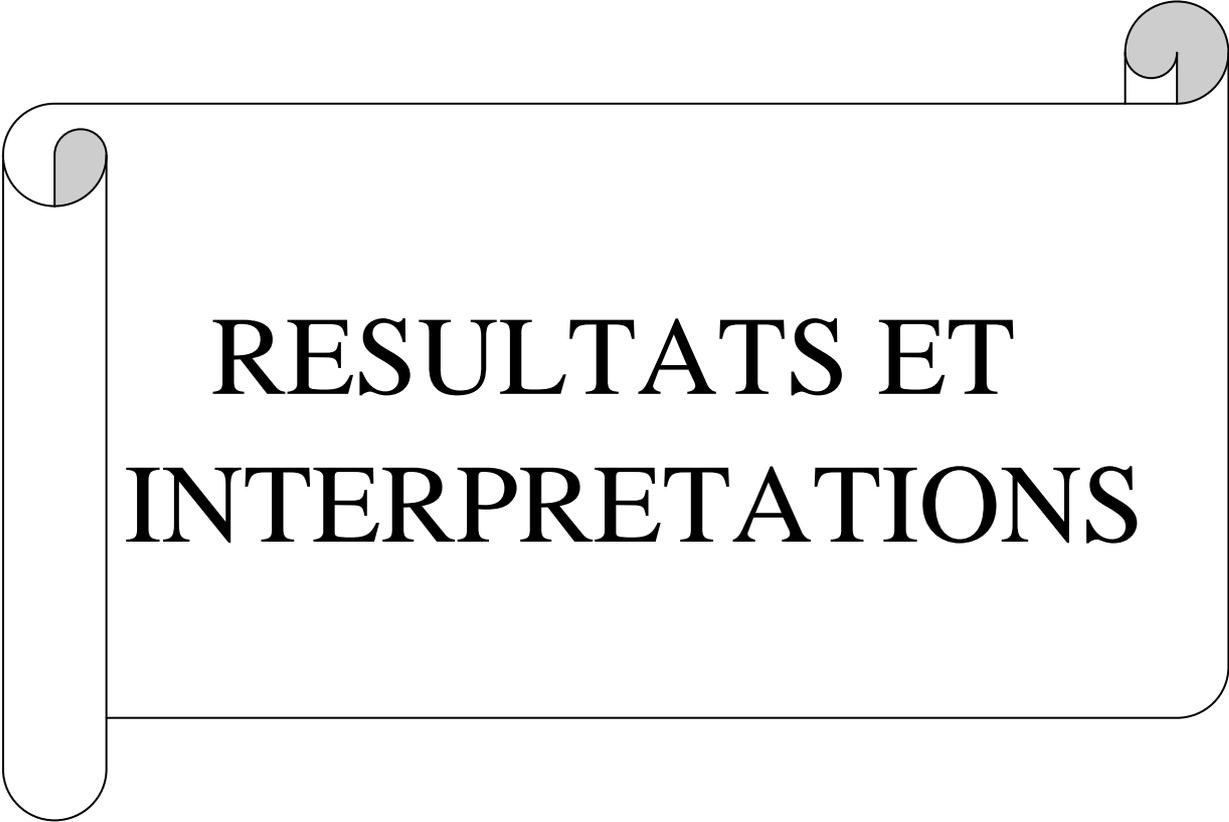
Pour préparer une solution standard de sodium, il faut mettre 1g du chlorure de sodium (NaCl) desséché dans une fiole jaugée d'un litre de capacité, dissoudre avec 8 ml d'eau déminéralisée et 8 ml d'HCl concentré et compléter le volume avec de l'eau déminéralisée jusqu'au trait de jauge.

c- La solution du calcium

Pour préparer une solution standard de calcium (1g.l^{-1}), il faut mettre 2.4973 g du carbonate de calcium (CaCO_3) desséché dans une fiole jaugée d'un litre de capacité, ajouter lentement goutte à goutte approximativement 8 ml d'HCl et compléter le volume avec de l'eau déminéralisée jusqu'au trait de jauge.



Fig. 26- La lecture par le spectrophotomètre à flamme



**RESULTATS ET
INTERPRETATIONS**

CHAPITRE III –RESULTATS ET INTERPRETATIONS

I- Teneur en proline des feuilles et des racines des plantes stressées au nitrate de plomb

1 – Plantes de l'*Atriplex halimus* L.

La figure 27 montre pour les plantes témoins une accumulation importante de la proline chez les feuilles par rapport aux racines (7.1 contre 5.9 $\mu\text{g}\cdot 100\text{ mg}^{-1}$ PS).

Pour les plantes stressées, au contraire, la proline s'accumule rapidement dans les feuilles sous le traitement au nitrate de plomb à 1000 ppm ce qui représente environ le double de la teneur enregistrée pour les feuilles témoins (13.7 contre 7.1 $\mu\text{g}\cdot 100\text{ mg}^{-1}$ PS); dès que la concentration en plomb quintuple, l'acide aminé chute légèrement jusqu'à 11 $\mu\text{g}\cdot 100\text{ mg}^{-1}$ PS. La solution enrichie à 10000 ppm de plomb déclenche de nouveau la synthèse de la proline pour atteindre dans les mêmes organes une teneur de 15 $\mu\text{g}\cdot 100\text{ mg}^{-1}$ PS.

Dans les racines, le composé aminé varie en augmentant avec la concentration de la solution de nitrate de plomb ; les teneurs passent de 6.6 $\mu\text{g}\cdot 100\text{ mg}^{-1}$ PS sous le traitement à 1000 ppm à 9.75 $\mu\text{g}\cdot 100\text{ mg}^{-1}$ PS sous le traitement à 10000 ppm.

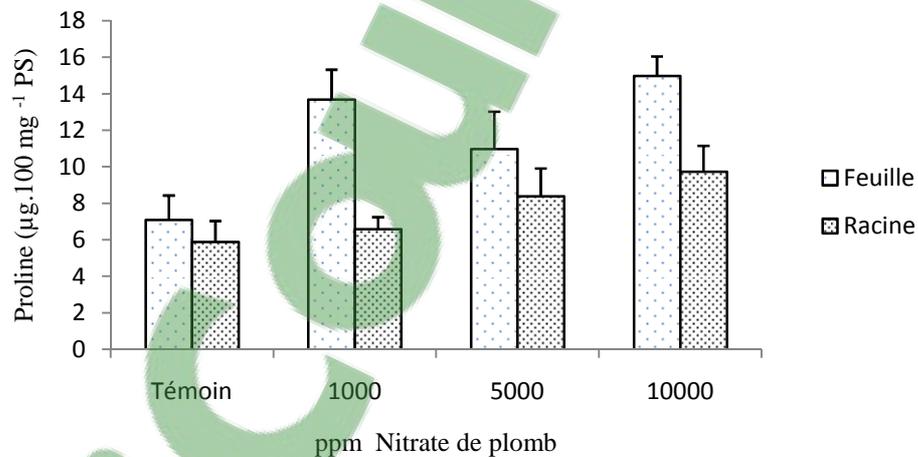


Fig. 27- Teneur en proline ($\mu\text{g}\cdot 100\text{ mg}^{-1}$ PS) des feuilles et des racines de jeunes plantes d'*Atriplex halimus* L. (âgées de 70 jours) stressées au nitrate de plomb.

L'analyse statistique à l'aide du test de Fisher à $P = 5\%$ montre un effet significatif ($P = 0.00$) du plomb sur la proline des feuilles stressées par le nitrate de plomb comparativement aux feuilles témoins.

Au niveau des racines, aucun effet significatif du stress ne se révèle entre les teneurs en proline des racines alimentées au nitrate de plomb à 1000 ppm par rapport au témoin ; par contre, le nitrate de plomb apporté aux concentrations 5000 et 10000 ppm provoque une accumulation significative en proline comparée au témoin (tableau 3).

En comparaison les teneurs en proline analysée dans les feuilles et les racines des plantes témoins, aucune différence significative ne se révèle. Par contre, les plantes réagissent à l'effet traitement au plomb sous les différentes concentrations puisque l'analyse statistique a indiqué des teneurs en proline des feuilles hautement significatives par rapport aux racines.

Tableau 3 - Test statistique de signification de Fisher (P = 5%) des teneurs en proline ($\mu\text{g} \cdot 100 \text{ mg}^{-1}$ PS) des feuilles et des racines d'*Atriplex halimus* L. stressées pendant une semaine au nitrate de plomb.

Nitrate de plomb en ppm	Feuilles	Racines	Feuilles/Racines
Témoin	7.1 \pm 1.34	5.90 \pm 1.14	NS
1000	13.7 \pm 1.63 S	6.60 \pm 0.65 NS	S
5000	11.0 \pm 2.03 S	8.40 \pm 1.51 S	S
10000	15.0 \pm 1.06 S	9.75 \pm 1.41 S	S

S : effet significatif du stress au nitrate de plomb sur l'accumulation de la proline

NS : effet non significatif

2- Plantes de l'*Atriplex canescens* (Purch) Nutt.

Pour les plantes témoins, la proline augmente légèrement dans les racines que dans la partie aérienne (7.9 pour 7.4 $\mu\text{g} \cdot 100 \text{ mg}^{-1}$ PS).

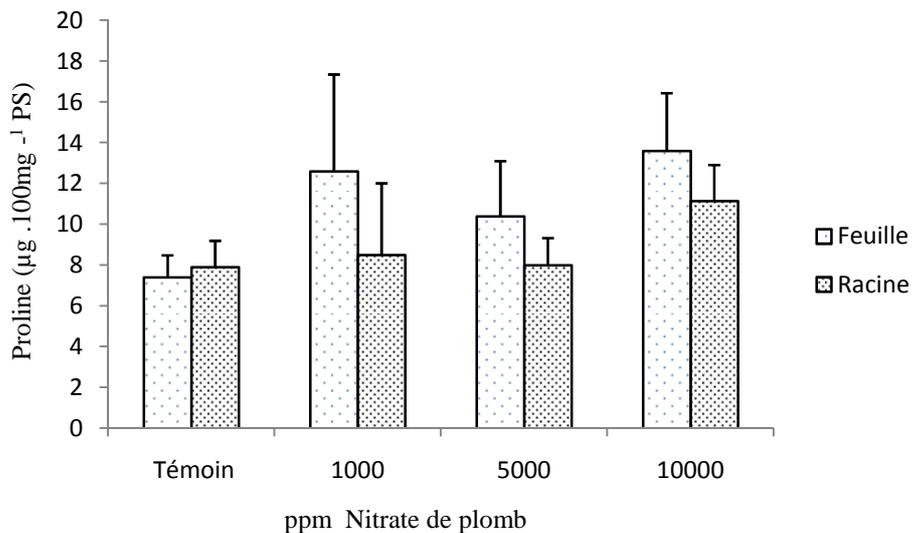


Fig. 28- Teneur en proline ($\mu\text{g} \cdot 100 \text{ mg}^{-1}$ PS) des feuilles et des racines de jeunes plantes d'*Atriplex canescens* (Pursh) Nutt. (âgées de 70 jours) stressées au nitrate de plomb.

A l'inverse, pour les plantes stressées, la proline s'accumule rapidement dans les feuilles sous le traitement au nitrate de plomb à 1000 ppm ($12.6 \mu\text{g}.100 \text{ mg}^{-1} \text{ PS}$), alors que lorsque la concentration en nitrate de plomb est apportée à 5000 ppm, l'acide aminé ralentit sensiblement ($10.4 \mu\text{g}.100 \text{ mg}^{-1} \text{ PS}$). Sous le traitement à 10000 ppm, la proline réaugmente de nouveau dans les feuilles jusqu'à $13.6 \mu\text{g}.100 \text{ mg}^{-1} \text{ PS}$, ce qui représente une teneur d'environ deux fois plus celle enregistrée dans les feuilles des plantes témoins (13.6 contre $7.4 \mu\text{g}.100 \text{ mg}^{-1} \text{ PS}$).

Concernant les racines, le traitement au nitrate de plomb à 1000 ppm provoque une lente accumulation en proline ($8.5 \mu\text{g}.100 \text{ mg}^{-1} \text{ PS}$) ; dès que la concentration en plomb quintuple, l'acide aminé varie peu ($8 \mu\text{g}.100 \text{ mg}^{-1} \text{ PS}$). La teneur en proline la plus élevée est signalée dans les mêmes organes dans le milieu à 10000 ppm ($11.14 \mu\text{g}.100 \text{ mg}^{-1} \text{ PS}$).

L'analyse statistique à l'aide du test de Fisher à $P = 5\%$ (tableau 4) montre un effet significatif très élevé ($P = 0.00$) du traitement au plomb sur l'accumulation de la proline dans les feuilles stressées en comparant avec les feuilles témoins. Par contre dans les racines, les traitements à 1000 et 5000 ppm n'ont aucun effet sur la proline ; cet effet traitement ne s'exprime significativement que sous la concentration à 10000 ppm.

Tableau 4 - Test statistique de signification de Fisher ($P = 5\%$) des teneurs en proline ($\mu\text{g}.100 \text{ mg}^{-1} \text{ PS}$) des feuilles et des racines d'*Atriplex canescens* (Pursh) Nutt. stressées pendant une semaine au nitrate de plomb.

Nitrate de plomb en ppm	Feuilles	Racines	Feuilles/Racines
Témoin	7.4 ± 1.08	7.9 ± 1.29	NS
1000	12.6 ± 4.74 S	8.5 ± 3.51 NS	S
5000	10.4 ± 2.70 S	8.0 ± 1.32 NS	NS
10000	13.6 ± 2.83 S	11.14 ± 1.77 S	NS

II- Teneur en sucres solubles des feuilles et des racines des plantes stressées au nitrate de plomb

1- Plantes de l'*Atriplex halimus* L.

La figure 29 montre que les sucres solubles augmentent dans les deux organes avec la concentration du milieu en nitrate de plomb ; les teneurs en ces composés glucidiques restent cependant plus élevées dans les racines que dans les feuilles.

Dans les feuilles, les sucres solubles ne varient pas beaucoup entre le témoin et sous le stress à 1000 ppm de nitrate de plomb (107 pour $109.6 \mu\text{g}.100 \text{ mg}^{-1} \text{ PS}$). Dès que les

plantes sont traitées à 5000 et 10000 ppm, les teneurs en sucres évoluent respectivement jusqu'à 159.16 et 165.91 $\mu\text{g}\cdot 100\text{mg}^{-1}$ PS.

Les sucres dans les racines restent plus élevés en teneurs mais ne semblent pas trop varier pour toutes les plantes sous tous les traitements.

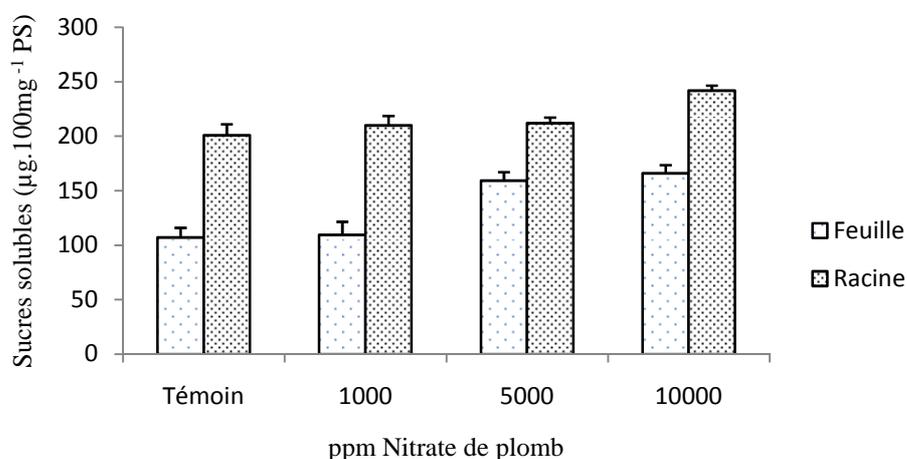


Fig. 29- Teneur en sucres solubles ($\mu\text{g}\cdot 100\text{mg}^{-1}$ PS) des feuilles et des racines de jeunes plantes d'*Atriplex halimus* L. (âgées de 70 jours) stressées au nitrate de plomb.

L'analyse statistique à l'aide du test de Fisher à $P = 5\%$ (tableau 5) indique un effet significatif ($P = 0.00$) du plomb sur les sucres solubles dans les feuilles des plantes traitées sous toutes les concentrations en nitrate de plomb.

Au niveau des racines, aucun effet sur l'accumulation des sucres sous le traitement à 1000 ppm par rapport au témoin. Dès que la solution est enrichie à 5000 et 10000 ppm de nitrate de plomb, les plantes réagissent en augmentant significativement les teneurs en sucres solubles toujours comparées aux plantes témoins.

Tableau 5 - Test statistique de signification de Fisher ($P = 5\%$) des teneurs en sucres solubles ($\mu\text{g}\cdot 100\text{mg}^{-1}$ PS) des feuilles et des racines d'*Atriplex halimus* L. stressées pendant une semaine au nitrate de plomb.

Nitrate de plomb en ppm	Feuilles	Racines	Feuilles/Racines
Témoin	107 ± 8.83	201 ± 9.92	NS
1000	109.60 ± 11.86 S	210 ± 8.48 NS	S
5000	159.16 ± 7.80 S	212 ± 5.02 S	S
10000	165.91 ± 7.44 S	242 ± 4.39 S	S

De plus, l'analyse statistique révèle que l'accumulation des sucres solubles reste significativement élevée dans les racines comparativement aux feuilles sous l'effet de tous les traitements au plomb.

2- Plantes de l'*Atriplex canescens* (Pursh) Nutt.

L'accumulation des sucres solubles pour les plantes témoins est très importante chez les feuilles que chez les racines, ce qui représente une teneur en sucres d'environ trois fois plus que celle enregistrée dans les racines (230 contre 99.5 $\mu\text{g}\cdot 100\text{mg}^{-1}\text{PS}$).

Les résultats de la figure 30 montrent que les valeurs obtenues pour les feuilles des plantes traitées à 1000 ppm augmentent légèrement à 237.6 $\mu\text{g}\cdot 100\text{mg}^{-1}\text{PS}$ en comparant avec les feuilles des plantes témoins. L'enrichissement des solutions à 5000 et 10000 ppm provoque une accumulation de ces composés plus importante (256.56 contre 266.4 $\mu\text{g}\cdot 100\text{mg}^{-1}\text{PS}$). En ce qui concerne les racines, les teneurs augmentent toujours avec la concentration en nitrate de plomb passant de 118.2 $\mu\text{g}\cdot 100\text{mg}^{-1}\text{PS}$ sous le traitement à 1000 ppm à 160.1 $\mu\text{g}\cdot 100\text{mg}^{-1}\text{PS}$ lorsque la concentration est multipliée par 10.

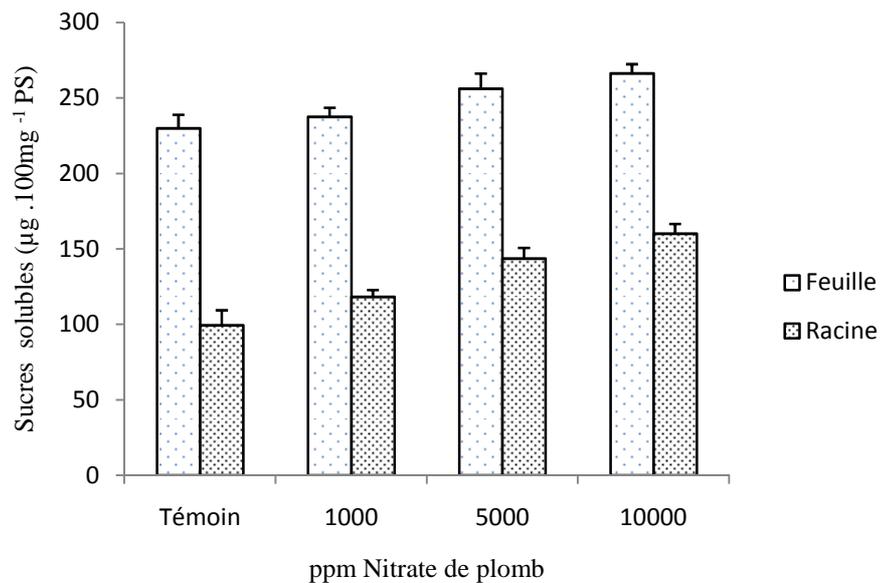


Fig. 30- Teneur en sucres solubles ($\mu\text{g}\cdot 100\text{mg}^{-1}\text{PS}$) des feuilles et des racines de jeunes plantes d'*Atriplex canescens* (Pursh)Nutt. (âgées de 70 jours) stressées au nitrate de plomb.

L'analyse statistique à l'aide du test de Fisher à $P = 5\%$ (tableau 6) indique un effet significatif ($P = 0.00$) du plomb sur les sucres solubles des feuilles en présence de stress métallique ; tandis que pour les racines aucun effet significatif ne s'exprime sous les traitements à 1000 et 5000 ppm au nitrate de plomb. Dès que la solution est enrichie à 10000 ppm, les plantes réagissent significativement à ce composé glucidique.

Cette étude montre aussi que le plomb n'a aucun effet significatif sur les sucres des organes des plantes témoins ; par contre, le contraire est enregistré pour les feuilles comparées aux racines traitées à 1000 ppm. L'enrichissement des solutions à 5000 et

10000 ppm permet d'enregistrer une différence significative du plomb sur les sucres des feuilles par rapport aux racines.

Tableau 6 - Test statistique de signification de Fisher ($P = 5\%$) des teneurs en sucres solubles ($\mu\text{g}.100 \text{ mg}^{-1} \text{ PS}$) des feuilles et des racines d'*Atriplex canescens* (Pursh) Nutt. stressées pendant une semaine au nitrate de plomb.

Nitrate de plomb en ppm	Feuilles	Racines	Feuilles/Racines
Témoin	230 ± 8.888	99.50 ± 9.86	NS
1000	237.60 ± 5.94 S	118.20 ± 4.59 NS	S
5000	256.56 ± 9.92 S	143.70 ± 7.04 NS	NS
10000	266.40 ± 6.04 S	160.10 ± 6.50 S	NS

III- Teneurs en éléments minéraux des feuilles et des racines des plantes stressées au nitrate de plomb

1- Le sodium

a- Plantes de l'*Atriplex halimus* L.

La figure 31 montre que les feuilles de l'*Atriplex halimus* L. sont plus riches en sodium que les racines, aussi bien pour le témoin que sous les conditions de stress.

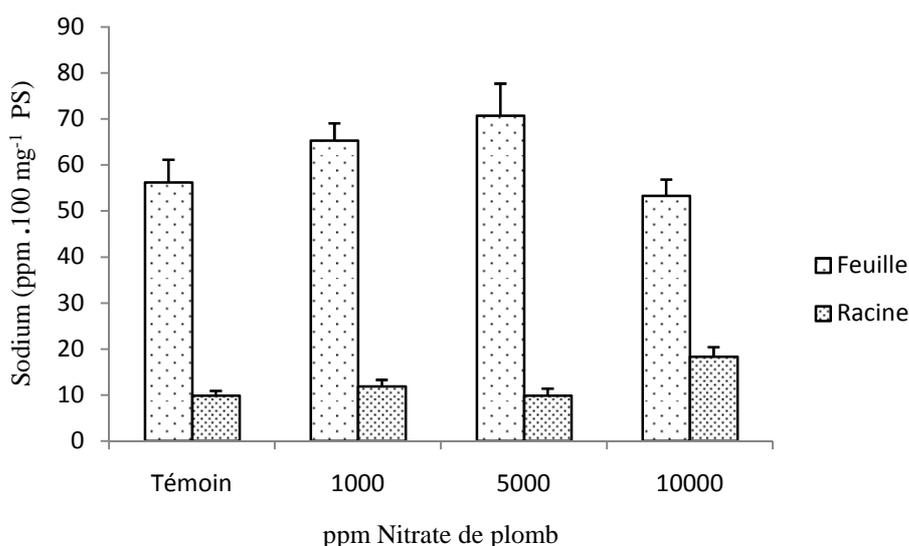


Fig. 31- Teneur en sodium ($\text{ppm}.100 \text{ mg}^{-1} \text{ PS}$) des feuilles et des racines de jeunes plantes d'*Atriplex halimus* L. (âgées de 70 jours) stressées au nitrate de plomb.

Les résultats montrent que les teneurs en sodium augmentent respectivement dans les feuilles sous les traitements au nitrate de plomb 1000 et 5000 ppm en comparant avec les feuilles témoins (65.30 et 70.67 contre 56.18 ppm.100 mg⁻¹ PS) ; cette teneur chute jusqu'à 53.25 ppm.100 mg⁻¹ PS lorsque les plantes sont stressées par 10000 ppm. Alors que pour les racines, la teneur augmente sous le traitement 1000 ppm en comparant avec les racines des plantes témoins (11.84 contre 9.84 ppm.100 mg⁻¹ PS). Dès que la concentration du traitement quintuple la teneur en sodium diminue (9.84 ppm.100 mg⁻¹ PS). Il faut noter que ce cation s'accumule davantage lorsque le milieu de culture est enrichi à 10000 ppm (soit 18.32 ppm.100 mg⁻¹ PS).

L'analyse statistique (Tableau 7) révèle chez les plantes stressées à 1000 et 5000 ppm un résultat significatif pour les feuilles par rapport aux feuilles témoins. Par contre sous le traitement 10000 ppm, aucun effet significatif de plomb sur l'accumulation de sodium n'est signalé chez les feuilles comparé aux feuilles témoins. Chez les racines, les valeurs obtenues n'ont aucun effet significatif sous les traitements 1000 et 5000 ppm par rapport aux racines témoins. Dès que la solution est enrichie à 10000 ppm, les résultats indiquent pour cet organe une différence significative des teneurs en ce cation sous le traitement au nitrate de plomb.

Tableau 7 - Test statistique de signification de Fisher (P = 5%) des teneurs en sodium (ppm.100 mg⁻¹ PS) des feuilles et des racines d'*Atriplex halimus* L. stressées pendant une semaine au nitrate de plomb.

Nitrate de plomb en ppm	Feuilles	Racines	Feuilles/Racines
Témoin	56.18 ± 4.93	9.84 ± 1.04	S
1000	65.30 ± 3.72 S	11.84 ± 1.41 NS	S
5000	70.67 ± 6.99 S	9.84 ± 1.52 NS	S
10000	53.25 ± 3.56 NS	18.32 ± 2.07 S	S

De plus, l'analyse statistique révèle que l'accumulation de sodium reste significativement élevée dans les racines comparativement aux feuilles sous l'effet de tous les traitements au plomb.

b- Plantes de l'*Atriplex canescens* (Pursh) Nutt.

La teneur en sodium des feuilles des plantes témoins marque une augmentation par rapport aux racines des mêmes plantes (46.74 contre 12.32 ppm.100 mg⁻¹ PS).

En plus, les résultats obtenus sur les plantes soumises au nitrate de plomb montrent que les teneurs en sodium des feuilles diminuent avec l'enrichissement des concentrations du métal. Sous le traitement 1000 ppm de nitrate de plomb, la teneur en sodium varie en

comparaison avec les feuilles des plantes témoins (25.10 contre 46.74 ppm.100 mg⁻¹ PS). La chute du sodium est enregistrée aussi en présence de 5000 ppm dont la teneur représente environ la moitié de celle enregistrée pour les feuilles témoins (23.5 contre 46.74 ppm.100 mg⁻¹ PS). En parallèle, le traitement 10000 ppm induit une diminution plus intense que celles observées sous les autres traitements (17.40 ppm.100 mg⁻¹PS).

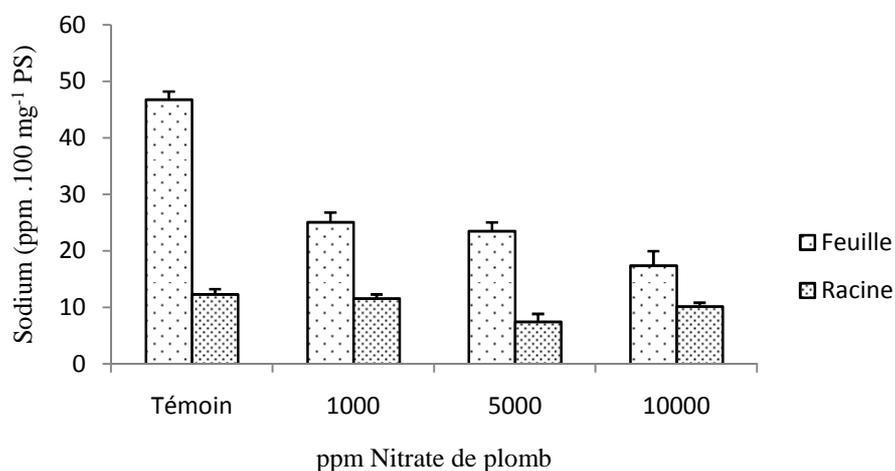


Fig. 32- Teneur en sodium (ppm.100 mg⁻¹ PS) des feuilles et des racines de jeunes plantes d'*Atriplex canescens* (Pursh) Nutt. (âgées de 70 jours) stressées au nitrate de plomb.

L'analyse statistique à l'aide du test de Fisher à P = 5% (tableau 8) montre un effet significatif très élevé (P = 0.00) du traitement au plomb sur l'accumulation de sodium dans les feuilles stressées en comparant avec les feuilles témoins.

Tableau 8 - Test statistique de signification de Fisher (P = 5%) des teneurs en sodium (ppm.100 mg⁻¹ PS) des feuilles et des racines d'*Atriplex canescens* (Pursh) Nutt. stressées pendant une semaine au nitrate de plomb.

Nitrate de plomb en ppm	Feuilles	Racines	Feuilles/Racines
Témoin	46.74 ± 1.46	12.32 ± 0.94	S
1000	25.10 ± 1.72 S	11.62 ± 0.71 NS	S
5000	23.50 ± 1.55 S	7.50 ± 1.39 NS	S
10000	17.40 ± 2.59 S	10.17 ± 0.69 NS	S

Les racines analysées des plantes nourries à 1000 ppm de nitrate de plomb présentent une régression en sodium par rapport aux racines des plantes témoins (12.32 contre 11.62 ppm.100 mg⁻¹ PS). Sous le traitement à 5000 ppm, le sodium varie en diminuant jusqu'à 7.5 ppm.100 mg⁻¹ PS. Le sodium augmente de nouveau jusqu'à 10.17 ppm.100 mg⁻¹ PS sous la concentration 10000 ppm.

Le tableau 8 affiche pour les racines des valeurs non significatives avec l'augmentation de la concentration du milieu en nitrate de plomb par rapport aux racines des plantes témoins.

Par ailleurs, il faut noter que les résultats statistiques indiquent un effet significatif du plomb sur l'accumulation du sodium sous tous les traitements métalliques de milieu.

2- Le potassium

a- Plantes de l'*Atriplex halimus* L.

Le potassium s'accumule beaucoup plus dans la partie foliaire contrairement aux racines, ce qui dépasse le double de sa valeur (65.92 contre 25.06 ppm.100 mg⁻¹ PS).

D'après la figure 33, le stress métallique provoque une augmentation des teneurs en potassium dans toutes les feuilles de cette espèce avec la concentration en plomb du milieu de culture. En effet, les teneurs évoluent de 70.18 ppm.100 mg⁻¹ PS sous le traitement à 1000 ppm vers 81.99 ppm.100 mg⁻¹ PS sous le traitement à 10000 ppm.

Dans les racines, l'augmentation de potassium est enregistrée aussi sous les traitements au nitrate de plomb à 1000 et 5000 ppm (28.92 contre 36.66 ppm.100 mg⁻¹ PS) ; sous 10000 ppm, une chute du potassium se produit dans les mêmes organes (30.42 ppm.100 mg⁻¹ PS).

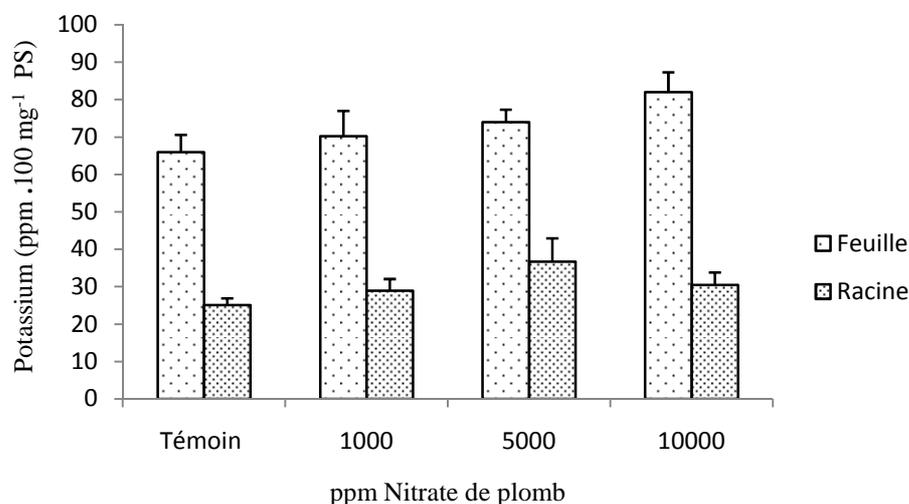


Fig. 33- Teneur en potassium (ppm.100 mg⁻¹ PS) des feuilles et des racines de jeunes plantes d'*Atriplex halimus* L. (âgées de 70 jours) stressées au nitrate de plomb.

L'analyse statistique à l'aide du test de Fisher à P = 5% (tableau 9) ne révèle pas de différences significatives dans les teneurs en potassium accumulé dans les feuilles des plantes traitées par 1000 ppm au nitrate de plomb par rapport aux feuilles témoins. Toutefois, les valeurs des teneurs en potassium sous 5000 et 10000 ppm varient hautement significativement (P = 0.00) pour cet organe.

Au niveau des racines, aucun effet significatif du stress ne se révèle entre les teneurs en potassium des racines alimentées au nitrate de plomb à 1000 ppm par rapport au témoin ; par contre, il faut souligner que le nitrate de plomb apporté à 5000 et 10000 ppm provoque une accumulation significative en potassium comparée au témoin (tableau 9).

Tableau 9 - Test statistique de signification de Fisher (P = 5%) des teneurs en potassium (ppm.100 mg⁻¹ PS) des feuilles et des racines d'*Atriplex halimus* L. stressées pendant une semaine au nitrate de plomb.

Nitrate de plomb en ppm	Feuilles	Racines	Feuilles/Racines
Témoin	65.92 ± 4.60	25.06 ± 1.82	S
1000	70.18 ± 6.73 NS	28.92 ± 3.09 NS	S
5000	73.96 ± 3.31 S	36.66 ± 6.22 S	S
10000	81.99 ± 5.23 S	30.42 ± 3.35 S	S

En comparant les teneurs en potassium analysée dans les feuilles et les racines des plantes témoins, aucune différence significative ne se révèle ; il en est de même pour les plantes traitées sous les différentes concentrations au nitrate de plomb.

b-Plantes de l'*Atriplex canescens* (Pursh) Nutt.

La teneur de potassium est relativement moins importante dans les racines que dans les feuilles des plantes témoins (35.6 contre 116.2 ppm.100 mg⁻¹ PS).

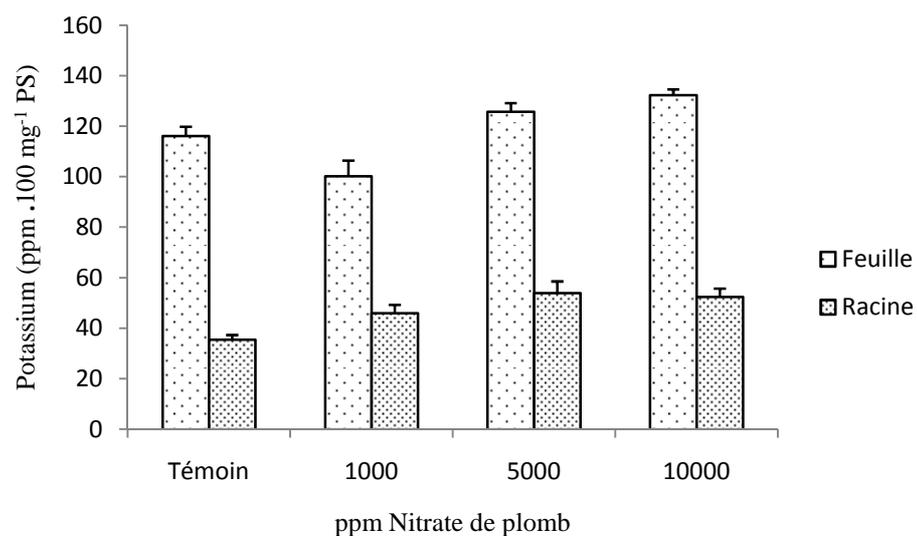


Fig. 34- Teneur en potassium (ppm.100 mg⁻¹ PS) des feuilles et des racines de jeunes plantes d'*Atriplex canescens* (Pursh) Nutt. (âgées de 70 jours) stressées au nitrate de plomb.

Chez les plantes recevant le traitement 1000 ppm, les teneurs en potassium chutent dans les feuilles par rapport aux plantes témoins (100.32 contre 116.2 ppm.100 mg⁻¹ PS) ; par contre, l'accumulation de cet ion augmente proportionnellement avec la concentration à 5000 ppm (125.77 ppm.100 mg⁻¹ PS) ; sous le traitement 10000 ppm, la teneur en potassium reste plus élevée que sous les autres traitements (132.4 ppm.100 mg⁻¹ PS).

Pour les racines, les résultats enregistrent respectivement une augmentation des teneurs en potassium sous les traitements 1000 et 5000 ppm (46.04 et 54 ppm.100 mg⁻¹ PS). Dès que les plantes reçoivent le traitement 10000 ppm, la teneur en potassium diminue légèrement (52.5 ppm.100 mg⁻¹ PS).

L'analyse statistique à l'aide du test de Fisher à P = 5% (tableau 10) indique un effet significatif (P = 0.00) du plomb sur le potassium des feuilles et des racines en présence de stress métallique.

Cette analyse montre aussi que le plomb a un effet significatif sur l'accumulation de cet ion en comparant les organes des plantes aussi bien dans les conditions témoins que dans les conditions de stress.

Tableau 10 - Test statistique de signification de Fisher (P = 5%) des teneurs en potassium (ppm.100 mg⁻¹ PS) des feuilles et des racines d'*Atriplex canescens* (Pursh) Nutt. stressées pendant une semaine au nitrate de plomb.

Nitrate de plomb en ppm	Feuilles	Racines	Feuilles/Racines
Témoin	116.20 ± 3.67	35.60 ± 1.8	S
1000	100.32 ± 6.17 S	46.04 ± 3.30 S	S
5000	125.77 ± 3.48 S	54.00 ± 4.64 S	S
10000	132.40 ± 2.26 S	52.50 ± 3.31 S	S

3- Le calcium

a- Plantes de l'*Atriplex halimus* L.

Une forte accumulation de calcium est signalée chez les feuilles des plantes témoins, tandis que les racines contiennent une teneur moins importante (44.36 contre 28.52 ppm.100 mg⁻¹ PS).

Dès l'enrichissement des solutions par le nitrate de plomb, les teneurs en calcium chutent dans toutes les feuilles et les racines. Dans les feuilles, les teneurs diminuent de 39 ppm.100 mg⁻¹ PS sous le traitement à 1000 ppm vers 33.6 ppm.100 mg⁻¹ PS sous le traitement à 10000 ppm.

Dans les racines, la teneur en calcium chute légèrement sous le traitement 1000 ppm en comparant avec les racines des plantes témoins (27.1 contre 28.52 ppm.100 mg⁻¹ PS). Sous les concentrations 5000 et 10000 ppm, les résultats enregistrent respectivement des teneurs moins importantes que celle enregistrées chez les racines des plantes témoins (25.6 et 20 contre 28.52 ppm.100 mg⁻¹ PS).

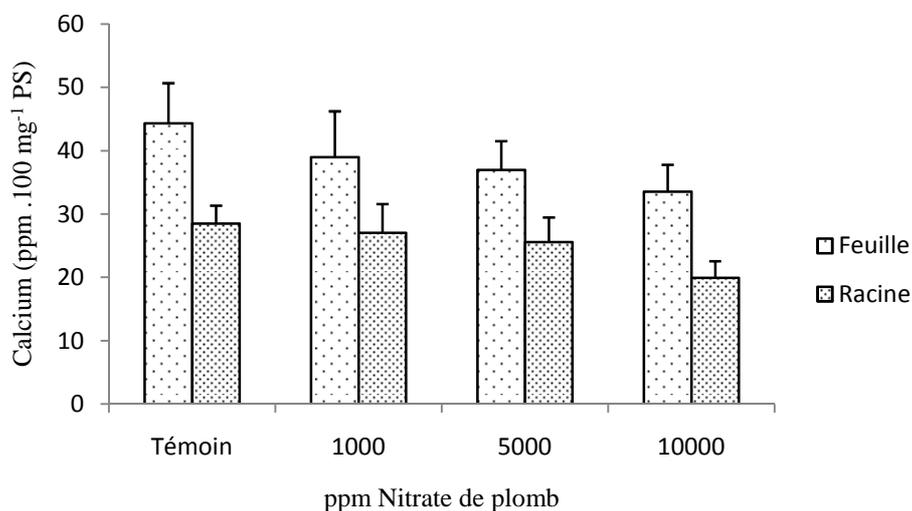


Fig. 35- Teneur en calcium (ppm.100 mg⁻¹ PS) des feuilles et des racines de jeunes plantes d'*Atriplex halimus* L. (âgées de 70 jours) stressées au nitrate de plomb.

L'analyse statistique à l'aide du test de Fisher à P = 5% (tableau 11) indique un effet significatif (P = 0.00) du plomb sur le calcium des feuilles en présence de stress métallique.

Tableau 11 - Test statistique de signification de Fisher (P= 5%) des teneurs en calcium (ppm.100 mg⁻¹ PS) des feuilles et des racines d'*Atriplex halimus* L. stressées pendant une semaine au nitrate de plomb.

Nitrate de plomb en ppm	Feuilles	Racines	Feuilles/Racines
Témoin	44.36 ± 6.31	28.52 ± 2.83	S
1000	39.00 ± 7.24 S	27.10 ± 4.52 NS	S
5000	37.00 ± 4.52 S	25.60 ± 3.89 NS	S
10000	33.60 ± 4.19 S	20.00 ± 2.57 S	S

Au niveau des racines, aucun effet significatif du stress ne se révèle sur les teneurs en calcium des racines des plantes recevant le nitrate de plomb à 1000 et 5000 ppm par rapport au témoin ; par contre, il faut noter que le nitrate de plomb à 10000 ppm provoque une accumulation significative en calcium toujours par rapport au témoin.

Par ailleurs, il faut signaler que les résultats statistiques indiquent un effet significatif du plomb sur l'accumulation du calcium chez les deux organes de la plante et ceci sous tous les traitements métalliques de milieu.

b- Plantes de l'*Atriplex canescens* (Pursh) Nutt.

La teneur en calcium est sensiblement voisine dans les feuilles et les racines des plantes témoins (76.5 contre 81.90 ppm.100 mg⁻¹ PS).

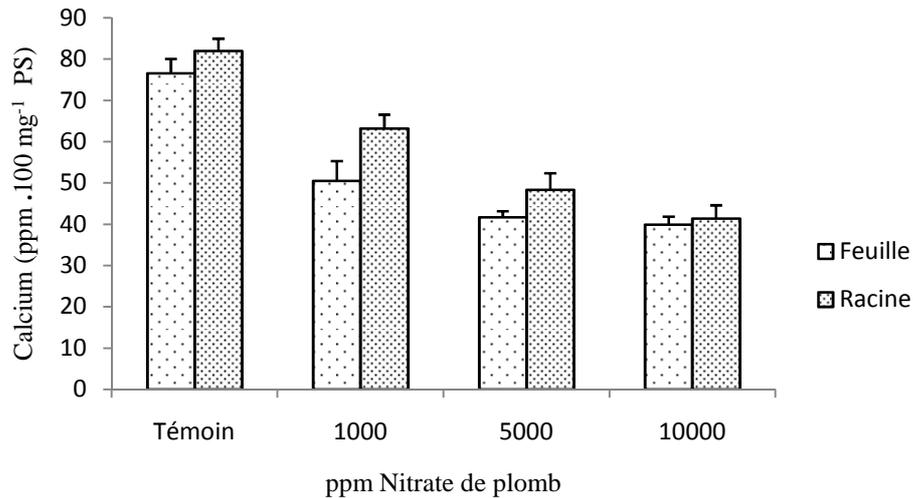


Fig. 36- Teneur en calcium (ppm.100 mg⁻¹ PS) des feuilles et des racines de jeunes plantes d'*Atriplex canescens* (Pursh) Nutt. (âgées de 70 jours) stressées au nitrate de plomb.

D'après la figure 36, le stress métallique provoque une diminution des teneurs en calcium dans toutes les feuilles de cette espèce avec la concentration en plomb. En effet, sous le traitement 1000 ppm, les résultats enregistrent une teneur de 50.5 ppm.100 mg⁻¹ PS ; sous 5000 et 10000 ppm les teneurs en calcium des feuilles baissent par rapport aux feuilles des plantes témoins (respectivement 41.65 et 39.85 contre 76.5 ppm.100 mg⁻¹ PS).

Tableau 12 - Test statistique de signification de Fisher (P= 5%) des teneurs en calcium (ppm.100 mg⁻¹ PS) des feuilles et des racines d'*Atriplex canescens* (Pursh) Nutt. stressées pendant une semaine au nitrate de plomb.

Nitrate de plomb en ppm	Feuilles	Racines	Feuilles/Racines
Témoin	76.5 ± 3.5	81.90 ± 3.01	S
1000	50.50 ± 4.78 S	63.15 ± 3.37 S	S
5000	41.65 ± 1.46 S	48.30 ± 4.01 S	S
10000	39.85 ± 1.97 S	41.37 ± 3.19 S	NS

Dans les racines, une diminution remarquable des teneurs en calcium est enregistrée pour les plantes soumises au nitrate de plomb comparé au témoin. Sous le traitement 1000 ppm du nitrate de plomb, les résultats enregistrent une régression du cation par rapport aux racines des plantes témoins (63.15 contre 81.90 ppm.100 mg⁻¹ PS). L'enrichissement des solutions à 5000 et 10000 ppm provoque respectivement des chutes plus importantes en calcium que celle enregistrée à 1000 ppm par rapport aux racines des plantes témoins (48.30 et 41.37 contre 81.90 ppm.100 mg⁻¹ PS).

Des résultats hautement significatifs sont enregistrés pour le calcium accumulé à l'aide du test de Fisher à P = 5% (tableau 12) aussi bien pour les feuilles que pour les racines sous les différents traitements métalliques.

De plus, l'analyse statistique révèle que l'accumulation du calcium reste significativement élevée dans les racines comparativement aux feuilles des plantes témoins. Cette étude montre un effet significatif sur le cation sous l'action des traitements 1000 et 5000 ppm de nitrate de plomb. L'enrichissement des solutions à 10000 ppm permet d'enregistrer une différence significative du plomb sur le calcium des feuilles par rapport aux racines.



**DISCUSSION
ET CONCLUSION**

Discussion et conclusion

Compte tenu des paramètres utilisés pour évaluer la réponse des deux espèces d'*Atriplex* sous la contrainte métallique, il en résulte que :

La teneur en proline augmente chez les deux espèces sous toutes les concentrations en nitrate de plomb,

Les teneurs en sucres solubles enregistrent aussi une importante accumulation chez les organes des deux espèces en présence de nitrate de plomb.

L'accumulation de ces osmolytes indique que ces espèces montrent une certaine résistance sous nos conditions expérimentales.

Les éléments minéraux analysés à partir des racines et des feuilles varient différemment sous le nitrate de plomb :

- chez l'*Atriplex halimus*, le sodium s'accumule au niveau foliaire et racinaire sous tous les traitements métalliques, par contre, ce cation chute dans les mêmes organes de l'*Atriplex canescens* sous les mêmes concentrations.

- la teneur en potassium chez l'*Atriplex halimus* augmente toujours dans les organes de cette espèce ; les résultats chez l'*Atriplex canescens* enregistrent une régression de potassium au niveau des feuilles sous le traitement 1000 ppm de nitrate de plomb, dès l'enrichissement des solutions à 5000 et 10000 ppm la teneur de ce cation augmente ; ainsi, au niveau racinaire le potassium s'accumule toujours.

- en ce qui concerne le calcium, les résultats enregistrent chez les deux espèces d'*Atriplex* une diminution au niveau foliaire et racinaire sous tous les traitements métalliques.

L'ajustement osmotique est l'un des mécanismes adaptatifs principal des halophytes, qui comporte l'accumulation des molécules en réponse à un stress (Zhang et al., 1999) grâce à l'induction des gènes impliqués dans la synthèse des acides aminés comme la proline (Di Martino et al., 2003 ; Szabados et Savouré., 2009), et aussi dans la synthèse des sucres solubles (Zerrad.,2006 ; Bouchoukh.,2009 ; Azzouz.,2011). Ce phénomène s'exprime aussi par la capacité d'un végétal à accumuler, au niveau symplasmique et de manière active des ions tels que les K^+ et Na^+ (Munns et al., 2006 ; Ghellai., 2014)

En effet, notre étude montre que la teneur en proline augmente chez l'*Atriplex halimus* et l'*Atriplex canescens* avec la concentration en nitrate de plomb. Cette accumulation affecte les feuilles et les racines de plantes stressées. Selon Hassani et al. (2008), cette accumulation permet la protection de la membrane cellulaire et participe à l'ajustement

osmotique. En plus, Thiery et *al.* (2004) ; Djeddi (2006) puis Hadjadj et *al.* (2011) pensent que les quantités accumulées pourraient être liées au niveau de tolérance aux stress.

La proline est souvent citée comme l'osmoticum le plus largement distribué et accumulé sous des conditions environnementales varie (Lepoivre., 2003 ; Parre et *al.*, 2007). En effet, la proline est un acide aminé souvent considéré comme un biomarqueur de stress (Szabados et Savouré., 2009 ; Djerroudi-Zidane et *al.*, 2010 ; Boublenza., 2012). Selon Mile et *al.* (2002), l'accumulation de proline est une des stratégies adaptatives déclenchées par la plante face aux contraintes de l'environnement. Selon un autre point de vue, l'accumulation de la proline n'est pas une réaction d'adaptation au stress, mais plutôt le signe d'une perturbation métabolique (Cheikh M'hamed et *al.*, 2008). Ce phénomène d'accumulation a été démontré chez de nombreuses espèces et dans différentes situations de stress (salins, osmotiques, hydriques, thermiques, métallique...) (Panda., 2003 ; Leprince et *al.*, 2004). Selon Silveira et *al.* (2002), le métabolisme des acides aminés sous conditions de stress est largement altéré et la synthèse des protéines augmente comme une conséquence de ces conditions métaboliques. Flagella et *al.* (2006) suggèrent que l'accumulation de la proline est le résultat de l'inhibition de son oxydation, l'augmentation du catabolisme des protéines et/ou une synthèse de nouveau de cet acide aminé (Ben khaled et *al.*, 2003 ; Djeddi., 2006). En plus, la biosynthèse de cet acide aminé peut être associée à la régulation du pH cytosolique (Denden et *al.*, 2005) ou la production de NADPH pour la stimulation de la voie des pentoses-phosphates (Lutts et *al.*, 1996).

Avant d'appliquer le stress métallique sur *Atriplex halimus*, l'accumulation de la proline est plus importante dans les feuilles que dans les racines, ce qui pourrait expliquer sa synthèse au niveau des feuilles et puis sa migration vers les racines ; alors que le phénomène inverse se produit pour les plantes de l'*Atriplex canescens*. Après l'application du traitement métallique, la proline augmente toujours dans les organes des deux espèces, mais la teneur la plus importante est apparue chez les feuilles, ce contenu foliaire en proline a été suggéré comme un marqueur de stress (Leprince et *al.*, 2004 ; Djerroudi-Zidane et *al.*, 2010). Cette accumulation contribue à l'acquisition de la résistance de la plante à la contrainte métallique grâce à l'ajustement osmotique dont la proline est responsable (Azzouz., 2011 ; Biteur., 2012). Elle pourrait, également, constituer une réserve de carbone et d'azote réduits, utilisés par la plante postérieurement à la période du stress (Matysik et *al.*, 2002 ; Sairam et Tyagi., 2004).

Nos résultats sont en accord avec de nombreux travaux, par exemple chez *Vigna unguiculata* (Bhattacharjee et Mukherjee., 1994), la tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) (De et Mukherjee., 1998), l'haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) (Zengin et Munzuroglu., 2005), et chez les feuilles de tournesol (*Helianthus annuus* L.) (Zengin et Kirbag., 2007 ; Azad et *al.*, 2011). Ces résultats sont signalés aussi chez (*Vigna mungo* L.) (Handique et Handique., 2009). Selon Azzouz (2011), les analyses réalisées sur la fève (*Vicia faba* L.) enregistrent des teneurs élevées en proline dans les différents organes traités par le plomb. Des résultats similaires sont signalés chez les racines du tournesol en présence de ce métal

(Azad et al., 2011), et chez *Hydrilla verticillata* (l.f.) Royle sous l'action combiné du plomb et de cadmium (Singh et al., 2012). Biteur (2012) rapporte que l'apport d'acétate de plomb induit une augmentation importante en proline chez le radis (*Raphanus sativus*). L'accumulation de cet acide aminé est signalée chez artichoke (*Cynara scolymus* L.) (Karimi et al., 2012), les feuilles de blé (Janmohammadi et al., 2013) et chez la partie aériennes de la betterave à sucre (Naderi et al., 2013). D'autres travaux ont abouti aux conclusions similaires sous le stress de différents métaux tels que le Zn, Co, Cu (Sharmila et Pardha Saradhi., 2002 ; Sharma et Dietz., 2006).

En ce qui concerne les sucres solubles, les résultats nous ont permis également de noter des valeurs élevées au niveau des différents organes étudiés en situation de stress métallique comparativement au témoin. Pour la première espèce *Atriplex halimus*, l'accumulation est localisée plus dans les racines que dans les feuilles pour les plantes témoins ; cette accumulation continue dans le même sens en présence de plomb. Cela est considéré selon Cayuela et al. (1996) comme une conséquence de l'abaissement du potentiel hydrique externe, ce qui facilite l'absorption de l'eau ; alors que la deuxième espèce concentre plus ces composés glucidiques au niveau foliaire soit sous stress au plomb ou non. Selon Hajhashemi et al. (2006), l'accumulation des sucres solubles observés au niveau foliaire est parmi les phénomènes les plus observés dans la réponse au stress. Costa et Spitz (1997) puis Dubey et Singh (1999) suggèrent que cette accumulation de glucides solubles a été rapportée en réponse à différents stress environnementaux et particulièrement des métaux, stratégie adoptée par les plantes afin de résister aux contraintes du milieu (Bajji et al., 1998 ; El Midaoui et al., 2007). Selon Clifford et al. (1998), l'accumulation des sucres solubles peut résulter d'une augmentation de l'hydrolyse de l'amidon puisqu'ils ont enregistré, simultanément, une diminution de l'amidon et une accumulation de sucres solubles dans les tissus stressés. La teneur élevée des hexoses, essentiellement au niveau des feuilles âgées, pourrait témoigner soit d'une limitation de leur utilisation suite à l'arrêt de croissance (Lawlor., 2002), soit d'une force d'appel importante et leur hydrolyse par des enzymes présentes dans ces organes (Mouri et al., 2014). Cette accumulation pourrait avoir un rôle osmotique empêchant la déshydratation des cellules et le maintien de la balance de la force osmotique pour garder la turgescence et le volume cytosolique aussi élevés que possible (Bouzoubaa et al., 2001). Plusieurs travaux se sont intéressés à l'étude de leur accumulation chez plusieurs espèces soumises aux stress (Zerrad et al., 2006 ; Arndt et al., 2007 ; Belfakih et al., 2013) ; des corrélations significatives et négatives ont été établies, en conditions salines, entre la production de la biomasse sèche aérienne et les teneurs des feuilles en sucres solubles totaux de certaines espèces comme le tournesol, le haricot et le riz (El Midaoui et al., 2007). Les variétés présumées plus tolérantes de ces espèces semblent accumuler des quantités plus élevées de sucres solubles (Bouzid., 2009). Cette augmentation de la concentration des sucres solubles totaux, remarquable au niveau des racines que des coléoptiles, est accompagnée par une dégradation de certains disaccharides d'où l'accumulation des sucres réducteurs qui ont montré, eux également, une augmentation de la concentration durant la période de stress chez le blé dur (Zerrad et al., 2006).

Nos résultats sont en accord avec de nombreux travaux rapportant une augmentation de la teneur en sucres solubles sous l'effet du plomb. Ces résultats sont signalés chez le riz (Bhattacharjee et al., 1996), *Lemma gibba* (Miranda et Ilangovan., 1996), la tomate (Kratovalieva et Cvetanowska., 2001), les racines de la carotte (Selim., 2001), *Chlorella vulgaris* (Bajguz., 2011), les feuilles et la tige de *Vicia faba* L. (Azzouz., 2011), artichaut (*Cynara scolymus* L.) (Karimi et al., 2012), les racines et la partie aériennes de la betterave à sucre (Naderi et al., 2013), et chez l'haricot commun (*Phaseolus vulgaris* L.) (Aldoobie et Beltagi., 2013). Par contre, d'autres auteurs confirment des résultats différents de notre étude en enregistrant des chutes de ces composées glucidiques chez *Salvinia natans* (Mohan et Hosetti., 1998), carthame (Sayed., 1999), citronnelle (Soheir et al., 2002), *Chlorella vulgaris* (Bajguz et Godlewska-Zylkiewicz., 2003), et chez le riz (Chatterjee et al., 2004). Bhardwaj et al. (2009) rapportent que le plomb induit une diminution totale des sucres solubles chez *Phaseolus vulgaris*. Selon Preeti et Tripathi (2011), la diminution des glucides est montrée aussi chez *Albizia procera* (Roxb.) Benth.

Outre les osmotocums comme la proline et les sucres, interviennent d'autres osmolytes tels que le sodium, le potassium et le calcium.

La nutrition minérale de la plante concerne l'ensemble des mécanismes impliqués dans le prélèvement, le transport, le stockage et l'utilisation des ions minéraux nécessaires au métabolisme et à la croissance de la plante (Morot-Gaudry., 2013). Plusieurs études démontrent que l'absorption des nutriments par les plantes est significativement affectée par la présence de plomb dans le milieu extérieur (Chatterjee et al., 2004 ; Sharma et Dubey., 2005 ; Gopal et Rizvi., 2008), ce qui induit une compétition avec les ions minéraux au niveau des transporteurs cellulaires (Marschner.,1995), altérant la perméabilité membranaire (Gussarsson., 1994), et induisant une carence en éléments nutritifs dans les plantes (Marschner.,1995). D'autres chercheurs suggèrent aussi que ce métal perturbe les structures membranaires et pariétales, modifie le statut hydrique, perturbe l'absorption et/ou la translocation des éléments minéraux essentiels (calcium, manganèse, zinc, fer...) ou encore réduit la photosynthèse (Seregin et Ivanov., 2001 ; Sharma et Dubey., 2005).

Le plomb est principalement lié aux parois (Wierzbicka., 1998), mais peut se trouver associé à la lamelle moyenne (Jarvis et Leung., 2001, 2002) ou à la membrane plasmique (Seregin et al., 2002, 2004), il peut également être précipité dans l'espace intercellulaire (Jarvis et Leung., 2001, 2002). Cette répartition, très spécifique au plomb, s'explique par son affinité particulière pour les groupements carboxyles présents sur les molécules de surfaces des parois (Pourrut., 2008). Il peut exister des liaisons Pb-O avec des molécules d'hémicellulose et de cellulose, composants importants des parois primaires et secondaires, qui peuvent se former également avec des molécules de lignine rentrant dans la composition des parois secondaires (Marmioli et al., 2005). Cette forte affinité pour les composants pariétaux peut expliquer la faible mobilité de ce métal par rapport à d'autres ETM comme le cadmium, dont seulement 56 % se retrouvent adsorbés aux constituants cellulaires (Wierzbicka et al., 2007). Cette propriété du plomb serait

aussi une des raisons de sa moindre toxicité dans les cellules végétales (Seregin et al., 2004).

Notre étude suggère une variabilité cationique de la réponse des deux espèces d'*Atriplex* comme étant un marqueur physiologique au stress métallique.

Cependant, peu d'études ont porté jusqu'à présent sur l'évaluation de la tolérance de l'*Atriplex halimus* aux métaux lourds (Nedjimi et Daoud., 2008). Nos résultats enregistrent pour cette espèce une accumulation de potassium dans les deux organes feuilles et racines sous les traitements métalliques ; les mêmes remarques sont observées pour le sodium sauf qu'il y a une chute remarquable sous l'effet de la forte concentration dans la partie foliaire pourrait expliquer l'importante accumulation de potassium enregistrée chez cette espèce pour la même concentration. Brunet et al. (2008) ont constaté que les racines de *Lathyrus sativus* exposées au plomb ont montré une augmentation de la teneur en Pb avec une augmentation des niveaux Na^+ , qui est absorbé pour compenser la perte de K^+ . Nos résultats n'enregistrent pas cette perte de potassium ce qui pourrait expliquer la faible absorption de sodium malgré sa grande affinité pour les halophytes. Chez l'*Atriplex canescens*, les résultats enregistrent une plus haute accumulation du potassium chez les plantes non stressés en comparant avec la première espèce ; après l'application de la solution métallique, l'accumulation augmente pour toutes les concentrations chez les feuilles et les racines, alors que pour le sodium, cet espèce a eu une forte diminution au niveau foliaire et racinaire qui pourrait lier à l'intense accumulation de potassium sous tous les traitements au plomb dans les feuilles et les racines. Cet antagonisme entre les cations K^+ et Na^+ est un des caractères communs aux halophytes (Baba sidi-kaci., 2010). Maneva et al. (2013) considèrent ces cations comme des nutriments primaires de la plante. L'accumulation de sodium est localisée dans la partie aérienne pour les deux espèces, cela confirme les travaux de Tremblin et Ferard (1994) puis Ouerghi et al. (2000), qui ont montré que les teneurs en Na^+ sont plus élevées dans les parties aériennes et que ce cation migre vers les feuilles pour s'y accumuler. Un autre auteur rapporte aussi qu'il y a une translocation préférentielle des ions Na^+ vers la partie aérienne chez les espèces du genre *Atriplex* (Reimann., 1993). Selon Haouala et al. (2007), la présence de sodium en faible concentration, peut augmenter l'absorption de K^+ chez le riz et la canne à sucre, tandis que sa présence en fortes concentrations diminue l'absorption de K^+ (Mezni et al., 2002). Hernandez et al. (2000) ont montré que sur des tissus foliaires de tomate en absence de sel, la teneur en K^+ des tissus s'accroît et en leur présence la teneur interne en Na^+ augmente. Wakeel et al. (2009), puis Wakeel et al. (2010) rapportent que la toxicité métabolique de Na^+ est due essentiellement à sa compétitivité avec K^+ pour les sites stratégiques des fonctions cellulaires.

Ruiz et al. (1997) définissent le sodium comme un macroélément de plante ; alors que Rice (2007) le classe dans la liste des micro-éléments. Selon Jabnoune (2008), la plante peut utiliser le Na^+ à faible concentration en tant que osmoticum vacuolaire. Michalska et Halan (2001) rapportent qu'il n'y a aucun effet significatif du plomb sur les concentrations des macroéléments.

Les résultats trouvés pour l'*Atriplex halimus* sont en accord avec Azzouz (2011) qui enregistre une accumulation de sodium sous le nitrate de plomb pour les feuilles et les racines de la même espèce. Selon le même auteur, des résultats similaires sont signalés pour les feuilles de la fève et qui diminue en présence de la plus haute concentration du nitrate du plomb. Maneva et al. (2013) trouvent aussi une augmentation de l'accumulation de sodium sous le nitrate de plomb chez la tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.). Une accumulation importante de sodium est signalée chez l'*Atriplex halimus* au niveau foliaire sous une combinaison du sel et du plomb, alors que le contraire est enregistré pour les racines (Ghellai., 2014).

Pour l'*Atriplex canescens*, notre résultat montre une diminution du Na⁺ dans les feuilles et les racines alors que Azzouz (2011) rapporte cette réduction du cation seulement dans les racines de la fève (*Vicia faba* L.) sous l'effet de plomb. Les mêmes observations sont rapportées, chez le blé (Khizar et al., 2013 ; Lamhamdi et al., 2013), l'épinard (Lamhamdi et al., 2013), et chez l'*Atriplex canescens* sous l'action combinée du sel et du plomb (Ghellai., 2014).

Les plantes cultivées dans des milieux contaminés par les métaux lourds sont sujets à des modifications dans leur composition chimique non seulement pour le contenu des métaux lourds mais aussi pour un autre macroélément comme le potassium (Das et al., 1998). L'accumulation de potassium est très bénéfique à la plante puisque ce cation est le premier candidat à contrecarrer le potentiel négatif du milieu (Sairam et Tyagi., 2004) et la tolérance aux contraintes biotiques ou abiotiques est attribuée à la capacité des plantes à maintenir une forte proportion en ce cation (Misra et Dwivedi., 2004).

Le potassium est l'élément le plus abondant dans la majorité des plantes cultivées (Marschner., 1995). Il se trouve sous forme de cations libres ou absorbés pouvant être facilement déplacés des cellules ou des tissus des plantes (Raij., 2011). Ce cation joue un rôle osmo-régulateur indispensable pour le maintien du statut de l'eau dans les cellules ; l'ouverture des stomates est conditionnée par une concentration élevée en ce cation dans les cellules de garde (Hellali., 2002). Il peut également jouer un rôle lors d'une limitation de l'alimentation hydrique en favorisant l'absorption d'eau par les racines et en contrôlant les mécanismes d'ouverture et de fermeture des stomates (Delas., 2000), un autre rôle important dans l'amélioration de l'état d'énergie de la plante, la translocation et le stockage des éléments assimilés et la maintenance de l'état hydrique dans les tissus (Marschner., 1995). L'augmentation de potassium dans les vacuoles des cellules stomatiques entraîne un flux hydrique dans les vacuoles, une augmentation de la pression de turgescence, une tension inverse des parties élastiques de la paroi squelettique et, par conséquent, l'ouverture des ostioles (Laarabi., 2006). Selon Attia (2007), le potassium intervient dans la neutralisation des acides organiques produits au cours de la photosynthèse ; il participe au maintien du pH cellulaire à un niveau favorable pour ce processus et favorise l'accumulation de sucres. Botrini et al. (2000) ont rapporté que les niveaux élevés de potassium réduit la concentration de sodium dans les racines et les tiges, mais pas dans les feuilles chez *phytophathogen fungi* sous le plomb. Chez le blé, l'utilisation

d'inhibiteurs de canaux calciques (lanthane) ou potassiques (chlorure de césium) a permis de montrer que ces canaux étaient des voies d'entrée pour le plomb dans la racine (Wang et al., 2007).

Nos résultats enregistrent une augmentation en potassium sous l'effet de plomb confirmée d'ailleurs par les résultats de Azza et Mazher (2006) chez *Leuceana leucocephala*. Kibria et al. (2009) rapportent les mêmes observations chez les feuilles et les racines d'*Amaranthus oleracea* L. et les racines d'*Amaranthus gangeticus* L.. Ces résultats sont signalés aussi chez la tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) (Maneva et al., 2013). Des contres résultats sont enregistrés sous la présence de plomb dont le potassium est diminué ; ce chute est signalé chez *Cucumis sativus* et *Zea mays* (Walker et al., 1997), le betterave à sucre (Larbi et al., 2002), le riz (Yang et al., 2004 ; Kibria., 2008), la partie aérienne de la cornille (Kopittke et al., 2007), le radis, la tige et les racines de *Basella alba* L. (Kibria., 2008), *Spinacea oleracea* L. (Kibria et al., 2010), *Celosia argentea* (Orhue et Inneh., 2010), canola (*Brassica napus* L.) (Ashraf et al., 2011), le tournesol (*Helianthus annuus* L.) (Azad et al., 2011), le blé et l'épinard (Lamhamdi et al., 2013), et chez les deux variétés de blé (*Triticum aestivum* L.) Chakwal-97 et Sehar-2006 (Khizar et al., 2013). Selon Ghellai (2014), les résultats enregistrent en présence d'un stress combiné de plomb et de sel une diminution en potassium chez les feuilles ; alors que pour les racines, cette accumulation apparait non stable pour les concentrations fournies. Des résultats similaires de cet auteur sont enregistrés chez l'*Atriplex canescens* dont la signalisation d'une accumulation non stable pour les feuilles et les racines est enregistrée.

Parmi les ions analysés pour cette étude, le calcium. C'est le cation le plus étudié car il a une relation importante avec le plomb. Cette relation se traduit par la compétition entre ces deux cations au niveau de l'entrée dans les cellules (Pourrut et al., 2008) ; ce qui permet de conclure que le plomb aurait une forte affinité pour les sites de fixation du calcium (White et Broadley., 2003 ; Antosiewicz., 2005 ; Cecchi., 2008). Une autre hypothèse suggère que le Pb bloque les canaux calciques de la membrane plasmique des cellules racinaires ou agit comme ion compétiteur pour les systèmes de transport (Huang et Cunningham., 1996).

Selon Cecchi (2008), le calcium étant un messager secondaire, pourrait déclencher une cascade de signalisation, afin d'activer les défenses de la plante. Taiz et Zeiger (2006) rapportent que le calcium a beaucoup d'effets sur la croissance et le développement de la plante ; il peut également jouer un rôle dans la détoxification du plomb une fois à l'intérieur des cellules (Cecchi., 2008). Le calcium est un élément indispensable aux processus de croissance et de survie des plantes en conditions de stress (Epstien., 1998). L'une des fonctions premières du calcium est de créer des liens entre les parois des cellules ; il maintient donc la structure entre les cellules en les cimentant les unes aux autres (Lacroix., 1999). Il joue également un rôle important dans le maintien de l'intégrité et de la sélectivité membranaire (Xiong et al., 2006). Par conséquent, son introduction dans le milieu de culture permet un meilleur contrôle des propriétés membranaires et assure un rôle protecteur lorsque les conditions du milieu sont défavorables (Kinraide., 1998).

En plus, les pectines jouent un rôle privilégié dans le piégeage des métaux par la paroi (Macfie et Welbourn., 2000). Cette efficacité de fixation est due à la capacité d'échange de cations : des cations métalliques peuvent se substituer aux ions calcium au sein des réseaux en "boîte à œufs" des homogalacturonanes mais aussi au niveau des rhamnogalacturonanes. En effet, le rôle du calcium dans le maintien de l'intégrité structurale des biomembranes a été démontré aussi bien à l'échelle de la plante entière qu'à l'échelle cellulaire (White., 2000 ; Xiong et *al.*, 2006).

Notre étude signale une diminution en calcium chez les feuilles et les racines des deux espèces d'*Atriplex* ; ceci pourrait résulter d'un antagonisme entre le plomb et le calcium, confirmé d'ailleurs par Huang et Cunningham (1996). L'accumulation de ce cation chez l'*Atriplex halimus* pour les plantes non stressées est moins importante que celle chez l'*Atriplex canescens*, ce qui expliquerait les différences dans l'absorption des minéraux chez ces deux espèces. Sous l'effet stressant métallique, les deux espèces répondent en diminuant l'absorption de calcium et son accumulation dans les feuilles et les racines. Azmat et Haider (2007) rapporte que la diminution calcique chez les racines en réponse à une augmentation de plomb est probablement le résultat d'un ajustement osmotique ; alors que pour la partie aérienne la diminution de la concentration du calcium est peut être le résultat de la détérioration du système intercellulaire de défense, confirmé d'ailleurs par Ashraf et *al.* (2011).

Selon Cecchi (2008), le plomb ne possède pas des canaux spécifiques sur les membranes car c'est un élément non essentiel ; Huang et Cunningham (1996) suggèrent que le plomb pourrait emprunter les canaux calciques. D'autre part, il a été montré que l'utilisation d'un inhibiteur de ces canaux, comme le lanthane, réduit fortement le stress oxydatif, confirmant ainsi que le plomb emprunte les canaux calciques (Pourrut et *al.*, 2008). Cecchi (2008) rapporte que l'augmentation de la concentration en calcium dans le milieu réduirait la pénétration du plomb dans les cellules ; ce qui impliquerait la responsabilité du calcium dans la tolérance au plomb ; ainsi, de forte teneur en calcium dans un sol diminue la toxicité de certains métaux notamment le plomb (Kim et *al.*, 2002). Par exemple au Brésil, il a été montré qu'un ajout de boues enrichies en silicate de calcium sur un sol colonisé par une Poacée (*Brachiaria decumbens*) permettait de limiter l'absorption de zinc et de cadmium dans la plante et d'augmenter la stabilisation de ces métaux dans le sol (Dos Santos et *al.*, 2007). D'autres auteurs montrent que de fortes concentrations en calcium augmentent la tolérance des plantes au plomb en réduisant les inhibitions de croissance et les activités enzymatiques (Antosiewicz., 2005). Ceci suggère que le risque d'intoxication auquel la plante est exposée dans son environnement ne dépend pas seulement de la concentration exogène du métal, mais aussi de la composition ionique du milieu et des interactions possibles entre le polluant et les autres ions présents (Zoghlami et *al.*, 2006). Cependant, le calcium n'aurait pas uniquement un effet sur la diminution du prélèvement du plomb, mais également sur une meilleure efficacité des mécanismes de défense des plantes (Cecchi., 2008). Pour cela, Antosiewicz (2005) a montré une plus grande toxicité de plomb dans des tissus végétaux si les teneurs en calcium sont faibles. En effet, plusieurs travaux se sont

intéressés à l'étude de l'effet de calcium sur les métaux. Les résultats de Nedjimi (2009) montrent que l'augmentation de la concentration en calcium dans le milieu de culture entraîne une diminution de l'absorption de métal toxique et par conséquent une baisse de ses teneurs dans les tissus de la plante, d'où une amélioration significative de la production de la biomasse végétale.

Nos résultats sont en accord avec plusieurs recherches ; les concentrations élevées en plomb induisent une diminution en calcium chez le maïs (*Zea Mays* L.) (Huang et Cuningham., 1996 ; Antosiewicz., 2005), *Oryzum sativa* (Chatterjee et al., 2004), le seigle et la moutarde (Antosiewicz., 2005), la tomate (*Lycopersicon esculentum* L.) (Antosiewicz., 2005 ; Cecchi., 2008), *Brassica oleracea* (Sinha et al., 2006), *Medicago sativa* (Lopez et al., 2007), *Vicia unguiculata* (Kopittke et al., 2007), le riz (Kibria., 2008), la fève (*Vicia faba* L.) (Cecchi., 2008), les racines de *Lathyrus sativus* L. (Brunet et al., 2008), le radis (*Raphanus sativus* L.) (Gopal et Rizvi., 2008 ; Kibria., 2008), la tige et les racines de *Basella alba* L. (Kibria., 2008), *Amaranthus gangeticus* L. et les racines d'*Amaranthus oleracea* L. (Kibria et al., 2009), les pousses de canola (*Brassica napus* L.) (Ashraf et al., 2011), chez tournesol (*Helianthus annuus* L.) (Azad et al., 2011), et chez l'épinard et le blé (Lamhamdi et al., 2013). Cette diminution pourrait résulter de l'inhibition des transporteurs Ca^{2+} par des ions plomb toxiques (Antosiewicz et Hennig., 2004 ; Wojas et al., 2007) et /ou le remplacement d'ions Ca^{2+} par des ions plomb en raison de la forte affinité de ce dernier pour Ca^{2+} liaison-sites sur des structures biologiques (White et Broadley., 2003). Le contraire est enregistré pour d'autres travaux sous l'action de plomb ; différents chercheurs trouvent que la concentration en calcium accumulé sous la concentration de plomb augmente chez les plantules de maïs (*Zea Mays* L.) (Małkowski et al., 2005), *Spinacea oleracea* L. (Kibria et al., 2010), les racines des cultivars de canola (*Brassica napus* L.) (Ashraf et al., 2011), et chez les feuilles de l'*Atriplex halimus*, tandis que le calcium restent instable pour les racines et l'espèce *Atriplex canescens* (Ghellai., 2014).

En conclusion finale, cette étude montre que ces deux espèces semblent tolérantes au nitrate de plomb sous ces conditions expérimentales. Ceci est témoigné par l'accumulation de la proline et des sucres solubles chez l'*Atriplex halimus* et l'*Atriplex canescens* dans les feuilles et les racines. Concernant les éléments minéraux, une accumulation du sodium et du potassium est enregistré chez l'*Atriplex halimus* ; tandis que pour la deuxième espèce, le potassium est le seul cation absorbé en forte concentration car il a entré en antagonisme avec le sodium. En effet, le calcium entre en compétition avec le plomb pour emprunter les canaux calciques, ce qui enregistre chez les feuilles et les racines de ces halophytes une diminution de l'absorption du premier cation à cause de la concentration élevée du plomb, ce qui nous a permis de comprendre qu'il y a une accumulation du plomb au niveau foliaire et racinaire. En plus, nos observations personnelles concernant la morphologiques de ces deux espèces montrent des plantes vertes pendant toute la semaine de traitement et sous des fortes concentrations en plomb ; la deuxième remarque rapporte que le flétrissement des feuilles est très faibles ce qui proposerait l'hypothèse de l'ajustement osmotique à l'aide des paramètres étudiés.

Discussion et conclusion

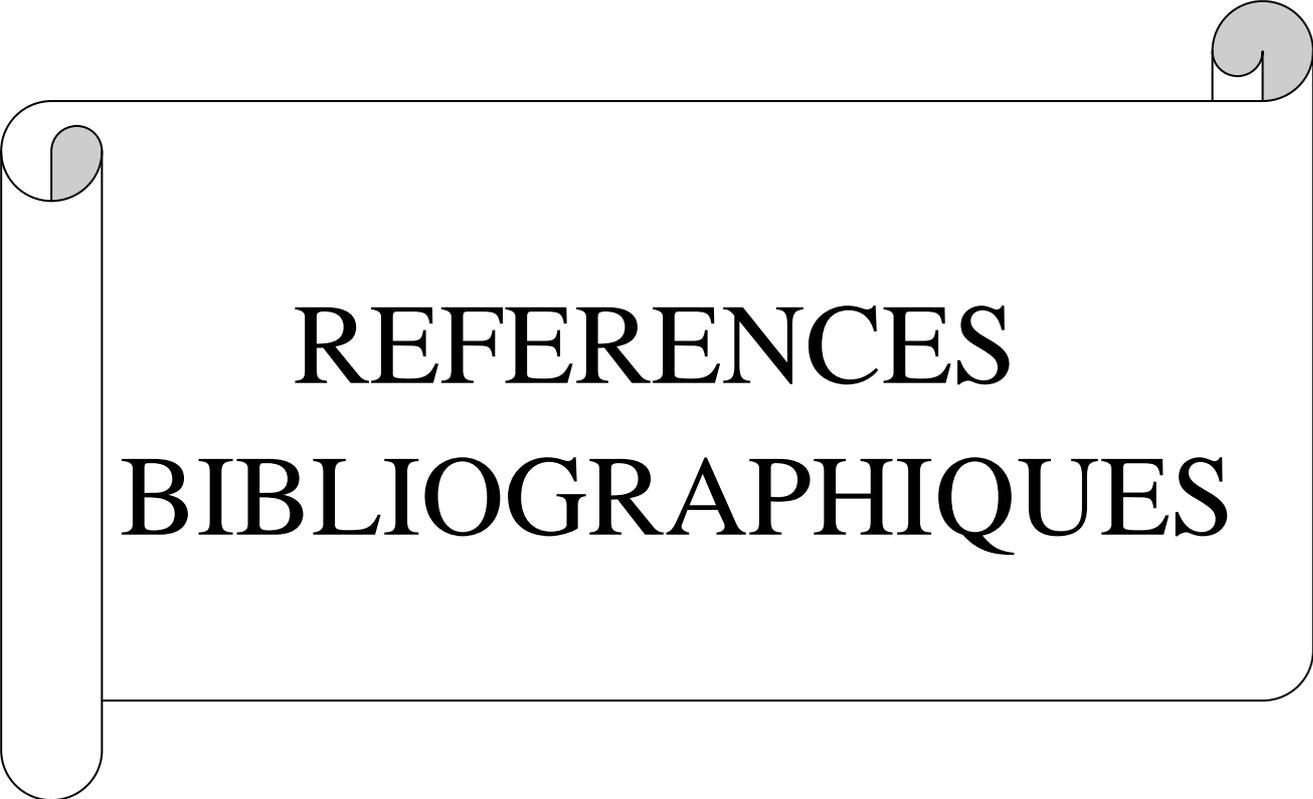
Suite aux résultats que nous venons de décrire, nous pouvons proposer quelques orientations afin d'apporter de nouvelles informations sur les réponses des plantes aux stress métalliques.

Il serait important de tester la capacité phytoremédiantes de ces deux espèces sous d'autres 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 aussi intéressant de tenir compte de la durée du stress pour mieux valoriser la réponse de la plante.

Il serait important d'augmenter les concentrations en plomb pour évaluer la réponse de ces espèces potentiellement phytoremédiantes vis-à-vis des sols très pollués.

Généralement les sols sont pollués par plusieurs métaux, dans ce contexte, il serait souhaitable de faire d'autres études sur ces espèces sous diverses contraintes métalliques.



REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abdelly C., 2006 - Caractérisation des halophytes pour le dessalement des sols salins et le traitement des eaux salines. Rapport d'activités 2007. Centre de biotechnologie à la technopole de Borj-Cedria, Tunisie, pp. 28- 31.

Aboura R., 2005 - Comparaison phytoécologique des atriplexais situées au nord et au sud de Tlemcen. Mémoire de magistère en écologie végétale. Université Abou Bakr Belkaid-Tlemcen, Algérie, 181p.

Abu-Zanat M., 1995 - Establishment and production of fodder shrubs in Jordan. In: Proceedings of the Regional Planning Workshop on Fodder Shrubs, Tunis, Tunisia, July 5–3, p. 1–12.

Aldoobie N F et Beltagi M S., 2013 - Physiological, biochemical and molecular responses of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants to heavy metals stress. African Journal of Biotechnology. Vol.12 (29), pp. 4614 - 4622, 17.

Alem C et Amri A., 2005 - Importance de la stabilité des membranes cellulaires dans la tolérance à la salinité chez l'orge. Reviews in Biology and Biotechnology, Vol. 4, No. 1 : 20- 31.

Annou G et Ould El-Hadj Khelil A., 2012 - Mécanismes adaptatifs de l'halophyte spontanée *Sueada mollis* sous deux régimes hydriques différents de la région d'Ouargla. Vol. 4, N° 1.

Antosiewicz D M et Wierzbicka M., 1999 - Localization of lead in *Allium cepa* L. cells by electron microscopy. Journal of Microscopy 195: 139-146.

Antosiewicz D M., 2005 - Study of calcium-dependent lead-tolerance on plants differing in their level of Ca-deficiency tolerance, Environ. Pollut. 134 : 23-34.

Aoun M., 2009 - Action du cadmium sur les plants de moutarde indienne (*Brassica juncea* L. Czern) néoformés à partir de couches cellulaires minces et issus de semis. Analyses physiologiques et rôle des polyamines. Thèse de doctorat en science, université de Bretagne occidentale. 135 p.

APG II., 2003 - An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for orders and families of flowering plants: APG II. Bot. J. Linn. Soc. 141:399-436.

Arndt S K., Clifford S C., Wanek W., Jones H G et Popp M., 2007 - Physiological and morphological adaptations of the fruit free *Ziziphus rotundifolia* in response to progressive drought stress. Tree Physiol 21: 705 – 715.

Références bibliographiques

- Ashraf M Y., Azhar N., Ashraf M., Hussain M et Arshad M., 2011** - Influence of lead on growth and nutrient accumulation in canola (*Brassica napus* L.) cultivars. Journal of Environmental Biology. 32, 659-666.
- Attia F., 2007** - Effet du stress hydrique sur le comportement éco-physiologique et la maturité phénologique de la vigne *Vitis vinifera* L.: Etude de cinq cépages autochtones de Midi-Pyrénées. Thèse de Doctorat. L'institut national polytechnique de Toulouse. P48.
- Azad H N, Shiva A H et Malekpour R., 2011** - Toxic Effects of Lead on Growth and Some Biochemical and Ionic Parameters of Sunflower (*Helianthus annuus* L.) Seedlings. Current Research Journal of Biological Sciences 3(4): 398-403.
- Azmat R et Haider S., 2007** - Pb stress on photochemistry of seedlings of *phaseolus mungo* and *Lens culinaris*. Asian Journal of Plant Sciences 6(2): 332-337.
- Azza A et Mazher M., 2006** - Reponse of *Leuceana leucocephala* Seedling Grown under lead pollution in sandy Soil. World journal of agricultural sciences 2(2): 217-222.
- Azzouz F., 2011** - Effet de l'interaction plomb-salinité sur les réponses physiologiques et biochimiques d'une halophyte (*Atriplex halimus* L.) et d'une glycophyte (*Vicia faba* L.). Mémoire de magistère. P 65.
- Baba Sidi-Kaci S., 2010** - Effet du stress salin sur quelques paramètres phoenologiques (biométrie, anatomie) et nutritionnels de *l'atriplex* en vue d'une valorisation agronomique. Thèse de magistère en Agronomie Saharienne. Université Kasdi Merbah – Ouargla, Algérie, 75p.
- Bajguz A., 2011** - Suppression of *Chlorella vulgaris* growth by cadmium, lead, and copperstress and its restoration by endogenous brassinolide. Arch Environ Contam Toxicol. 60: 406 – 416.
- Bajguz A et Godlewska-Zylkiewicz B., 2003** - Protective role of 20-hydroxy-ecdysone against lead stress in *Chlorella vulgaris* cultures. Phytochem. 65, 711.
- Bajji M., Kinet J M et Lutts Stanley., 1998** - Salt stress effects on roots and leaves of *Atriplex halimus* L. and their corresponding callus cultures. Plant Science. 137: 131- 142.
- 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 1: 81-126.
- Barcelo J et Poschenrieder C., 1990** - "Plant water relation as affected by heavy metal stress: A review." Journal of Plant Nutrition; Vol /Issue: 13:1: P: 1-37.
- Barrow J R., 1997** - Natural asexual reproduction in fourwing saltbush *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt. Journal of aride environment 36: 267-270.

Références bibliographiques

- Batanouny K H., 1993** - Eco physiology of halophytes and their traditional use in the Arab world. Advanced Course on halophyte utilization in Agriculture, 12 Sept., Agadir, Morocco.
- Belfakih M., Ibriz M et Zouahri A., 2013** - Effet de la salinité sur les paramètres morphophysologiques de deux variétés de bananier (*Musa acuminata* L.). Journal of Applied Biosciences 70: 5652– 5662.
- Belkhodja M et Benkabilia M., 2000** - Proline of Faba bean (*Vicia faba*) under salt stress. Egypt. J. Agric. Res. 78, no. 1: 185 – 195.
- Belkhodja M et Bidai Y., 2004** - Réponse des graines d'*Atriplex halimus* L. à la salinité au stade de la germination. Sécheresse n°4, vol 15, p 331-334.
- Bellakhdar J., 1997** - La pharmacopée marocaine traditionnelle. Médecine arabe ancienne et savoirs populaires. Ibis Press, ed., Paris.
- Benabadji N et Ghazlaoui B., 2007** - Contribution à l'étude phytoécologique des atriplexaies au nord de Tlemcen (Oranie-Ouest. Algérie). Laboratoire de gestion des écosystèmes, Département de Biologie, Faculté de science, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen- Algérie.
- Ben Chekroun K et Baghour M., 2013** - The role of algae in phytoremediation of heavy metals: A review . Journal Mater Environ. Sci. 4 (6) 873-880.
- Ben Ghnaya A., Charles G., BenHamida J et Branchard M., 2006** - Phytoremédiation : apport de la sélection in vitro pour l'obtention de Colza (*Brassica napus* L.) tolérant aux métaux toxiques. Geo-Eco-Trop, 30.2: 69-86.
- Ben hassine A et Bouzid S., 2008** - Evaluation des capacités de résistance d'*Atriplex halimus* L. face au cadmium. Geo-Eco-Trop, 32: 17 – 20.
- Ben Khaled L., Morte Gómez A., Ouarraquel M et Oihabi A., 2003** - Réponses physiologiques et biochimiques du trèfle (*Trifolium alexandrinum* L.) à la double association Mycorhizes-Rhizobium sous une contrainte saline. INRA, EDP Sciences. Agronomie. 23: 571–580.
- Benrebiha F Z., 1987** - Contribution à l'étude de la germination de quelques espèces d'*Atriplex* locales et introduites. Mémoire de Magister, Université Annaba, p.119.
- Berti W R et Cunningham S D., 1995** - Sequentiel chemical extraction of trace elements: Development and use in remediating contaminated soils. Conference on the biochemistry of trace elements, Paris.
- Bezzala A., 2005** - Essai d'introduction de l'arganier (*Argania spinosa* L.), dans la zone de M'doukel et évaluation de quelques paramètres de résistance à la sécheresse. Université El Hadj Lakhdar. Mémoire de Magister .143p.

Références bibliographiques

- Bhardwaj P., Ashish KC et Prasad P., 2009** - Effect of enhanced lead and cadmium in soil on physiological and biochemical attributes of *Phaseolus vulgaris*. Nature Sci 8: 63–75.
- Bhattacharjee S., De B et Mukherjee A K., 1996** - Lead and cadmium mediated membrane damage in rice. I. Elec-trolyte leakage, injury index, membrane lipid peroxydation and lipoxygenase activity. J. ecotoxic. env. monit. 6(1), 3.
- Biteur N., 2012** - Essais d'utilisation du radis (*Raphanus sativus*) dans la phytoremédiation (biodépollution) au niveau du sol contaminé par les métaux lourds (plomb) : Etude du stress oxydatif et quelques paramètres enzymatiques. Thèse de Doctorat. Laboratoire de Biotoxicologie Expérimentale, Biodépollution et de phytoremédiation. P 18- 19- 79.
- Blaylock M J et Huang J W., 2000** - Phytoextraction of metals. In I Raskin, BD Ensley, eds, Phytoremediation of toxic metals: using plants to clean up the environment. John Wiley and Sons, New York, p 53–70.
- Botrini L., Lipucci di Paola M et Graifenberg A., 2000** - Potassium affects sodium content in tomato plants grown in hydroponic cultivation under saline-sodic stress. Hort. Scienc., 35 (7): 1220–1222.
- Boublenza F., 2012** - Etude du stress osmotique chez des lactocoques isolés de lait de chamelle de Timimoun. Thèse de Doctorat. Laboratoire de Microbiologie appliquée.
- Bouchoukh I., 2009** - Comportement éco-physiologique de deux Chénopodiacées des genres atriplex et spinacia soumises au stress salin. Mémoire de magistère en Ecophysiologie et Biotechnologie Végétale. Université Mentouri – Constantine, Algérie, 103 : 38-91-92.
- Boulkrah H., 2008** - Etude comparative de l'adsorption des ions plomb sur différents adsorbants. Mémoire de Magister. P 39.
- Bouzid S., 2009** - Étude de l'effet de la salinité et de la présence du molybdène sur le comportement éco-physiologique de deux variétés de plantes de l'espèce *Phaseolus vulgaris* L.. Mémoire de Magistère. Ecophysiologie et Biotechnologie Végétale. Université Mentouri Constantine. P 108.
- Bouzoubaa Z., El Mourid M., Karrou M et El Gharous M., 2001** - Manuel d'analyse chimique et biochimique des plantes. Eds INRA Maroc.
- Briat JF et Lebrun M., 1999** - Plant responses to metal toxicity. Plant Biology and Pathology, Académie des Sciences, Elsevier, Paris.
- Brown J K et Smith J K E., 2000** - Wildland fire in ecosystems: Effects of fire on flora. Gen. Tech Rep. RMRS- GRT- 42- vol. 2. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 257 p.

Références bibliographiques

- Brugnoli E., Lauteri M., 1991** - Effects of salinity on stomatal conductance, photosynthetic capacity and carbon isotope discrimination of salt tolerant (*Gossypium birsutum* L.) and salt sensitive (*Phaseolus vulgaris* L.) C3 non halophytes. *Plant physiol.* 95: 628-635.
- Brunet J., 2008** - Adaptation aux métaux lourds d'une Fabacée (légumineuse) : Réponses phénologique et moléculaire au plomb du *Lathyrus sativus* L. Thèse de Doctorat, Université Paris Est, pp 4-14.
- Brunet J., Repellin A., Varrault G., Terryn N et Zuily-Fodil Y., 2008** - Lead accumulation in the roots of grass pea (*Lathyrus sativus* L.): a novel plant for phytoremediation systems? *C. R. Biol.* 331859–864.
- Carsignol J et Calovi L., 2004** - La pollution des sols et des végétaux à proximité des routes. Les éléments traces métalliques (ETM). Note d'information, Économie Environnement Conception 73.
- Cayuela E., Pérez-Alfocea F., Caro M et Bolarin M C., 1996** - Primiting of seeds with NaCl induces physiological changes in tomato plant grown under salt stress ; *Plant Physiol.* 96: 231-236.
- Cecchi M., 2008** - Devenir du plomb dans le système sol- plante. Cas d'un sol contaminé par une usine de recyclage du plomb et de deux plantes potagères (Fève et Tomate). Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse. 215 : 12-35.
- Chadefaut M et Emberger L., 1960** - Traité de botanique systématique. Tome I. Ed Masson. Paris, 753 P.
- Chaffei C., Pageau K., Suzuki A., Gouia H., Ghorbel M H et Masclaux-Daubresse C., 2004** - Cadmium toxicity induced changes in nitrogen management in *Lycopersicon esculentum* leading to a metabolic safeguard through an amino acid storage strategy. *Plant Cell Physiol.* 45:1681–1693.
- Chamard P., 1993** - Environnement et développement. Références particulières aux états sahéliens membres du CCILS. *Rev. Sécheresse*, 4, p.
- Chatterjee C., Dube B K., Sinha P et Srivastava P., 2004** - Detrimental effects of lead phytotoxicity on growth, yield, and metabolism of rice. *Commun Soil Science Plant Anal* 35(1–2):255–265.
- Chaudhry T M, Hayes W J, Khan A G et Khoo C S., 1998** - Phytoremediation - focusing on accumulator plants that remediate metalcontaminated soils. *Austraasian Journal of Ecotoxicology* 4: 37-51.

Références bibliographiques

- Cheikh M'hamed H., Abdellaoui R., Kadri K., Ben naceur M et Bel hadj S., 2008** - Evaluation de la tolérance au stress salin de quelques accessions d'orge (*Hordium Vulgare* L.) cultivées en Tunisie: Approche physiologique. P 30- 37.
- Chevrier E., 2013** - La phytoremédiation, une solution d'avenir pour le Québec. Essai présenté pour l'obtention du grade de Maître en environnement. Université de Sherbrooke. P 19.
- Chiffolleau J F., Claisse D., Cossa D., Ficht A., Gonzalez J L., Guyot T., Michel P., Miramand P., Oger C et Petit F., 2001** - La contamination métallique. Programme scientifique Seine-Aval, IFREMER edit., 8, 1-39.
- Clifford SC., Arndt SK., Corlett JE., Joshi S., Sankhla N., Popp M et Jones HG ., 1998** - The role of solute accumulation, osmotic adjustment and changes in cell wall elasticity in drought tolerance in *Ziziphus mauritiana* (Lamk.). J Exp Bot 49: 967–977.
- Costa G et Spitz E., 1997** - Influence of cadmium on soluble carbohydrate, free amino acids, protein content of in vitro cultured *Lupinus albus*. Plant Sci. 128: 131-140.
- Dabouineau L., Lamy Y et Collas P., 2005** - Phytoremédiation et phytorestauration ou L'utilisation des plantes pour la dépollution et l'épuration des eaux usées. Dossier environnement. P2.
- Das P., Samantaray S et Rout R., 1998** - Studies on cadmium toxicity in plants: A review. Environ. Pollut. 98(1), 29.
- Das sarma S et Arora P., 2001** - Halophyls. Encyclopedia of life science. 1- 9.
- De Abreu C A., De Abreu M F et Andrade J C., 1998** - Distribution of lead in the soil profil evaluated by DTPA and Mehlich-3 solution. Bragantia 57, 185-882.
- De B et Mukherjee A K., 1998** - Mercury induced metabolic changes in seedlings and cultured cells of tomato. Geobios. 23, 83-88.
- Delas J., Molot C et Soyer J P., 1991** - Effects of nitrogen fertilization and grafting on the yield and quality of the crop of *Vitis vinifera* cv. Merlot. In: The American Society for Enology and Viticulture: Proceedings of the International Symposium on Nitrogen in grapes and Wine. 242 - 248. Seattle, USA.
- Denden M., Bettaieb T., Salhi A et Mathlouthi M., 2005** - Effet de la salinité sur la fluorescence chlorophyllienne, la teneur en proline et la production florale de trois espèces ornementales, Tropicultura, Vol. 23, No. 4 : 220-225.
- Diggs G M., Lipscomb J R., Barney L., Kennon O et Robert J., 1999** - Illustrated flora of north-central Texas. Sida Botanical Miscellany No. 16. Fort Worth, TX: Botanical Research Institute of Texas. 1626 p.

Références bibliographiques

- Di Martino C., Delfine S., Pizzuto R., Loreto F et Fuggi A., 2003** - Free amino acids and glycine betaine in leaf osmoregulation of spinach responding to increasing salt stress. *New Phytologist*.158: 455-463.
- Djeddi H., 2006** - Utilisation des eaux d'une station d'épuration pour l'irrigation des essences forestières urbaines. Mémoire de Magistère. Laboratoire d'Ecologie végétale. Université Mentouri Constantine. P 92.
- Djerroudi-Zidane O., Belkhodja M., Bissati S et Hadjadj S., 2010** - Effet du Stress Salin sur l'accumulation de proline chez deux espèces d'*Atriplex Halimus* L. et *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt. *European Journal of Scientific Research*.Vol.41 N°2, pp. 248-259.
- Dubey R S et Singh A K., 1999** - Salinity induces accumulation of soluble sugars and alters the activity of sugar metabolizing enzymes in rice plants. *Biol. Plant*. 42: 233-239.
- Dumat C., Quenea K., Bermond A., Toinen S et Benedetti M F., 2006** - A study of the trace metal ion influence on the turn-over of soil organic matter in various cultivated contaminated soils. *Environmental Pollution*, 142: 521-529.
- Dutuit P., Pourrat Y et Dodeman V L., 1991** - Stratégie d'implantation d'un système d'espèces adaptées aux conditions d'aridité du pourtour méditerranéen, Groupe des semences artificielles, université Paris-Sud, Paris, p. 6.5-73.
- Dutuit P., Pourrat Y et Dutuit J M., 1994** - La notion de stress de la cellule à l'écosystème. *Sécheresse*, Vol. 5, N°. 1: 23- 31.
- Dutuit P., 1999** - Etude de la diversité biologique d'*Atriplex halimus* pour le repérage in vitro et in vitro d'individus résistants à des conditions extrêmes du milieu. Université de Paris-Sud published by.CTA.
- El Midaoui M., Benbella M., Aït Houssa A., Ibriz M et Talouizte A., 2007** - Contribution à l'étude de quelques mécanismes d'adaptation a la salinité chez le tournesol cultivé (*Helianthus annuus* L.). *Revue Hommes Terre et Eaux* n°136. P 29 - 34.
- El Mzouri E., Chiriyaa A., El mourid M et Laamari A., 2000** - Improving feed resource and quality in the dryland areas of Morocco by introducing the stripalley cropping system. Tunisia. ICARDA, Aleppo (Syria).
- El Shintinawy F et Hassanein RA., 2001** - Changenes in growth, protein patterns and DNA fingerprints of NaCl stressed treated with arginine, putrescine or phenylenediamine. *Egyptian J. Biotechnol*. 10: 405-415.
- Epstien E., 1998** - How calcium enhances plant salt tolerance. *Science*, 40, 1906-1907.
- Essington M E., 2004** - Soil and water chemistry, an integrative approach. CRC Press, USA.

Références bibliographiques

- Fargašová A., 2001** - Phytotoxic effects of Cd, Zn, Pb, Cu and Fe on *Sinapis Alba* L. seedlings and their accumulation in roots and shoots. *Biologia Plantarum* 44: 471-473.
- Flagella Z., Trono D., Pompa M., Di Fonzo N et Pastore D., 2006** - Seawater stress applied at germination affects mitochondrial function in durum wheat (*Triticum durum*) early seedlings. *Funct. Plant Biol.*, 33: 357-366.
- Francllet A et Le Houerou H N., 1971** - Les atriplex en Tunisie et en Afrique du Nord. Rome: Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture: 249-271.
- Froment D., 1972** - Etablissement des cultures fourragères d'atriplex en Tunisie central. *Bull recherche Agro. C.E.M.L. Vol extra*: 590-600.
- Gautry J Y et Bailly A., 2012** - Phytoremédiation et phytoépuration : de nouvelles perspectives pour les taillis à courtes rotations. P 3.
- Ghellai M., 2013** - Action combinée de la salinité et du plomb sur les réponses physiologiques des atriplex. Mémoire de Magistère. Labo d'écophysiologie végétale. Université Es-sénia. Oran.
- Gisbert C., Ros R., De Haro A., Walker DJ., Pilar Bernal M., Serrano R et Navarro-Avino J., 2003** - A plant genetically modified that accumulates Pb is especially promising for phytoremediation. *Biochemical and Biophysical Research Communications* 303: 440-445.
- Glenn E P., Waugh W J., Moore D., McKeon C et Nelson S G., 2001** - Revegetation of an abandoned uranium mill site on the Colorado Plateau, Arizona. *J. Environm. Qual.* 30, 1154-1162.
- Glinski J et Lipiec J., 1990** - Soil physical conditions and plant roots. Boca Raton (FL), CRC Press.
- Gonzales X I., Aboal J R., Fernandez J A et Carballeira A., 2008** - Heavy metal transfers between trophic compartments in different ecosystems in Galicia (northwest Spain): Essential elements. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 55: 691-700.
- Gopal R et Rizvi AH., 2008** - Excess lead alters growth, metabolism and translocation of certain nutrients in radish. *Chemosphere* 70 (9): 1539-1544.
- Grantz D A., Vaughn D L., Farber R J., Kim B et Ashbaug H., 1998** - Transplanting native plants to revegetate abandoned farmland in the western Mojave desert. *J. Environm. Qual.* 27, 960-967.
- Greger M., 1999** - Metal availability and bioconcentration in plants. In: Pasard M.N.V. & Hagemayer, J. (Eds.). heavy metal stress in plants: from molecules to ecosystem. Springer-Verlag, Berlin.

Références bibliographiques

- Gussarsson M., 1994** - Cadmium-induced alterations in nutrient composition and growth of *Betula pendula* seedlings: the significance of fine roots as a primary target for cadmium toxicity. *J. Plant Nutr.*, 17, 2151-2163.
- Hadjadj S., Djerroudi O et Bissati S., 2011** - Etude comparative des mécanismes biochimiques de tolérance au stress salin de deux espèces d'atriplex: *Atriplex halimus* L. et *Atriplex canescens* (Purch) Nutt. *Algerian journal of arid environment*. vol.1, n° 2: 3-10.
- Hajihashemi S., Kiarostami K., Enteshari S et Sabbora A., 2006** - The effects of salt Stress and Paclobutrazol on Some Physiological of two salt- tolerant and salt sensitive cultivars of wheat. *Pakista J. Biol.* Vol n°9, pp 1370-1374.
- Hall J L et Williams L E., 2003** - Transition metal transporters in plants. *Journal of Experimental Botany* 54 : 2601-2613.
- Handique G K et Handique A K., 2009** - Proline accumulation in lemongrass (*Cymbopogon flexuosus* Stapf.) due to heavy metal stress. *J. Environ. Biol* 30(2), 299-302.
- Hassani A., Dellal A., Belkhodja M et Kaid- Harche M., 2008** - Effet de la Salinité sur l'eau et certains osmolytes chez l'orge (*Hordeum vulgare* L.). *European Journal of scientific Research* Vol. 23n°.1. PP. 61-69.
- H.C.D.S., 1996** - Notice bibliographique sur quelques plantes fourragères et pastorales. Haut-commissariat du développement de la steppe.15 P.
- Haouala F., Ferjani H., Ben El- Hadj S., 2007** - Effet de la salinité sur la répartition des cations (Na^+ , K^+ et Ca^{++}) et du chlore (Cl^-) dans les parties aériennes et les racines du ray-grass anglais et du chiendent. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, Vol. 11, N°.3 : 235- 244.
- He Z L., Xiaoe E Y et Stoffella P J., 2005** - Trace elements in agroecosystems and impacts on the environment. *J Trace Elem Med Biol* 19:125–140.
- Hellali R., 2002** - Rôle du potassium dans la physiologie de la plante. Institut National Agronomique de Tunisie. 7 p.
- Hernandez S., Deleu C et Larher F., 2000** - Accumulation de proline dans les tissus foliaires de la tomate en réponse à la salinité. *Comptes Rendus Académie des Sciences. Paris, Sciences de la vie/ Life Sciences*, 323, 551 – 557.
- Hoagland D et Arnon D I., 1938** - The water culture method for growing plants soil. *Univer. Calif. AES. cir.* 347, 1-36.
- Holleman A F et Wiberg E., 1985** - *Lehrbuch der Anorganischen Chemie*. Berlin-New York 568-570.

Références bibliographiques

- Hopkins W G., 2003** - Physiologie Végétale. Traduction de la 2^{ème} édition américaine par Serge R. Ed. de Boeck, p. 66-81.
- Howard J L., 2003** - *Atriplex canescens*. In: Fire Effects Information System, [Online]. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fire Sciences Laboratory.
- Huang J W., Blaylock M J., Kapulnik Y et Ensley B D., 1998** - Phytoremediation of uranium-contaminated soils: role of organic acids in triggering uranium hyperaccumulation in plants. *Environmental Science and Technology* 32 : 2004-2008.
- Huang J W et Cunningham S D., 1996** - Lead phytoextraction: species variation in lead uptake and translocation. *New Phytologist* 134, 75-84.
- Jabnour M., 2008** - Adaptation des plantes au stress salin : caractérisation des transporteurs de sodium et de potassium de la famille HKT chez le riz. Thèse de Doctorat. Laboratoire de Biochimie et physiologie moléculaire de plantes. Université Montpellier II. France. P 11.
- Janmohammadi M., Bihanta M R et Ghasemzadeh F., 2013** - Influence of rhizobacteria inoculation and lead stress on the physiological and biochemical attributes of wheat genotypes. *Cercetări Agronomice în Moldova*. Vol. XLVI , No. 1 (153).
- Jarvis MD et Leung D W M., 2001** - "Chelated lead transport in *Chamaecytisus proliferus* (L.f.) link ssp. *proliferus* var. *palmensis* (H. Christ): an ultrastructural study." *Plant Science* 161(3): 433- 441.
- Jarvis MD et Leung D W M., 2002** - "Chelated lead transport in *Pinus radiata*: an ultrastructural study." *Environmental and Experimental Botany* 48(1): 21-32.
- Jemal F et Ghorbal M H., 2002** - Phytoremediation. *Revue H. T. E.* N° 122.
- Jones H G., Flowers T J et Jones M B., 1989** - *Plants under stress*. Cambridge, Cambridge University Press.
- Karimi N., Khanahmadi M et Moradi B., 2012** - Accumulation and Phytotoxicity of Lead in *Cynara scolymus*. *Indian Journal of Science and Technology*. Vol: 5 (11).
- Khizar H B., Sehrish A., Khalid N., Khalid H., Ejaz H S., Raja U S., Aqsa T et Aneela K., 2013** - Effect of Heavy Metal Lead (Pb) Stress of Different Concentration on Wheat (*Triticum aestivum* L.). *Middle-East Journal of Scientific Research* 14 (2): 148-154.
- Kibria M G., 2008** - Dynamics of cadmium and lead in some soils of Chittagong and their influx in some edible crops. Ph. D. Thesis, University of Chittagong, Bangladesh.

Références bibliographiques

- Kibria M G., Islam M et Osman K T., 2009** - Effects of lead on growth and mineral nutrition of *Amaranthus gangeticus* L. et *Amaranthus oleracea* L. University of Chittagong, Bangladesh. *Soil & Environ.* 28(1): 1-6.
- Kibria M G., Maniruzzaman M., Islam M et Osman K T., 2010** - Effects of soil-applied lead on growth and partitioning of ion concentration in *Spinacea oleracea* L. tissues. *Soil & Environ.* 29(1): 1 – 6.
- Kim Y Y., Yang Y Y et Lee Y., 2002** - "Pb and Cd uptake in rice roots." *Physiologia Plantarum* 116: 368-372.
- Kinet J M., Benrebiha E., Bouzid S., Laihacar S et Dutuit P., 1998** - Le réseau atriplex ou comment allier biotechnologies et écologie pour une sécurité alimentaire accrue en régions semi arides et arides. *Cahiers d'Ariculture.* 7 (6): 505-509.
- Kinraide B T., 1998** - Three mechanisms for the calcium alleviation of mineral toxicities. *Plant Physiol.*, 118, 513-520.
- Komárek M., Tlustoš P., Száková J et Chrastný V., 2008** - The use of poplar during a two-year induced phytoextraction of metals from contaminated agricultural soils. *Environ. Pollut.* 151, 27-38.
- Kopittke P M., Asher C J., Kopittke R A et Menzies N W., 2007** - Toxic effects of Pb²⁺ on growth of cowpea (*Vigna unguiculata* L.). *Environmental Pollution.* 150, 280-287.
- Kosobrukhov A., Knyazeva I et Mudrik V., 2004** - "Plantago major plants responses to increase content of lead in soil: Growth and photosynthesis." *Plant Growth Regulation* 42: 145-151.
- Kratovalieva S et Cvetanowska L., 2001** - Influence of different lead concentrations to some morpho-physiological parameters at tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) in experimental conditions. *maced. agric. rev.* 48 (1/2), 35.
- Laarabi S., 2006** - Effet des conditions stressantes aériennes et souterraines sur l'impédance électrique foliaire de jeunes plantes. Thèse de Doctorat d'état. Université Mohammed V-Agdal. P 10.
- Lacroix M., 1999** - Nutrition en calcium : problèmes et prévention. Laboratoire en diagnostic en phytoprotection.
- Laïd Y., 2012** - Effets sanitaires liés au plomb. Journée d'Etude sur la Médiatisation de l'Essence Sans Plomb Alger. Institut National de Santé Publique.
- Lailhacar S., Rivera H., Silva H et Caaldentey J., 1996** - Les espèces fourragères arbustives d'atriplex sont aussi productives en bois pour la consommation des petits paysans des régions arides. Faculté des sciences Agraire et forestière, Université du Chili, Santiago.

Références bibliographiques

- Lamhamdi M., El Galiou O., Bakrim A., Nóvoa-Muñoz J C., Arias-Estévezb M et Aaraba A., 2013** - Effect of lead stress on mineral content and growth of wheat (*Triticum aestivum* L.) and spinach (*Spinacia oleracea* L.) seedlings. *Rene Lafont Saudi Journal of Biological Sciences* 20, 29–36.
- Laperche V., Dictor MC., Clozel-Leloup B et Baranger Ph., 2004** - Guide méthodologique. du plomb, appliqué à la gestion des sites et sols pollués. BRGM/RP-52881-FR.
- Larbi A., Morals F., Abadia A., Geogrocena Y., Lucena J J et Abadia J., 2002** - Effect of Cd and Pb in sugar beet plants grown in nutrient solution: Induced Fe deficiency and growth inhibition. *Funct. Plant Biol.*, 29: 1453-1464.
- Lawlor D W., 2002** - Limitations to Photosynthesis in water-stressed leaves: stomatal vs metabolism and the role of TP. *Annals of Botany* 89: 871 – 885.
- Lepoivre P H., 2003** - Phytopathologie bases moléculaires des stratégies de lutte .1^{ère} édition, de Boeck et Larcier , Bruscelles : 28-29.
- Leprince A S., Lefebvre D., Ghars M A., Parre E., Thiery L., Bordenave M., Richard L et Savouré A., 2004** - Signalling pathways involved in proline metabolism regulation under hyperosmotic stress in *Arabidopsis thaliana*. *Bull, biot.* 134: 69-74.
- Le houerou H N., 1992** - Relation entre la variabilité des précipitations et celle des productions primaires et secondaires en zone arides. In : l'aridité, une contrainte au développement, Ed ORSTOM, Coll. Didactiques : 197-220.
- Lopez R S., Alvear M., Gianfreda L et De La Luz Mora M., 2007** - Molybdenum availability in Andisols and its effects on biological parameters of soil and red clover (*Trifolium pretense* L.). *Soil science.* 172 (11): 913-924.
- Lu C., Qiu N., Wang B et Zhang J., 2003** - Salinity treatment shows no effects on photosystem II photochemistry, but increases the resistance of photosystem II to heat stress in halophyte *Suaeda salsa*. *Journal of Experimental Botany*, 54, (383), p 851- 860.
- Lutts S., Kinet J M et Bouharmont J., 1996** - Effects of various salts and mannitol on ion and proline accumulation in relation to osmotic adjustment in Rice callus cultures. *J. Plant physiol.* 149: 186 – 195.
- Lutts S., Lefèvre I., Delpéré C., Kivits S., Dechamps C., Robledo A et Correal E., 2004** - Heavy metal accumulation by the halophyte species Mediterranean saltbush. *Journal of Environmental Quality*, 33, 1271-1279.
- Maalem S., 2002** - Etude écophysiological de trois espèces halophytes du genre *Atriplex* (*A. canescens*, *A. halimus* et *A. nummularia*) soumises à l'enrichissement phosphaté. Mémoire de Magistère en Physiologie Végétale et Applications Biotechnologiques. Université Baji Mokhtar, Annaba, Algérie, 76p.

Références bibliographiques

- Macfie S M et Welbourn P M., 2000** - The cell wall as a barrier to uptake of metal ions in the unicellular green alga *Chlamydomonas reinhardtii* (Chlorophyceae). Archives of Environmental Contamination and Toxicology 39 : 413-419.
- Małkowski E., Kurtyka R., Kita A et Karcz W., 2005** - Accumulation of Pb and Cd and its Effect on Ca Distribution in Maize Seedlings (*Zea Mays* L.). Polish Journal of Environmental Studies Vol. 14, No. 2, 203-207.
- Maneva S., Vatchev T et Miteva E., 2013** - Effect of lead excess in soil on the accumulation of P, K and Na in infected by *Fusarium oxysporum* f. sp. *Radicis-lycopersici* in tomato *Lycopersicon esculentum* MILL.) plants. Bulgarian Journal of Agricultural Science, 19 (No 5), 972-980.
- Marmioli M., Antonioli G., Maestri E et Marmioli N., 2005** - "Evidence of the involvement of plant ligno-cellulosic structure in the sequestration of Pb: an X-ray spectroscopy-based analysis." Environmental Pollution 134(2): 217-227.
- Marouf A et Reynaud J., 2007** - La botanique de A à Z. 1662 définitions. Ed Dunod : P 286.
- Marschner H., 1995** - Mineral Nutrition of Higher Plants, San Diego.
- Martinez J P., Silva H., Ledent J F et Pinto M., 2007** - Effect of drought stress on the osmotic adjustment, cell wall elasticity and cell volume of six cultivars of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.). European journal of agronomy. Vol. 26, n°1, pp. 30-38.
- Matysik J., Bhalu Alia B et Mohanty P., 2002** - Molecular mechanisms of quenching of reactive oxygen species by proline under stress in plants. Current Science, 82(5-10): 525-532.
- McGrath S P., 1998** - Phytoextraction for soil remediation. In R.R. Brooks (ed.) Plants that hyperaccumulate heavy metals. CAB Int., Wallingford, UK, pp. 261-287.
- McLean C M., Koller C E., Rodger J C et MacFarlane G R., 2009** - Mammalian hair as an accumulative bioindicator of metal bioavailability in Australian terrestrial environments. Science of the Total Environment 407 (11): 3588-3596.
- Mehra RK., Kodati R et Abdullah R ., 1995** - Chain length-dependent Pb (II)-coordination in phytochelatins. Biochemical Biophysical Research Communications 215: 730-738.
- Mezni M., Albouchi A., Bizid E et Hamza M., 2002** - Effet de la salinité des eaux d'irrigation sur la nutrition minérale chez trois variétés de luzerne pérenne (*Medicago sativa* L.) . Agronomie. 22: 283-291.

Références bibliographiques

- Michalska M et Hakan A S P., 2001** - Influence of lead and cadmium on growth, heavy metal uptake, and nutrient concentration of three lettuce cultivars grown in hydroponic culture. *Commun. Soil Sci. Plan.*, 32: 571-583.
- Mile O., Mészáros I., Veres Sz et Lakatos G., 2002** - Ecophysiological study on the salt tolerance of a pannonian endemism (*Lepidium crassifolium* (W. et K.)) in inland saline area, p. 249-250. In Proceedings of the 7th Hungaricum congress on plant physiology, S6-P04. Hungary.
- Miquel MG., 2001** - Les effets des métaux lourds sur l'environnement et la santé, rapport de l'office parlementaire des choix scientifiques (Sénat).
- Miranda M G et Ilangovan K., 1996** - Uptake of lead by *Lemma Gibba* L.: influence on specific growth rate and basic biochemical changes. *Bull. environ. Contam. Toxicol.* 56, 1000.
- Misra N et Dwivedi U N., 2004** - Genotypic difference in salinity tolerance of green gram cultivars. *Plant Sci.*, 166: 1135-1142.
- Mohan B S et Hosetti B B., 1998** - Lead toxicity to *Salvinia natans* grown in macrophyte ponds. *J. ecotoxic. env. monit.* 8(1) 3.
- Monneveux P et This D., 1997** - La génétique face au problème de la tolérance des plantes cultivées à la sécheresse : espoirs et difficulté. *Scheresse*, 8 (1).
- Morel JL., Mench M et Guckert A., 1986** - A measurement of Pb, Cu, Cd binding with mucilage exudates from maize (*Zea mays* L.) roots. *Biology and Fertility of Soils* 2: 29-34.
- Morot-Gaudry J F., 2013** - Nutrition minérale des plantes : aspects moléculaires. Académie d'agriculture de France. 21 P.
- Mouri Ch., Benhassaini H., Bendimered F Z et Belkhodja M., 2014** - Variation saisonnière de la teneur en proline et en sucres solubles chez l'oyat (*Ammophila arenaria* (L.) Link) provenant du milieu naturel de la côte ouest de l'Algérie. *Acta Botanica Gallica: Botany Letters*. Vol. 159, No 1, 127 – 135.
- Moussavou Moudouma C F., 2010** - Etude des mécanismes d'accumulation du cadmium chez *Arabidopsis thaliana* (écotype Wassilewskija) et chez un mélèze hybride (*Larix x eurolepis*) par des approches moléculaire et développementale. Thèse de Doctorat. P 17.
- Munns R., Richard A J et Lauchli A., 2006** - Approaches to increasing the salt tolerance of wheat and other cereals. *Journal of Experimental Botany*, Vol. 57, n°5, pp. 1025-1043.
- Naderi N., Mirzamasoumzadeh B et Aghaei A., 2013** - Effects of different levels of Lead (Pb) on physiological characteristics of sugar beet. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*. IJACS/5-10/1154-1157.

Références bibliographiques

- Nebors M., 2008** - Biologie végétale : Structure, fonctionnement, écologie et biotechnologie, USA. Editions Pearson Education, France. 614p.
- Nedjimi B., 2009** - Le calcium peut-il protéger *Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* contre la toxicité du cadmium ?, Acta Botanica Gallica, 156 : 3, 391-397.
- Nedjimi B et Daoud Y., 2008** - Cadmium accumulation in *Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* and its influence on growth, proline, root hydraulic conductivity and nutrient uptake. Flora, doi:10.1016/j.flora.2008.03.004 (in press).
- Nègre R., 1961** - Petite flore des régions arides au Maroc occidentale. T1. C.N.R.S. Paris VII. 257p.
- Niu X., Ressian R A., Hasegawa P M et Pardo J M., 1995** - Ion homeostasis in NaCl stress environments. Plant Physiology. 109 (3): 735- 742.
- Orhue E R et Inneh S., 2010** - Uptake of lead by *Celosia argentia* in an ultisol. Research Journal of Agriculture and Biological Sciences 6(2): 103-107.
- Osman A E et Ghassali F., 1997** - Effect of storage conditions and presence of fruiting bracts on the germination of *Atriplex halimus* and *Salsola vermiculeta*. Expl. Agric. 33: 149-156.
- Otsyina R., McKell., Malecheck J M et Vanepps G., 1982** - Use of range shrubs to meet nutrient requirement of sheep grazing on crested wheatgrass during fall and early winter. Journal of range management 35-6:751-753.
- Ouerghi Z., Zid E., Hadji M et Soltani A., 2000** - Comportement physiologique du blé dur (*Triticum durum* L.) en milieu salé. In Royo C., Nachit MM., Difonzo N., Araus JL., (eds). Durum wheat improvement in the mediterranean region: New challenges: l'amélioration du blé dur dans la région méditerranéenne: Nouveaux défis. Zaragoza: CIHEAM. IAMZ: 309-313.
- Ozenda P., 1977** - Flore du Sahara septentrional. 2^{ed}. CN. R. S., Paris, 622p.
- Panda S K., 2003** - Heavy-metal phytotoxicity induces oxidative stress in a moss, *Taxithellium* sp. Science. 84(5), 10: 631-633.
- Parida AK et Das A B., 2005** - Salt tolerance and salinity effects on plants: a review. Ecotoxicology and Environmental. Safety. 60: 324-349.
- Parre E., Chars M A., Leprince A S et Thiery L., 2007** - Calcium signaling via phospholipase cis essential for proline accumulation upon ionic but not non-ionic hyperosmotic stresses in *Arabidopsis thaliana*. Plant physiol 16: 588 – 599.

Références bibliographiques

- Patra M., Bhowmik N., Bandopadhyay B et Sharma A., 2004** - Comparison of mercury, lead and arsenic with respect to genotoxic effects on plant systems and the development of genetic tolerance. *Environ Exp Bot*; 52: 199-223.
- Paz-Ferreiro J., Lu H., Fu S., Méndez A et Gascó G., 2014** - Use of phytoremediation and biochar to remediate heavy metal polluted soils: a review. *Solid Earth*, 5, 65–75.
- Peng H Y., Yang X et Tian S K., 2005** - Accumulation and ultrastructural distribution of copper in *Elsholtzia splendens*. *Journal of Zhejiang University Science* 6B (5): 311-318.
- Pichard A., 2002** - Plomb et ses dérivés. Fiche INERIS.
- Pignol D et Coves J., 2003** - Biodépollution, bioremédiation. Des plantes pour nettoyer les sols et les eaux. Clefs CEA -N° 48. P85.
- Pourrut B., 2008** - Implication du stress oxydatif dans la toxicité du plomb sur une plante modèle, *Vicia faba* L.. Thèse doctorat, université de Toulouse. P 61- 67- 69- 84.
- Pourrut B., Perchet G., Silvestre J., Cecchi M., Guiresse M et Pinelli E., 2007** - Potential role of NADPH-oxidase in early steps of lead-induced oxidative burst in *Vicia faba* roots. *Journal of Plant Physiology*, in press.
- Preeti P et Tripathi A K., 2011** - Effect of heavy metals on Morphological and Biochemical characteristics of *Albiza procera* (Roxb.) Benth. Seedlings. *International journal of onveronmental sciens*. Volume 1, N° 5.
- Qureshi M., Abdin M., Qadir S et Iqbal M., 2007** - "Lead-induced oxidative stress and metabolic alterations in *Cassia angustifolia* Vahl." *Biologia Plantarum* 51(1): 121-128.
- Raij B., 2011** - Van. Fertilidade do solo e manejo de nutrientes. Piracicaba : International Plant Nutrition Institute, 420 p.
- Rathinasabapathi B., Sigua C., Ho J et Gage D A., 2000** - Osmoprotectant β -alanine betaine synthesis in the Plumbaginaceae: S-adenosyl-L-methionine dependent N-methylation of b-alanine to its betaine is via N-methyl and N,N-diemethyl b-alanines. *Physiologia Plantarum* 109: 225-231.
- Reimann C., 1993** - Sodium exclusion by chenopodium species. *J. Exp. Bot.* 43: 503-510.
- Rice R W., 2007** - The physiological role of minerals in plant. , pp 9-29. In Datnoff et *al.*, 2007. Mineral nutrition and plants disease. American Phytopathological Society , Minesota USA, 278 pp.
- Rudolph J., 2010** - La phytoremédiation une technique "écologique" alternative aux techniques conventionnelles? La reconversion de friches industrielles et la dépollution des sols contaminés. Mémoire de fin de formation. Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Lyon. 32 P.

Ruiz D., Martinez V et Cerdá A., 1997 - Citrus response to salinity, growth and nutrient uptake. *Tree Physiology*, 17: 141–150.

Sairam R K et Tyagi A., 2004 - Physiology and molecular biology of salinity stress tolerance in plants. *Current Science*, 86 (3), 10: 407-421.

Sayed S A., 1999 - Effects of lead and kinetin on the growth, and some hysiological components of safflower. *Plant Growth Reg.* 29, 167.

Selim A-F H., 2001 - Studies on the effect of lead and some agents for remediation of lead ions on the performance of carrot plant (*Daucus carota* L.). M.Sc. Thesis, Fac.agric. menufiya univ.

Seregin IV et Ivaniov VB., 2001 - Physiological aspects of cadmium and lead toxic effects on higher plants. *Russian Journal of Plant Physiology* 48: 523-544 et 606-630

Seregin IV., Shpigun LK et Ivanov VB., 2004 - Distribution and toxic effects of Cadmium and Lead on maize roots. *Russian Journal of Plant Physiology*. 51(4): 525-533.

Sharma P et Dubey R S., 2005 - Lead toxicity in plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology*. 17(1): 35-52.

Sharma S S et Dietz K J., 2006 - The significance of amino acids and amino-derived molecules in plant responses and adaptation to heavy metal stress. *J. Exp. Bot.* 57: 711-726.

Sharmila P et Pardha Saradhi P., 2002 - Proline accumulation in heavy metal stressed plants : An adaptative strategy. In: *Physiology and Biochemistry of Metal Toxicity and Tolerance in Plants*. Prasad M.N.V. et Strzalka K. (Eds), pp. 179-199.

Sinha P., Dube B., Srivastava P et Chatterjee C., 2006 - Alteration in uptake and translocation of essential nutrients in cabbage by excess lead. *Chemosphere* 65(4):651–656

Silva E et Pereira C., 1976 - Aislaciòn y composiciòn de las proteínas de hojas de *Atriplex nummularia* y *A. repanda*. *Ciencia e Investigaciòn Agraria*, 3(4): 169-174.

Silveira P., Meloar B et Viegras R A., 2002 - Effets salinité induits sur l'assimilation d'azote liée à la croissance aux usines de doliques de Chine. *Exp. Bot* 46: 171 – 179.

Singh A., Kumar C S et Agarwal A., 2012 - Physiological study of combined heavy metal stress on *Hydrilla verticillata* (l.f.) Royle. *International journal of environmental sciences*. Volume 2, No 4.

Soheir E S., Khalil M Y et Naguib N Y., 2002 - Investigation of the effect of some elements (B, mo, Co, Pb) on growth, productivity and quality of *Cymbopogon citratus* L. *Ann. Agric. Sci.* 47(3), 911.

Références bibliographiques

- Sterckeman T., 2008** - Origine et devenir des éléments en traces dans le système sol-plante. Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme d'habilitation à diriger des recherches. Institut National Polytechnique de Lorraine.
- Sterckeman T., Douay F., Proix N et Fourier H., 2000** - Vertical distribution of Cd, Pb, and Zn in soils near smelters in the North of France. *Environmental Pollution* 107: 377-389.
- Szabados L et Savouré A., 2009** - Proline : a multifunctional amino acid. Review. *Trends in Plant Science*. Vol. 15: 89- 97.
- Tafforeau M., 2002** - Etude des phases précoces de la transduction des signaux environnementaux chez le lin : une approche protéomique. Thèse de doctorat en biochimie végétale. Université de Rouen. France. 255p.
- Taiz L et Zeiger E., 2006** - Fisiologia vegetal. Porto Alegre : Artmed, 719 p.
- Tardieu F et Dreyer E., 1997** - Régulation des échanges gazeux par les plantes soumises à la sécheresse. In l'eau dans l'espace rural. Production végétale et qualité de l'eau. Edited by INRA-Edition. Institut National de Recherche Agronomique p.41-59.
- Thiery L., Leprince A S., Lefebvre D., Ghars M A., Debarbieux E et Savouré A., 2004** - Phospholipase D Is a Negative Regulator of Proline Biosynthesis in *Arabidopsis thaliana*. *J. Biol. Chem.*, 279, (15): 14812-14818.
- Tremblin G et Ferard G., 1994** - Croissance et accumulation de sels chez *Halopeplis amplexicaulis* (Vahl.) Ung. cultivé à différentes salinités. *Acta Oecologica*. 15 (3): 355-364.
- USDA/ NRCS (United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service), 2002** - Plant Fact Sheet: Fourwing saltbush *Atriplex Canescens* (Pursh) Nutt., [Online]. http://plants.usda.gov/factsheet/pdf/fs_atca2.pdf.
- Vanobberghen F., 2009** - La phytoremédiation en Wallonie : Evaluation du potentiel d'assainissement des sols contaminés en métaux lourds. Mémoire de Master. P 42.
- Vickerman D B., Shannon M C., Banuelos G S., Grieve C M et Trumble J T., 2002** - Evaluation of atriplex lines for selenium accumulation, salt tolerance and suitability for a key agricultural insect pest. *Environmental Pollution* 120, 463- 473.
- Voorhees M E., Uresk D W et Trlica M J., 1991** - Substrate relations for rillscale (*Atriplex suckleyi*) on bentonite mine spoil. *Journal of Range Management* 44, 34-38.
- Wakeel A., Abd-El-Motagally F., Steffens D et Schubert S., 2009** - Sodium-induced calcium deficiency in sugar beet during substitution of potassium by sodium. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 172: 254–260.

Références bibliographiques

- Wakeel A., Steffens D et Schubert S., 2010** - Potassium substitution by sodium in sugar beet (*Beta vulgaris* L.) nutrition on K-fixing soils. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 173: 127–134.
- Walker W M., Miller J E et Hasset J J., 1997** - Effect of lead and cadmium upon the calcium, magnesium, potassium and phosphorus concentration in young corn plants. *Soil Science* 124: 145-151.
- Wang C., Wang X., Tian Y., Yu H., Gu X., Du W et Zhou H., 2007** - Oxidative stress, defence response and early biomarkers for lead-contaminated soil in *Vicia faba* seedlings. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1.
- Welsh S L., Atwood N D., Goodrich S et Higgins L C., 1987** - A Utah flora . The Great Basin Naturalist Memoir No. 9. Provo, UT: Brigham Young University. 894 p.
- Weryszko-Chmielewska E et Chwil M., 2005** - "Lead-Induced Histological and Ultrastructural Changes in the Leaves of Soybean (*Glycine max* (L.) Merr.). " *Soil Science and Plant Nutrition* 51(2): 203-212.
- White P J et Broadley M R., 2003** - Calcium in plants, *Ann. Bot.* 92 :487–511.
- White P J., 2000** - Calcium channels in higher plants. *Bioch. Biophys. Acta*, 1465, 171-189.
- Wierzbicka M H., Przedpeńska E., Ruzik R., Ouerdane L., Połec-Pawlak K., Jarosz M., Szpunar J et Szakiel A., 2007** - Comparison of the toxicity and distribution of cadmium and lead in plant cells. *Protoplasma* 231, 99-111.
- Wojas S., Ruszczyńska A., Bulska E., Wojciechowski M et Antosiewicz D M., 2007** - Ca²⁺ dependant response to Pb²⁺ is regulated by LCT. *Environmental Pollution* 147: 584-592.
- Xiong T., Bourque S., Lecourieux D., Amelot N., Grat S., Brière C., Mazars C., Pugin A et Ranjeva R., 2006** - Calcium signaling in plant cell organelles delimited by a double membrane. *Bioch. Biophys. Acta*, 1763, 1209-1215.
- Yang X E., Liu J X., Wang W M., Ye Z Q et Luo A C., 2004** - Potassium internal use efficiency relative to growth vigor, potassium distribution, and carbohydrate allocation in rice genotypes. *J. Plant Nutr.*, 27, 837-852.
- Zengin F K et Kirbag S., 2007** - Effects of copper on chlorophyll, proline, protein and abscisic acid level of sunflower (*Helianthus annuus* L.) seedlings. *Journal of Environmental Biology*. 28(3) 561-566.
- Zengin F K et Munzuroglu O., 2005** - Effects of some heavy metals on content of chlorophyll, proline and some antioxidant chemicals in bean (*phaseolus vulgaris* L.) seedlings. *Acta biologica cracoviensia Series Botanica* 47/2: 157–164.

Références bibliographiques

Zerrad W., Hillali S., Mataoui B., El Antri S et Hmyene A., 2006 - Étude comparative des mécanismes biochimiques de résistance au stress hydrique de deux variétés de blé dur. *Lebanese Science Journal*, Vol. 9, No. 2.

Zhang G., Fukami M et Sekimoto H., 2000 - Genotypic differences in effects of cadmium on growth and nutrient compositions in wheat. *J. Plant. Nutr.* 23: 1337-1350.

Zhang J., Nguyen H T et Blumo A., 1999 - Genetic analysis of osmotic adjustment in crop plant. *Journal of exp. Bot.*, 50, 322 p.

Zhu J K., 2001 - Plant salt tolerance. *Trends in plant Science*. University of Arizona. pp: 66-71.

Zid E et Boukheris M., 1977 - Quelques aspects de tolérance de l'*Atriplex halimus* L. en chlorure de sodium, multiplication, composition minéraux. *Oecol. Plant.* 12 : 351.

Zoghalmi L B., Djebali W., Chaïbi W et Ghorbel M H., 2006 - Modifications physiologiques et structurales induites par l'interaction cadmium-calcium chez la tomate (*Lycopersicon esculentum*). *Comptes Rendus Biol.*, 329, 702-711.

RESUME

La pollution des sols est un des plus dangereux problèmes environnementaux actuels. Dans ce cadre, notre laboratoire de physiologie végétale s'est penché vers l'étude de l'effet du plomb sur les plantes.

Le présent travail est réalisé sur deux espèces halophyles de la famille des Chénopodiacées *Atriplex halimus* L. et *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt. Ces espèces sont cultivées sous une serre contrôlée pendant une période de 70 jours, arrosées avec de l'eau distillée et la solution nutritive de Hoagland, puis traitées pendant une semaine avec une solution métallique à base de nitrate du plomb à des concentrations croissantes : 1000, 5000 et 10000 ppm.

L'étude du comportement biochimique de ces espèces consiste à analyser les paramètres suivants : la teneur en proline, la teneur en sucres solubles et la teneur en éléments minéraux (Na^+ , K^+ et Ca^{+2}).

Les résultats obtenus montrent chez les feuilles et les racines des deux espèces une augmentation des composés glucidiques, de la proline et du potassium; alors que pour le sodium, l'augmentation est observée seulement chez l'*Atriplex halimus*. En ce qui concerne le calcium, sa teneur diminue dans tous les organes sous l'influence de toutes les concentrations du plomb appliquées.

Mots clés :

Stress; Plomb; *Atriplex Halimus* L.; *Atriplex Canescens* (Pursh) Nutt.; Halophyte; Proline; Sucres Solubles; Sodium; Potassium; Calcium.

