



قسم البيولوجيا Département de Biologie

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

Magister en biologie

Option

«Sciences du Sol et Environnement»

Par

Mr. OUAINI Abderrahmane

Intitulé :

**Effet des métaux lourds dans les sols amendés en bentonite
(Plomb) sur les caractéristiques biométriques et biochimiques
chez quelques espèces d'*Atriplex***

Laboratoire de la biodiversité et conservation des eaux et des sols, université de Mostaganem.

Devant le jury composé de :

Nom et prénom	Grade	Qualité	Appartenance administrative
Berkani Abdallah	Pr	Président	U. Ibn Badis Mostaganem
Belkhodja Moulay	Pr	Examineur1	U. Es-Senia-Oran
Mekhaldi Abdekader	MCA	Examineur2	U. Ibn Badis Mostaganem
Reguieg Yssaad Houcine A. H	MCA	Encadreur	U. Ibn Badis Mostaganem
Belarbi Amaria	MAA	Co-Encadreur	U. Relizane

Année universitaire : 2011-2012

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, il m'est agréable d'exprimer ma profonde reconnaissance et ma gratitude aux personnes qui ont contribué à faciliter ma tâche et la mener à bien.

Je remercie tout d'abord mon Encadreur REGUIEG YSSAD. HA Maître de conférences à l'Université de Mostaganem et responsable de la poste graduation de la promotion de science des sols et environnement, pour la confiance, ses critiques constructives, qu'il m'a accordée tout au long de mon thème. Ce fut un plaisir d'expérimenter et d'apprendre par ses intuitions et ses connaissances scientifiques. Je lui exprime ma profonde gratitude pour l'aide qu'il m'a fournie pour la réalisation de ce travail, qu'il trouve ici l'expression de mon profond respect et de ma sincère reconnaissance.

Ce mémoire a été réalisé au laboratoire d'Écophysiologie végétale, Université de Es-Seina, Oran, Algérie dirigé par le professeur monsieur BELKHODJA Moulay. Je souhaite le remercier ici pour l'accueil qu'il a porté à ce travail, pour sa disponibilité, ses orientations, ses remarques fructueuses et d'avoir eu l'amabilité d'accepter d'être membre jury de ce travail. Qu'il trouve ici ma profonde gratitude.

Mes plus vifs remerciements vont à Melle BELERBI Amaria enseignant à l'université de Relizane et copromotrice de ce travail pour son soutien.

*J'*exprime également ma reconnaissance au professeur monsieur BERKANI Abdallah de l'Université de Mostaganem d'avoir bien voulu apporter sa contribution pour présider le jury de ce travail.

Mes plus vifs remerciements vont à Mr. MEKHALDI Abdelkader maître de conférences à l'université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem d'avoir eu l'amabilité d'accepter de juger ce travail.

Une profonde gratitude au groupe de SOUNATRACH du complexe GNL1 d'Arzew pour la réception et de m'avoir facilité mon intégration au sein de son équipe.

Dédicaces

Je dédie ce

*Modeste travail à ma mère ma source de tendresse
et de courage.*

*à la vie de mon père et que dieu l'accorde dans son vaste
paradis*

*à mes amis du magister promotion 2011 : Djoudi .A,
Benouiss.S, Nouri.T, Bouziani.H, Ouanouki. M.*

*à mes amis qui font mon équilibre, pour leur présence dans
ma vie.*

*à tous ceux qui connaissent et aiment Abdarraahmane
de près ou de loin.*

OUAINI Abderrahmane

Liste des tableaux

Tableau 1: Nombre approximatif des espèces d'*Atriplex* dans diverses régions arides et semis arides du monde.

Tableau 2 : Classification botanique d'espèce *Atriplex halimus* L.

Tableau 3 : Classification botanique d'espèce *Atriplex canescens* L.

Tableau 4 : Caractéristiques physico-chimiques de la bentonite de Mostaganem.

Tableau 5: Composition chimique (en %) de bentonite de Mostaganem.

Tableau 6 : Caractéristiques minéralogiques de la bentonite.

Tableau 7: Accroissement du rendement par l'application de la bentonite.

Tableau 8: Principales propriétés physiques et chimiques du Plomb

Tableau 9 : Poids sec de bentonite en grammes par rapport au pourcentage de la dose de bentonite retenue.

Tableau 10: Caractéristiques de la serre automatisée de l'université d'Oran.

Tableau 11: Composition chimique de la solution **Hoagland**.

Tableau 12 : Composition de la solution de nitrate de plomb.

Tableau 13: Dispositif expérimental adopté dans la serre.

Tableau 14: teneurs moyennes en **chlorophylle a**, **chlorophylle b** et chlorophylle totale chez *Atriplex halimus* L. cultivée dans les substrats amendés en bentonite et stressés au plomb.

Tableau 15: teneurs moyennes en **chlorophylle a**, **chlorophylle b** et chlorophylle totale chez *Atriplex canescens* L. cultivées dans les substrats amendés en bentonite et stressées au plomb.

Tableau 16: teneurs moyennes en sucres solubles chez les deux espèces d'*Atriplex* cultivées dans les substrats amendés en bentonite et stressées au plomb.

Tableau 17: teneur en eau relative chez les deux espèces d'*Atriplex* cultivées dans les substrats amendés en bentonite et stressées au plomb.

Tableau 18: Poids frais de la partie aérienne et des racines chez *Atriplex halimus* L. cultivée dans les substrats amendés en bentonite et stressées au plomb.

Tableau 19 : Poids frais de la partie aérienne et des racines chez *Atriplex canescens* L. cultivée dans les substrats amendés en bentonite et stressés au plomb.

Tableau 20 : Poids sec de la partie aérienne et des racines chez *Atriplex halimus* L. cultivée dans les substrats amendés en bentonite et stressés au plomb.

Tableau 21 : Poids sec de la partie aérienne et des racines chez les plantes d'*Atriplex canescens* L. cultivées dans les substrats amendés en bentonite et stressés au plomb.

Tableau 22: Accumulation du plomb dans les parties aérienne et racinaire chez *Atriplex halimus* L. cultivée dans les substrats amendés en bentonite et stressées au plomb.

Tableau 23: Accumulation du plomb dans les parties aérienne et racinaire chez *Atriplex canescens* L. cultivée dans les substrats amendés en bentonite et stressées au plomb.

Liste des figures

Fig. 1 : Domaine des recherches fondamentales et appliquées des minéraux argileux

Fig. 2 : Représentation schématique d'un feuillet de phyllosilicates 2:1.

Fig. 3 : La table périodique

Fig. 4 : Différents formes et localisation des ETM dans les sols

Fig. 5 : schéma de l'acquisition des teneurs totales en ETM des sols.

Fig. 6 : Dynamique du plomb dans le système sol-plante.

Fig. 7: Les différents types de phytoremédiation.

Fig.8 : Schéma de principe du traitement de sols pollués par phytoextraction

Fig.9 : Schéma représentant une phytoextraction induite par des chélateurs.

Fig.10 : Schéma représentant une phytoextraction continue.

Fig.11 : Schéma de principe du traitement de sols pollués par phytostabilisation

Fig.12 : schéma de la Phytovolatilisation.

Fig.13 : Le protocole expérimental adopté.

Fig.14 : Effet combiné du plomb et de la bentonite sur la teneur en **chlorophylle a** et **chlorophylle b** de l'espèce *Atriplex halimus* L.

Fig. 15: Effet combiné du plomb et de la bentonite sur la teneur en chlorophylle total de l'espèce *Atriplex halimus* L.

Fig.16: Effet combiné du plomb et de la bentonite sur la teneur en **chlorophylle a** et **chlorophylle b** de l'espèce *Atriplex canescens* L.

Fig. 17 : Effet combiné du plomb et de la bentonite sur la teneur en chlorophylle totale de l'espèce *Atriplex canescens* L.

Fig.18: Effet combiné du plomb et de la bentonite sur la teneur en sucres solubles de l'espèce *Atriplex halimus* L.

Fig.19 : Effet combiné du plomb et de la bentonite sur la teneur en Sucres solubles de l'espèce *Atriplex canescens* L.

Fig.20 : Effet combiné du plomb et de la bentonite sur la teneur en relative en eau de l'espèce *Atriplex halimus* L.

Fig.21 : Effet combiné du plomb et de la bentonite sur la teneur en relative en eau de l'espèce *Atriplex canescens* L.

Fig.22 : Effet combiné du plomb et de la bentonite sur biomasse fraîche aérienne et racinaire d'*Atriplex halimus* L.

Fig.23 : Effet combiné du plomb et de la bentonite sur l'évolution de la biomasse fraîche aérienne

Fig.24: Effet combiné du plomb et de la bentonite sur biomasse fraîche aérienne et racinaire d'*Atriplex canescens* L.

Fig.25: l'effet combiné du plomb et de la bentonite sur l'évolution de la biomasse fraîche aérienne et racinaire d'*Atriplex canescens* L.

Fig. 26: Effet combiné du plomb et de la bentonite sur biomasse sèche aérienne et racinaire d'*Atriplex halimus* L.

Fig. 27: l'effet combiné du plomb et de la bentonite sur l'évolution de la biomasse fraîche aérienne et racinaire d'*Atriplex halimus* L.

Fig.28: Effet combiné du plomb et de la bentonite sur biomasse sèche aérienne et racinaire d'*Atriplex canescens* L.

Fig.29: l'effet combiné du plomb et de la bentonite sur l'évolution de la biomasse fraîche aérienne et racinaire d'*Atriplex canescens* L.

Fig. 30 : Effet combiné du plomb et de la bentonite sur la concentration du plomb dans les parties aérienne et racinaire d'*Atriplex halimus* L.

Fig. 31 : Effet combiné du plomb et de la bentonite sur la concentration du plomb dans les parties aérienne et racinaire d'*Atriplex canescens* L.

Liste des photos

Photo 1: Touffes d'*Atriplex halimus* L.

Photo 2 : *Atriplex canescens* L.(Photo Originare) sur de la willaya d'El Bayadh.

Photo 3: Méthode de préparation du sable (étape de tamisage).

Photo 4: Deux espèces d'*Atriplex*.

Photo 5 : La serre automatisée de l'université d'Es- Senia d'Oran.

Photo 6 : Dispositif expérimental adopté à la serre pour les deux espèces d'*Atiplex*

LISTE DES ABREVIATIONS

%	: Pour cent
°C	: Degré Celsius
C.E.C	: Capacité d'échange cationique
cm	: Centimètre
CO ₂	: Dioxyde de carbone
CO ₃ ⁻	: Carbonate
ETM	: Élément trace métallique
FAO	: Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture
Fig.	: Figure
g	: Gramme
H	: Heure
HNO ₃	: Acide Nitrique
INRA	: institut national des recherches agronomiques.
K ⁺	: ion de potassium
KCl	: Chlorure de potassium
Km	: Kilomètre
L	: Litre
m ³	: Mètre cube
ml	: Millilitre
mm	: Millimètre
NO ₃ ⁻	: Nitrate
O ₂	: Oxygène
PbNO ₃	: Nitrate de plomb
ppm	: Partie par million
RFU	: Réserve facilement utilisable.
RWC	: Teneur relative en eau
SO ₄ ⁻²	: Sulfate
T°	: Temperature

Table des matieres

Introduction	1
I.1 Description du genre <i>Atriplex</i> :	6
I.2 <i>Atriplex halimus</i> :	7
I.3 Intérêts de la plante :	10
I.3.1 Évaluation écologique et agronomique :	10
II-1 Généralité sur les argiles :	13
II-2 Définition et origine de la Bentonite :	13
II-3 Structure de la bentonite :	14
II-4 Caractérisation physico-chimique de la bentonite de Mostaganem :	15
II-5 Domaine d'utilisation :	16
II-6 Bentonite en agriculture :	17
III-1 Définition des métaux lourds :	20
III-2-1 Sources naturelles :	22
III-2-2 Sources anthropiques:	23
III-3 Le plomb :	24
III-3-1 Historique :	24
III-3-2 Propriétés physico-chimiques du plomb:	25
III-3-3 Toxicité du plomb :	25
IV-1- La phytoremédiation :	31
IV-1-1 La phytoextraction:	32
IV-1-2 La phytostabilisation :	34
IV-1-3 La phytovolatilisation :	35
IV-1-4 La phytodégradation :	36
IV-2 Avantages de la phytoremédiation :	36
IV-3 Inconvénients de la phytoremédiation:	37
V. Matériels et méthodes :	41
V.1 Matériel sol :	41
V.1.1 Préparation du substrat de culture :	41
V.2 Matériel végétal :	42
V.2.1. Choix de l'espèce végétale :	42
V.3. Conduite de l'essai :	43
V.3.1. Le semis :	43
V.3.2. L'arrosage :	44
V.4. Paramètres mesurés	46
V.4.1 Mesures physiologiques	46
V.4.1.1 Dosage des sucres soluble	46
V.4.1.2 Dosage de la chlorophylle:	47

V.4.1.3. Teneur en eau relative.....	47
V.5. Extraction et dosage chimique de la plante	47
V.5.1. Le dosage des métaux lourds dans les plantes.....	47
V.5 Analyse statistique :	48
1. Paramètres physiologiques	51
1.1. Teneur en chlorophylle.....	51
a) Espèce <i>Atriplex halimus</i> L.....	51
a.1 Chlorophylle a	51
a.2 Chlorophylle b.....	52
a.3 Chlorophylle totale	55
Espèce <i>Atriplex canescens</i> L.	55
b.1 Chlorophylle a.....	55
b.2 chlorophylle b.....	57
b.3 chlorophylle totale.....	59
Discussion	60
1.2 Sucres solubles	61
a) Espèce <i>Atriplex halimus</i> L.....	62
• À 0% de bentonite	62
• À 7 et 10% de bentonite	63
b) <i>Atriplex canescens</i> L.	63
• À 0% de bentonite	63
• À 7 et 10% de bentonite	64
Discussion	65
1.3 Teneur en eau relative	66
a) Espèce <i>Atriplex halimus</i> L.....	66
• À 0% de bentonite	66
• À 7 et 10% de bentonite	67
b) Espèce <i>Atriplex canescens</i> L.	68
• À 0% de bentonite	68
• À 7 et 10% de bentonite	68
Discussion	69
2. Paramètres biométriques	70
2.1 La biomasse fraîche des plantes	70
a) Espèce <i>Atriplex halimus</i> L.	70
• À 0 % de bentonite	70
• À 7 et 10 % de bentonite	71
b) Espèce <i>Atriplex canescens</i> L.....	74

• À 0 % de bentonite	74
• À 7 et 10 % de bentonite	75
2. 2 La biomasse sèche des plantes	78
a) Espèce <i>Atriplex halimus</i> L.	78
• À 0% de bentonite	78
• À 7 et 10 % de bentonite	79
b) Espèce <i>Atriplex canescens</i> L.	80
• À 0 % de bentonite	81
• À 7 et 10 % de bentonite	82
Discussion	85
2. 3 Dosage du plomb dans les plantes.....	87
a) Espèce <i>Atriplex halimus</i> L.	87
• À 0 % de bentonite	87
• À 7 et 10 % de bentonite	88
b) Espèce <i>Atriplex canescens</i> L.	89
• À 0 % de bentonite	89
• À 7 et 10 % de bentonite	90
Discussion	91
Discussion et conclusion générale.....	94

Introduction

Depuis le développement industriel du XIXe siècle, la pollution des sols et de l'eau, par les métaux lourds, les hydrocarbures ou encore les composés organiques, est devenue une menace très importante pour la santé humaine et l'environnement (**Bert, 1999**), parmi les principaux polluants générés par les activités industrielles, les métaux lourds posent effectivement des problèmes particulièrement préoccupants. Ces éléments, par nature non biodégradables, présentent une forte écotoxicité et pourraient être impliqués dans de nombreuses pathologies (atteintes du système nerveux central, du foie, des reins, mais aussi cancers et malformations embryonnaires) (**Abrahams, 2002 ; Adriano, 2001**).

Les métaux lourds tels que le plomb, le cadmium, le cuivre, le zinc, et le mercure ne peuvent pas être biodégradés et donc persistent dans l'environnement pendant de longues périodes. De plus ils sont continuellement rajoutés dans les sols par diverses activités : en agriculture par l'application de boues d'épuration ou dans l'industrie métallurgique. L'accumulation des métaux lourds dans l'environnement peut se répercuter sur la santé des êtres humains et des animaux (**Wang et al., 2003**). Ils peuvent également être absorbés directement par le biais de la chaîne alimentaire entraînant alors des effets chroniques ou aigus (**Auboiroux et al., 1996 ; Arfaoui et al., 2008**).

Le nombre important de terrains pollués par une activité industrielle ancienne ou par des dépôts de produits de curage/dragage contaminés entraîne le problème de la gestion de ces sites et de leur éventuel traitement. La valorisation et la requalification de sites pollués peut se faire par une alternative de traitement qu'est la végétalisation à partir d'espèces particulières, tolérantes aux pollutions (**Henri-Charles et al., 2001**).

Afin de pallier les principales limitations des méthodes actuellement disponibles dans les stratégies de dépollution, les recherches s'orientent depuis quelques années vers l'utilisation de plantes supérieures (**Esteban, 2006**).

Certaines plantes, dites métalphytes, sont capables de se développer normalement sur des sites fortement contaminés par divers métaux et certains de ces végétaux, qualifiés d'hyperaccumulateurs (**Brooks, 1998**), sont capables de stocker massivement les métaux dans leurs parties aériennes. Ainsi, les études concernant l'écophysiologie et le métabolisme des

plantes supérieures en milieu contaminé, ont progressivement permis d'insérer le concept de phytoremédiation à côté de celui de bio-remédiation des sites pollués (**Esteban, 2006**).

Le développement de techniques efficaces pour décontaminer les sites pollués est devenu indispensable. L'une d'elle, la phytoremédiation, exploite les propriétés de certaines plantes à accumuler de grandes quantités de métaux lourds (**Rufus et al., 1997 ; Salt et al., 1998 ; Prabha et al., 2007**).

Aujourd'hui, le terme de phytoremédiation est largement accepté et regroupe toutes les méthodes basées sur l'utilisation de végétaux supérieurs dans un but de dépollution. Malgré leur développement récent, ces méthodes sont variées et des résultats encourageants ont d'ores et déjà été obtenus pour des problématiques diverses (**Esteban, 2006**).

Le terme de phytoremédiation a été inventé en 1991. La plupart des informations et des recherches concernant ce sujet proviennent initialement du secteur agricole (**Anonyme, 2000**). Les techniques utilisées par la phytoremédiation sont rendues possibles par un processus d'hyperaccumulation développé par les plantes. Il n'existe pas de définition clairement établie de l'hyperaccumulation, mais Brooks considère les plantes accumulant dix fois plus d'éléments que les autres comme des plantes hyperaccumulatrices (**Bert, 1999**).

Les *Chénopodiacées* représentent une famille d'halophytes hyperaccumulatrices très importante qui mérite une attention toute particulière. Cette famille de plantes halophiles est très répandue en Algérie et est utilisée pour l'alimentation humaine et animale, surtout dans les régions à climats aride et semi-aride. A cette famille appartiennent le genre *Atriplex* qui peut contribuer à la valorisation des sols marginaux et l'amélioration de la production végétale et animale (**Bouchoukh, 2010**).

L'*Atriplex* est une espèce réputée par sa grande rusticité, amplitude écologique, polymorphisme et à sa reproduction allogame dominante (**Haddioui et Baaziz, 2001**). Elle attire l'attention de nombreux chercheurs et constitue le matériel de choix pour plusieurs investigations.

En fait, des études récentes ont permis de souligner le caractère promoteur de l'espèce qui a montré de grandes capacités d'absorption de certains cations métalliques tels que le cadmium, zinc, le sélénium et le plomb (**Lutts et al., 2004 ; Kadukova et al., 2004 ;**

Vickerman et al., 2002 ; Belarbi, 2008). Elle est capable d'accumuler des quantités importantes de ces éléments sans présenter d'inhibition de croissance ou de mortalité.

Dans le domaine de la phytoremédiation les notions suivantes «hyper-accumulation», «tolérance», «résistante» sont les éléments de détermination de l'efficacité des plantes dans la dépollution des sites pollués.

Le genre *Atriplex*, a partir de beaucoup des études, est classé comme des plantes halophytes résistantes à la sécheresse et la salinité avec une tolérance vis-à-vis les métaux lourds.

L'objectif essentiel de notre travail consiste à étudier l'effet combiné du plomb et de la bentonite sur les deux espèces d'*Atriplex halimus* L. et *Atriplex canescens* L. .

Ce travail comporte deux grandes parties :

- La première partie concerne la synthèse bibliographie sur les deux espèces du genre *Atriplex* : *Atriplex halimus* et *Atriplex canescens*, la bentonite, le métal lourd plomb 'Pb' et la phytormédiation.
- La deuxième partie est consacrée au protocole expérimental adopté pour la réalisation de notre travail.
- Enfin la troisième partie concerne les résultats et discussion.

Synthèse bibliographique

Chapitre 1

Le genre d'Atriplex

I.1 Description du genre *Atriplex* :

Les plantes du genre *Atriplex* sont présentes dans la plupart des régions du globe. Elles appartiennent à la famille des *Chenopodiaceae* et se caractérisent par leur grande diversité. Certaines espèces sont herbacées, d'autres arbustives; elles peuvent être annuelles ou pérennes. Plusieurs d'entre elles possèdent une résistance élevée à la sécheresse et à la salinité (**Kinet et al., 1998**).

Le genre *Atriplex* compte environ 420 espèces réparties dans les zones tempérées, méditerranéennes et subtropicales, entre 20 et 50° de latitude Nord et Sud (Le Houérou, 1992). La plupart de ces espèces se développent dans des régions arides et salines, bien que certaines soient implantées dans des marais salants ou des marais d'eau douce (Kelley et al., 1982).

Du point de vue morphologique, les *Chenopodiaceae* sont caractérisées par des racines profondes et pénétrantes, destinées à absorber la plus grande quantité d'eau possible, et des feuilles alternées, petites, farineuses ou recouvertes de poils, lobées, parfois épineuses et formées de manière à réduire les pertes en eau dues à la transpiration. Certains genres ont des tiges pulpeuses, à courts segments internodaux et sont entièrement dépourvues de feuilles, ce qui donne aux plantes un aspect singulier semblable à celui d'un cactus. Les fleurs, peu visibles et regroupées en inflorescences en épi ou à cyme, sont petites, hermaphrodites ou unisexuelles et sont pollinisées par le vent. Les pétales et les sépales, très semblables, sont généralement constitués par cinq, trois ou deux lobes de couleur marron ou verdâtre (**Mulas, M. et Mulas, G., 2004**).

Tableau 1: Nombre approximatif des espèces d’Atriplex dans diverses régions et pays arides et semis arides du monde (Le Houérou, 1992).

Pays ou régions	Nombre d’espèces et/ou sous-espèces	Pays ou régions	Nombre d’espèces et/ou sous espèces
États unis	110	Baja Californie (Mexique)	25
Australie	78	Afrique du nord	22
Bassin méditer.	50	Texas	20
Europe	40	Afrique du sud	20
URSS	40	Iran	20
Proche orient	36	Syrie	18
Mexique	35	Palestine / Jordanie	17
Argentine	35	Algérie / Tunisie	17
Californie	32	Bolivie / Pérou	16
Chili	30		

I.2 *Atriplex halimus* :

Systématique :

Tableau 2 : Classification botanique d’espèce *Atriplex halimus* L.

Embranchement	Spermatophytes (Messaili, 1995)
Sous embranchement	Angiospermes (Grenet, 1997)
Classe	Dicotylédones(Messili, 1995)
Famille	Chénopodiaceae (Mulas, M. et Mulas, G., 2004)
Genre	<i>Atriplex</i> (Rosas, 1989)
Espèce	<i>halimus</i> L. (Ben daanoun, 1991)



Photo 1: Touffes d'*Atriplex halimus* (Phot. **Le Houérou, 1996**).

L'*Atriplex halimus* L. est un arbuste natif d'Afrique du Nord où il est très abondant; il s'étend également aux zones littorales méditerranéennes de l'Europe et aux terres intérieures gypso-salines d'Espagne (**Kinet et al., 1998**).

Dotée d'une biomasse aérienne et racinaire assez importante, elle constitue un outil efficace et relativement peu coûteux dans la lutte contre l'érosion et la désertification et dans la réhabilitation des terres dégradées. Ces caractéristiques font d'*Atriplex halimus* une excellente espèce pour la réhabilitation des zones dégradées pastorales (**Abbad et al, 2004**).

L'introduction d'arbustes fourragers tolérants à la salinité est l'une des techniques utilisées pour la valorisation des sols marginaux. Face à ce problème, les *Atriplex* présentent une bonne tolérance aux conditions défavorables du milieu (**Ben Ahmed et al.,1996**).

Le genre *Atriplex*, qui appartient à la famille des chénopodiacées compte plus de 417 espèce, pour l'identification et le classement, en tien en générale les bases morphologique : disposition et forme des feuilles, coalescence des valves fructifères et tailles des plantes (**Francllet et Houérou, 1971**).

Le genre *Atriplex* inclut 48 espèces et sous-espèces dans le bassin méditerranéen, et au moins 05 d'entre elles pourraient être employés comme arbustes de fourrage (**Choukr-Allah, 1997**).

I.3 *Atriplex canescens* :

Systematique :

Tableau 3 : Classification botanique d'espèce *Atriplex canescens* L.

Embranchement	<i>Spermaphytes</i> (Messaili, 1995)
Sous embranchement	<i>Angiospermes</i> (Grenet, 1997)
Classe	<i>Dicotylédones</i> (Messili, 1995)
Famille	<i>Chénopodiaceae</i> (Mulas, M. et Mulas, G., 2004)
Genre	<i>Atriplex</i> (Rosas, 1989)
Espèce	<i>canescens</i> L.



Photo 2: *Atriplex canescens* (Photo Originare) sur de la willaya d’El Bayadh (en mois de Février).

Espèce originaire du Nord-Ouest Américain, on la trouve au Colorado, Utah, Wyoning, Nevada, New Mexico, Ouest du Texas et le Nord du Mexique. C’est un arbuste buissonneux de 1 à 3 m de haut, formant des touffes de 1 à 3 m de diamètre. Le port est plus au moins intriqué, les rameaux blanchâtres, les feuilles courtement pétiolées, entières, alternes, linéaires, lancéolées, uninerviées, et grisâtre, de 3 à 5 cm sur 0,3 à 0,5 cm accompagnées de feuilles axillaires plus petites (0,5 à 1,5 sur 0,1 à 0,3 cm) (Bouchoukh, 2010).

L'inflorescence est dioïque, en épis simples ou paniculés au sommet des rameaux pour les mâles, axillaires ou en épis subterminaux pour les femelles (**Francllet et Le Houérou, 1971**)

I.3 Intérêts de la plante :

I.3.1 Évaluation écologique et agronomique :

L'*Atriplex halimus* est un arbuste halophile fourrager des steppes arides, important dans l'économie d'élevage des pays de l'Afrique du Nord et du Moyen-Orient. Bon rétenteur des sols, cette plante a aussi une importance écologique. Or, les formations à *Atriplex halimus* sont de plus en plus dégradées (**Pourrat et Dutuit, 1994**).

D'après **Pierre Dutuit (1999)**, des études montrées que la phytomasse fourragère provenant des *Atriplex* est particulièrement riche en matières azotées mais pauvre en énergie. Ce déficit énergétique peut être comblé par les fourrages herbacés ce qui a justifié une étude des effets des *Atriplex*, sur la strate herbacée associée dans le but de sélectionner les arbustes qui favorisent la productivité et la qualité nutritionnelle fourragère de la strate herbacée).

Les plantations d'arbustes fourragers constituent un facteur de protection de l'environnement:

- Protection contre l'érosion éolienne ;
- Protection contre l'érosion hydrique, fixation du sol, conservation des eaux ;
- Fixation des dunes, protection des oasis, des routes, etc.
- Les arbustes fourragers peuvent valoriser des terres marginales inutilisables en agriculture traditionnelle (terres salées,...) (**Nefzaoui et Chermiti, 1991**).
- L'*atriplex halimus* est une espèce spontanée et sa résistance à l'environnement dur, peut être une raisonnable solution d'exploitation dans les terres marginales présentant une teneur élevée en sel (**Hamel, 2009**).
- L'*Atriplex halimus* est un arbuste halophile fourrager des steppes arides, important dans l'économie d'élevage des pays de l'Afrique du Nord et du Moyen-Orient. Bon rétenteur des sols, cette plante a aussi une importance écologique. Or, les formations à *Atriplex halimus* sont de plus en plus dégradées (**Pourrat et Dutuit, 1994**).

I.3.2 Utilisation d'*Atriplex* en phytoremédiation :

Afin de pallier les principales limitations des méthodes actuellement disponibles dans les stratégies de dépollution, les recherches s'orientent depuis quelques années vers l'utilisation de plantes supérieures (**Esteban, 2006**).

Certaines plantes accumulent des quantités inhabituelles d'éléments métalliques ; 100 mg/kg de matière sèche pour le Cd, 1000 mg/kg pour le Ni, le Cu, le Co ainsi que 10 000 mg/kg pour le Zn et le Mn. Ces espèces sont alors qualifiées de plante «hyperaccumulatrice» (**Esteban, 2006**).

Les espèces du genre *Atriplex* sont souvent utilisées dans la réhabilitation de sites difficiles; ces espèces sont tolérantes au bore et des teneurs importantes en cet élément (jusqu'à 610 mg/kg MS) ont été quantifiées dans les tissus de *A. canescens* et *A. polycarpa* poussant sur des sols miniers (**Chatterton et McKell, 1969**). De même des espèces d'*Atriplex* annuelles sont connues pour contenir de fortes teneurs en fer (Fe), en manganèse (Mn) et en aluminium (Al) (**Voorhees, 1990; Voorhees et al., 1991**).

Dans la majorité des cas, les espèces du genre *Atriplex* sont testées à des fins de phytostabilisation plutôt que dans un but de phytoextraction. C'est particulièrement le cas pour l'espèce américaine *Atriplex canescens*, qui permet d'assurer la stabilisation dans les horizons superficiels du sol d'éléments comme barium (Ba), chrome (Cr) et nickel (Ni) (**McFarland et al., 1994**).

Chapitre II

La Bentonite

II-1 Généralité sur les argiles :

L'argile est une matière première utilisée depuis longtemps dans les différentes activités de la vie humaine. Le mot argile provient du mot grec «Argos» ou de latin «Argilo» qui veut dire blanc (Bendou, 2009).

Le terme "Argiles" désigne non seulement une formation rocheuse et la matière première qui en résulte et dont les caractéristiques sont présentées ci-après, mais il définit aussi un domaine granulométrique comprenant des particules minérales, dont le diamètre des grains est inférieur à deux micromètres (< 2 µm) (Bouras, 2003).

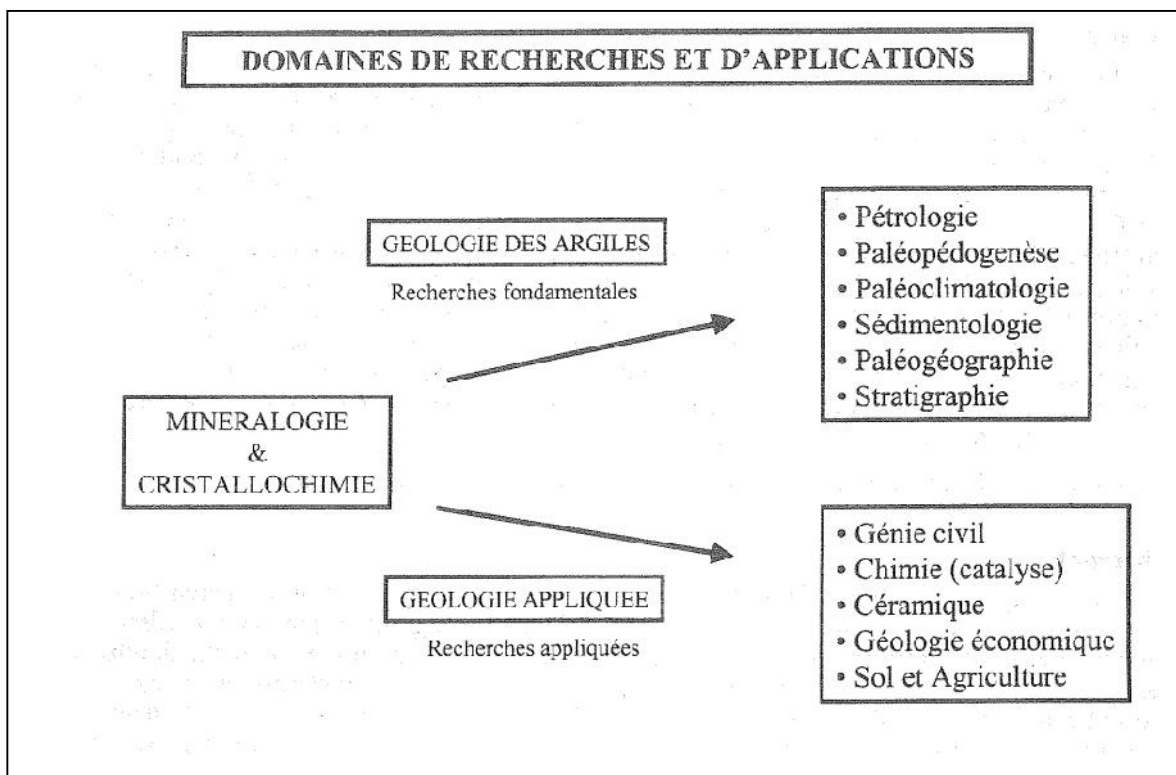


Fig. 1: Domaine des recherches fondamentales et appliquées des minéraux argileux (Jacque, 2003).

II-2 Définition et origine de la Bentonite :

Le mot «Bentonite» dérivé du nom fort Beton dans le Woming (USA) où en 1888 fut découverte une nouvelle variété d'argile ,il s'agit d'une appellation technique donnée pour toute argile ayant comme composant principal la montmorillonite, dont le nom fut proposé en 1847 par Damour et Salvétat pour rappeler le nom de montagne Montmorillon, près de vienne(France) où elle est découverte la première fois (Bendou, 2009).

La bentonite est donc une argile de couleur gris-blanc formée par le vieillissement de cendres volcaniques. En Algérie, il existe deux gisements de bentonite de grande importance économique qui se trouvent dans l'ouest Algérien: le gisement de (Maghnia Hammam Boughrara) dont les réserves sont estimées à onze million de tonnes et celui de Mostaganem (M'Zila) dont les réserves sont de 1,1 millions de tonnes (**Benkhelifa, 2007**).

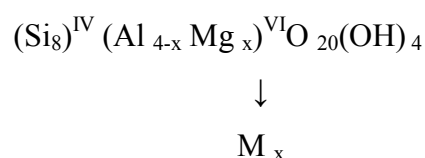
Nous pouvons distinguer deux grands groupes de bentonites :

- les bentonites sodiques naturelles (gonflantes et actives naturellement) ;
- les bentonites calciques naturelles (peu gonflantes, peu actives).

II-3 Structure de la bentonite :

L'organisation de la microstructure de la bentonite du feuillet à l'assemblage d'agrégats (**Fig. 2**), montre qu'elle diffère des autres argiles telles que l'Illite et la Kaolinite par la dimension, la forme et la distribution des espaces poraux dépendant elles mêmes de la granulométrie, du pouvoir gonflant mais aussi du fluide interstitiel et des contraintes auxquelles la bentonite est soumise (**Touret et al., 1990**).

L'argile constituée des matériaux appelés les phyllosilicates sont des silicates dans lesquels les tétraèdres de SiO₄ forment des feuillets infinis bidimensionnels. Ces feuillets tétraédriques sont condensés avec des octaèdres d'oxydes métalliques dans un rapport 2:1 ou 1:1. L'organisation structurale des phyllosilicates est basée sur les ions O⁻² et OH⁻ (**Caillère et al., 1982**). Dans les cavités de ces unités structurales élémentaires ils existent des cations de tailles variables (Si⁴⁺, Al³⁺, Fe³⁺, Fe²⁺, Mg²⁺) en position tétraédrique ou octaédrique. Ces éléments s'organisent suivant un plan pour constituer des couches octaédriques et tétraédriques dont le nombre détermine l'épaisseur du feuillet. Les différents groupes de minéraux argileux se différencient par l'arrangement de leurs couches tétraédriques et octaédriques (**Fig.n°2**). La bentonite composée de montmorillonite appartenant à la famille des smectites et se trouvant dans le groupe des dioctaédriques. Cette montmorillonite a la structure suivante (**Touret et al., 1990**).



Les nombres IV et VI désignent les couches tétraédriques et octaédriques respectivement. Mx désigne le cation échangeable logé dans l'espace interfoliaire. Il compense le déficit de charge existant dans la maille élémentaire.

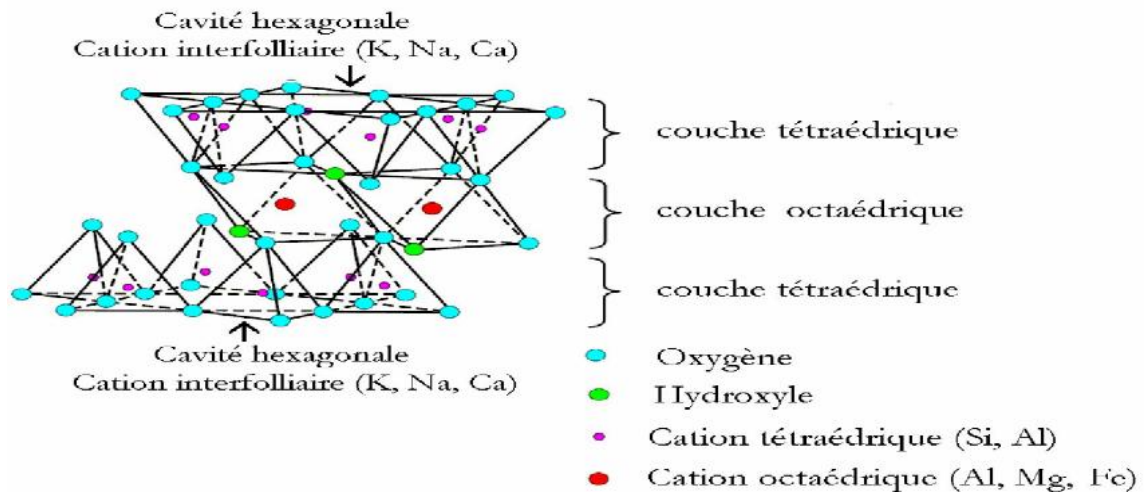


Fig. 2: Représentation schématique d'un feuillet de phyllosilicates 2:1.

(Luckham et Rossi, 1999).

II-4 Caractérisation physico-chimique de la bentonite de Mostaganem :

Le gisement de bentonite de Mostaganem est situé 37 km au Nord-est du chef lieu de la wilaya dans une localité appelée Mzila. La bentonite de Mostaganem elle destinée généralement à l'industrie pétrochimique. D'après **Bental (2002)**, la bentonite de Gisement de Mzila est plus sodique.

Sa grande surface spécifique, de l'ordre de 347 m²/g est à l'origine de sa capacité d'adsorption considérable (**SIGG., 1991**). Elle présente une capacité d'échange cationique (C.E.C) élevée et un pH basique (**Tableau n°4**).

Tableau 4 : Caractéristiques physico-chimiques de la bentonite de Mostaganem (Halilat et *al.*, 2006 ; Seghairi, 2004 ; Youcef, 2005).

Paramètre	teneurs	paramètre	Teneurs
Argile%	63	pH	9,0
Limon %	20	Ca (meq/100g)	43,6
Sable %	17	Mg (meq/100g)	4,8
Surface spécifique (m ² /g)	347	Na (meq/100g)	25,2
CEC (Cmol/kg)	49	K (meq/100g)	6
Na/CEC (%)	77	Na/Ca (meq/100g)	0,58

Sur le plan chimique, la bentonite de Mostaganem composée de sept macro éléments chimique (Tableau 5).

Tableau 5: Composition chimique (en %) de bentonite de Mostaganem (Bendjama, 1982).

Élément chimique	Pourcentage (%)	Élément chimique	Pourcentage (%)
SiO ₂	64,63	MgO	3,35
Al ₂ O ₃	14,35	Na ₂ O	1,50
Fe ₂ O ₃	3,44	K ₂ O	1,01
CaO	4,02		

La bentonite de Mostaganem est une argile riche en montmorillonite contient 45 à 50% (Tableau 6).

Tableau 6: Caractéristiques minéralogiques de la bentonite. (Enof, 1997 in Seghairi, 2001).

Identification des minéraux			
Montmorillonite	Quartz	Feldspaths	Biotites
45 à 60 %	15 à 20 %	3 à 5 %	8 à 10 %

II-5 Domaine d'utilisation :

La bentonite est largement utilisée dans de nombreux secteurs industriels (pharmacie, cosmétique, chimie, génie civil, agroalimentaire, fonderie, agriculture...). Elle est utilisée dans la protection de l'environnement sous forme pâteuse ou à l'état de poudre pour constituer des barrières étanches de stockage des déchets

industriels et ménagers (géomembrane) ainsi que les déchets radioactifs (barrière ouvragée en poudre compactée) (**Boumaaza, 2011**).

On peut citer son emploi comme terre décolorante dans l'industrie des matières grasses, en tant que liant dans le génie civil et comme catalyseur et échangeur d'ions dans l'industrie chimique et pétrolière.

Aussi, elle est utilisée dans l'industrie du papier, textile, et du cuir comme sorbant adéquat dans l'épuration des eaux résiduaires contaminée par les métaux lourds et dans les produits cosmétiques (**Bendou, 2009**).

II-6 Bentonite en agriculture :

En agriculture, la bentonite connaît beaucoup d'application .elle permet de mettre en valeur les très légère (**Engelhater et al., 1985**), et protège les sols contre l'érosion éolienne, elle est utilisée pour la protection contre les insectes et dans la médecine vétérinaire, en outre la bentonite peut se mélanger avec le fumier ou autres excréments d'animaux afin d'être utilisée comme agent de déshydratation. La bentonite est employée pour l'enrobage des engrais.

Halilat et Tessier (2006), ont montré que la bentonite améliore les paramètres chimiques des sols sableux. Par ailleurs, elle confère au sol sa structure et ses propriétés mécaniques. Elle est associée aux autres composants et constituent le complexe argilo-humique ou (organo-minéral). la bentonite est généralement à l'état floculé en s'associant avec l'humus par l'action des ions Ca^{+2} et H^{+} , ce qui donne au sol ses qualités agronomiques: bonne aération entre les agrégats, retrait modéré à la dessiccation, bonne perméabilité à l'air et l'eau (**Jozja, 2003**).

En fonction de la salinité du milieu, on peut observer deux processus complémentaires (**Feret, 1992 ; Tadros, 1996**) :

- Aux faibles forces ioniques, la quantité de molécule adsorbée atteint rapidement une valeur limite peu élevée. D'après **Feret (1992)**, il peut s'agir d'une adsorption de type électrostatique sur les faces latérales de l'argile chargée positivement.
- Aux salinités plus élevées, l'adsorption est plus importante. Dans ce cas, les macromolécules s'adsorbent sur l'ensemble de la surface de l'argile, par des liaisons hydrogène, grâce à l'écrantage des répulsions électrostatiques.

D'après **Reguieg Yssaad et Belkhoja, M. (2008)**, la bentonite contribue à l'augmentation de la teneur en azote assimilable dans le sol portant l'association blé-pois chiche. Ces teneurs augmentent d'avantage dans le substrat sableux bentonisé à 10% au stade de tallage de blé.

De point de vue économique l'application de la bentonite en agriculture permet d'améliorer la structure des sols sableux susceptibles d'augmenter la production agricole, d'économiser l'eau et les éléments fertilisants.

En Tchécoslovaquie et en Hongrie, les expériences sur une longue durée ont prouvé que la courbe de production avait un maximum pour le taux de 25 T/ha à la dose de 9 % de bentonite. Tandis que l'optimum économique est situé entre 10 et 20 T/ha ; l'effet de l'application de la bentonite a été vérifié durant une période de 7 années (**Engelthaler et Lostak, 1983**) (**Tableau 7**).

Tableau 7: Accroissement du rendement par l'application de la bentonite (**Engelthaler et Lostak, 1983**).

Doses de bentonite (T/ha)	Type de cultures	Augmentation du rendement (%)	Pays
20	Pomme de terre	18,6	Tchécoslovaquie
20	Seigle	16,7	Tchécoslovaquie
20	Légumineuse	39,0	Tchécoslovaquie
20	Maïs	39,2	Tchécoslovaquie
20	Orge	11,5	Tchécoslovaquie
20	Seigle/Orge	22,2	Tchécoslovaquie
20	Maïs	80 à 90	Hongrie

μ

Chapitre III

Les métaux lourds

III-1 Définition des métaux lourds :

Notre milieu terrestre se compose de 94 éléments naturels que le système périodique classe de l'hydrogène – nombre atomique 1 – au plutonium – nombre atomique 94. D'un point de vue chimique, 71 éléments sont des métaux ; parmi eux, selon la définition, une soixantaine sont considérés comme métaux lourds. Les métaux lourds sont donc des composants indispensables de notre Terre et de tout ce qui s'y est développé. Ils sont présents partout et dans tout. Mais les concentrations peuvent varier considérablement (**Marc, 2003**).

L'expression «métal lourd » désigne pour les chimistes des métaux de numéro atomique élevé, de densité supérieure à 5g/cm^3 et qui forment des sulfures insolubles. Le cadmium, le manganèse, le cobalt, le chrome, le cuivre, le plomb, le mercure, le nickel et le zinc sont les métaux lourds les plus souvent rencontrés dans les sols. Dans le domaine de l'environnement, on associe fréquemment aux métaux lourds l'arsenic, qui est un métalloïde lourd. L'arrêté du 2 février 1998, qui définit les éléments devant faire l'objet d'un contrôle pour les installations classées, prend en compte Cd, Hg, Ni, As, Co, Pb, Sb, Cr, Cu, Mn, Sn, Se, Te, Zn, Tl (**Jeannot et al., 2001**).

Au cours des deux dernières décennies, le terme «métaux lourds» a été utilisé de plus en plus dans diverses publications et dans la législation relative aux risques chimiques et l'utilisation sécuritaire des produits chimiques. Il est souvent utilisé comme un nom de groupe pour les métaux et métalloïdes qui ont été associés à la contamination et de toxicité potentielle ou d'écotoxicité (**John, 2002**).

Les métaux lourds sont classés sous la catégorie environnementale comme polluant à cause de leurs effets toxiques sur les êtres vivants (**Mukesh et al, 2008**).

1																	18
H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe(III) Fe(II)	Co	Ni	Cu(II) Cu(I)	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb(IV) Pb(II)	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	#	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	110								
* lanthanide			La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
# actinide			Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

Fig. 3: La table périodique montrant ces métaux classifiés comme : Classe A : métaux durs (le gris le plus foncé) ; Classe B : métaux mous (le gris le plus léger) ; et limite : métaux intermédiaires (gris intermédiaire) (John, 2002)

Remarque: Le cuivre peut être la classe B ou la limite selon si c'est Cu (I) ou Cu (II), respectivement ; le plomb peut être la classe B ou la limite selon si c'est Pb (II) ou Pb (IV), respectivement ; et le fer peut être ou la classe A ou la limite selon elle est Fe (III) ou Fe (II), respectivement (John, 2002).

III-2 Origine des métaux lourds :

Deux sources sont à l'origine de la contamination de l'environnement par les métaux lourds, origine naturel et origine anthropique (Bradl et al, 2005).

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

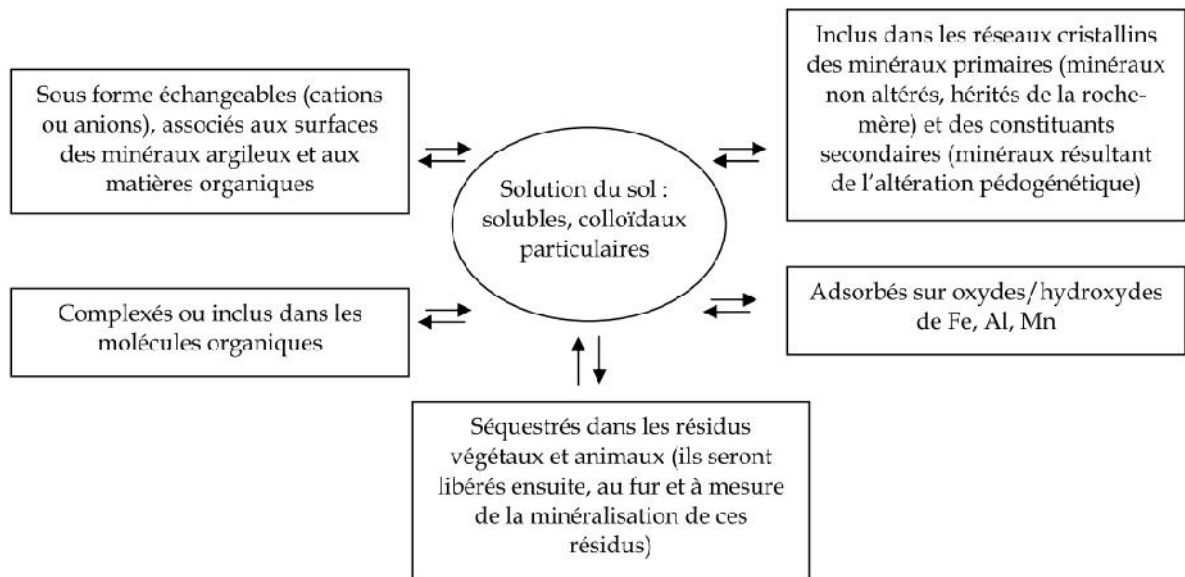


Fig. 4: Différents formes et localisation des ETM dans les sols (Baize, 1997).

III-2-1 Sources naturelles :

a) Les gisements de métaux lourds :

Les teneurs en éléments-traces sont variables selon les types de roches. Certaines roches ont des concentrations très élevées en éléments-traces (jusqu'à plusieurs pour cent), et sont qualifiées de minerais. Le sol résulte de l'altération de la roche mère sous-jacente sous l'influence de processus physiques, chimiques et biologiques. Les éléments-traces présents dans les roches se retrouvent donc dans les sols, à des teneurs variables selon la composition initiale de la roche mère et le type de pédogenèse qui a eu lieu. De même, les éléments-traces sont présents dans tous les autres compartiments de l'environnement de façon naturelle et normale, dans les eaux, dans l'air et dans les êtres vivants. (Ademe,2005)

b) Le passage du minerai au contaminant :

d'après Miquel (2001), les gisements naturels, enfouis dans les roches, deviennent accessibles et contaminants potentiels à quatre occasions :

- 1) l'exploitation (les mines) et l'utilisation ;
- 2) l'érosion qui transporte les métaux vers les sols, les eaux de surface et les sédiments ;
- 3) les prélèvements d'eau. En puisant dans des nappes phréatiques de plus en plus profondes, on peut tomber sur une nappe contaminée par une roche très

chargée en métaux lourds. Cette source de mobilisation des métaux lourds est la moins connue, mais aujourd'hui l'une des plus fréquentes ;

- 4) les éruptions volcaniques terrestres ou sous-marines. Une éruption volcanique libère surtout de grosses quantités de gaz carbonique et de soufre, mais aussi des métaux lourds. On estime que les volcans libèrent en moyenne annuelle dans le monde, de 800 à 1.400 tonnes de cadmium, 18.800 à 27.000 tonnes de cuivre, 3.200 à 4.200 tonnes de plomb, et 1.000 tonnes de mercure dans l'atmosphère.

III-2-2 Sources anthropiques:

Les principaux types de pollutions anthropiques responsables de l'augmentation des flux de métaux, sont la pollution atmosphérique (rejets urbains et industriels), la pollution liée aux activités agricoles et la pollution industrielle (**Dung Huynh,2009**), exploitation, fonderies, combustions, fossiles, essences, et incinérateurs des déchets (**Ilyin et al., 2003**).

Les rejets urbains de temps de pluie, sous forme de déversoirs d'orage ou d'eaux de ruissellement pour les réseaux séparatifs, occupent une place importante dans la pollution de notre environnement. Ces rejets peuvent occasionner différents problèmes lorsqu'ils aboutissent au lac comme des problèmes de salubrité lorsque les plages sont situées à proximité. Un autre problème est lié à l'accumulation de polluants à proximité du rejet conduisant à une contamination à long terme des sédiments (**Giroud,2007**).

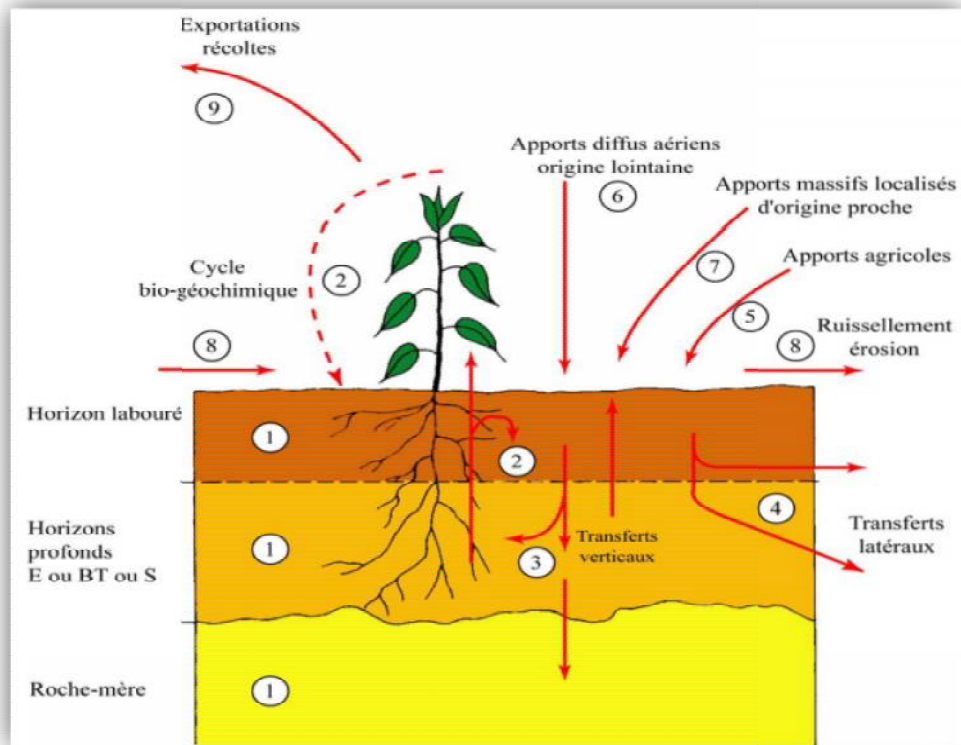


Fig. 5: schéma de l'acquisition des teneurs totales en ETM des sols. Milieux anthropisés (Baize, 2002).

III-3 Le plomb :

II-3-1 Historique :

Le plomb est un métal exploité depuis 5000 ans, son utilisation est directement liée à la métallurgie. Avec deux pics notables: sous l'empire romain pour la production de la monnaie, les canalisations et la vaisselle et pendant la révolution industrielle pour l'industrie, l'imprimerie, les peintures et les carburants automobiles qui sont aujourd'hui à l'origine de sa large diffusion dans l'environnement (Lydia, 2010).

Le plomb est l'un des métaux les plus anciennement et les plus largement utilisés par l'homme. Sa toxicité est connue depuis l'Antiquité et elle est toujours d'actualité: Les expositions professionnelles au plomb restent très fréquentes; la libération d'écaillés ou de poussières par la peinture de revêtements muraux anciens et mal entretenus est la source de nombreux cas de saturnisme infantile, dans divers pays (Garnier, 2005).

III-3-2 Propriétés physico-chimiques du plomb:

Le plomb, du latin *plombum*, est un métal mou, gris, sans goût ni odeur caractéristique, se trouvant habituellement en petite quantité dans la croûte terrestre. Il appartient au groupe IV b de la classification périodique des éléments. Ses principales propriétés physico-chimiques sont présentées dans le Tableau 8. De configuration électronique [Xe] 4f¹⁴ 5d¹⁰6s²6p², il possède deux électrons non appariés sur sa couche électronique externe. Cette configuration électronique autorise les degrés d'oxydation (+2) et (+4), en plus de la forme métal (0). (Sposito et al., 1982)

Le cation Pb²⁺ est un acide au sens de Lewis, c'est-à-dire qu'il est susceptible d'accepter un doublet d'électrons venant d'une base, pour former une liaison covalente. C'est également une espèce chargée, susceptible d'interactions électrostatiques avec des ions de signes contraires pour former une liaison ionique (Sposito et al., 1982).

Tableau 8: Principales propriétés physiques et chimiques du Plomb (Pourrut, 2008).

Symbole	Pb
Numéro Atomique	82
Masse atomique	207,2 g.mol ⁻¹
Point de fusion	327 °C
Point d'ébullition	1740 °C
Densité	11,35
Configuration électronique	[Xe] 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ²
Valence	0, +2, +4
Rayons ioniques	
Pb ²⁺	0,94 à 1,49 Å
Pb ⁴⁺	0,78 à 0,94 Å

III-3-3 Toxicité du plomb :

Le mercure (Hg), le plomb (Pb) et le cadmium (Cd) présentent en commun ces trois propriétés: grande affinité pour le soufre sous forme réduite (c'est à dire non oxydée), bioaccumulation dans l'environnement (dans les plantes, les animaux et l'Homme) et forte toxicité pour les organismes vivants (Picot, 2003).

Le Plomb (Pb) est un polluant environnemental extrêmement toxique pour les plantes et autres organismes vivants (Lamhamdi et al., 2010).

Les sources d'exposition au plomb dans l'environnement sont, entre autres: les peintures au plomb, le sol contaminé par de l'essence et des rejets industriels, l'eau potable, le plomb rejeté dans l'air par des sources ponctuelles comme des fonderies, et les aliments contaminés par le plomb au cours de la conservation par des emballages métalliques soudés au plomb (**William et Patricia, 1994**).

a) Effets du plomb sur la plante

Les plantes cultivées dans un milieu contaminé par le Pb 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 (**Ernst, 1998; Seregin et Ivaniov, 2001**). Différents dérèglements physiologiques et moléculaires sont à l'origine de ces phénomènes.

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 (**Haussling et al., 1988; Marschner, 1995**).

Le ralentissement de la croissance racinaire par le Pb, et les métaux lourds en général (**Pottersetal, 2007**), peut résulter d'une inhibition de la division cellulaire (**Wierzicka, 1989; Wozny et Jerczynska, 1991; Eun et al., 2000**) et de l'élongation des cellules (**Seregin et Ivanov, 1997; Obroucheva et al., 1998; Malkowski et al., 2002**). Des études ont permis d'observer une diminution du taux de transpiration ainsi que du contenu en eau dans les plantes (**Iqbal et Mushtaq, 1987; Sharma et Dubey, 2005**). Ceci pouvant être du à une fermeture des stomates induite par l'altération des flux de K^+ à travers la membrane et l'augmentation du contenu en ABA (**Bazzaz et al., 1974**).

La photosynthèse est elle aussi inhibée, ceci s'explique par une déformation des structures chloroplastiques (**Stefanov et al., 1995**), une diminution de la synthèse de chlorophylle, de plastoquinone, et de caroténoïde (**Burzynski, 1987**), un transport des électrons altéré (**Rashid et al., 1994**), un manque de CO_2 et une inhibition de l'activité de certaines enzymes du cycle de Calvin (**Vallee et Ulmer, 1972**).

D'autres enzymes peuvent être affectées par la présence de Pb car il se lie aux groupements SH et parfois bloque les fonctions COOH (**Van Assche et Clijsters, 1990**). Les enzymes dont l'activité est inhibée participent notamment à la synthèse de la chlorophylle, à la fixation du CO₂, au cycle de Calvin, à l'assimilation de l'azote et au métabolisme des sucres (**Sharma et Dubey, 2005**). Certaines enzymes sont au contraire activées telles que les hydrolases (comme les protéases), les phosphohydrolases et les enzymes du cycle ascorbate-glutathion (**Sharma et Dubey, 2005**).

D'autre part, la présence de Pb induit indirectement une contrainte oxydative et par conséquent la production d'espèces activées de l'oxygène (ROS) (**Malecka et al., 2001**). Cette surproduction de ROS est due au fait que, comme en réponse à de nombreuses contraintes environnementales, les plantes fixent moins de CO₂ lors d'une culture en présence de Pb. Ceci induit une réduction de la régénération du NADP⁺ par le cycle de Calvin, ayant pour conséquence une inhibition de la chaîne de transport des électrons photosynthétiques (**Vranova et al., 2002; Cruz de Carvalho, 2008**). Ce phénomène induit alors la formation des radicaux superoxyde (O²⁻) et des oxygènes singulets (1 O₂) dans les chloroplastes (**Krause, 1994**). Afin de remédier à cette diminution du transport des électrons les plantes ont développé un système de photorespiration pour régénérer le NADP⁺ (**Kozaki et Takeba, 1996**). Cependant via ce système des H₂O₂ sont formés dans les peroxyosomes (**Somerville et al., 2000**). De plus la chaîne de transport des électrons dans les mitochondries est également inhibée, favorisant la formation d'O²⁻ (**Purvis, 1997**).

Cependant d'après certaines études en microscopie électronique, la morphologie des composants cellulaires tels que les mitochondries, les dictyosomes, les ribosomes et le réticulum endoplasmique ne paraît pas affectée par la présence de Pb (**Jarvis et Leung, 2002**).

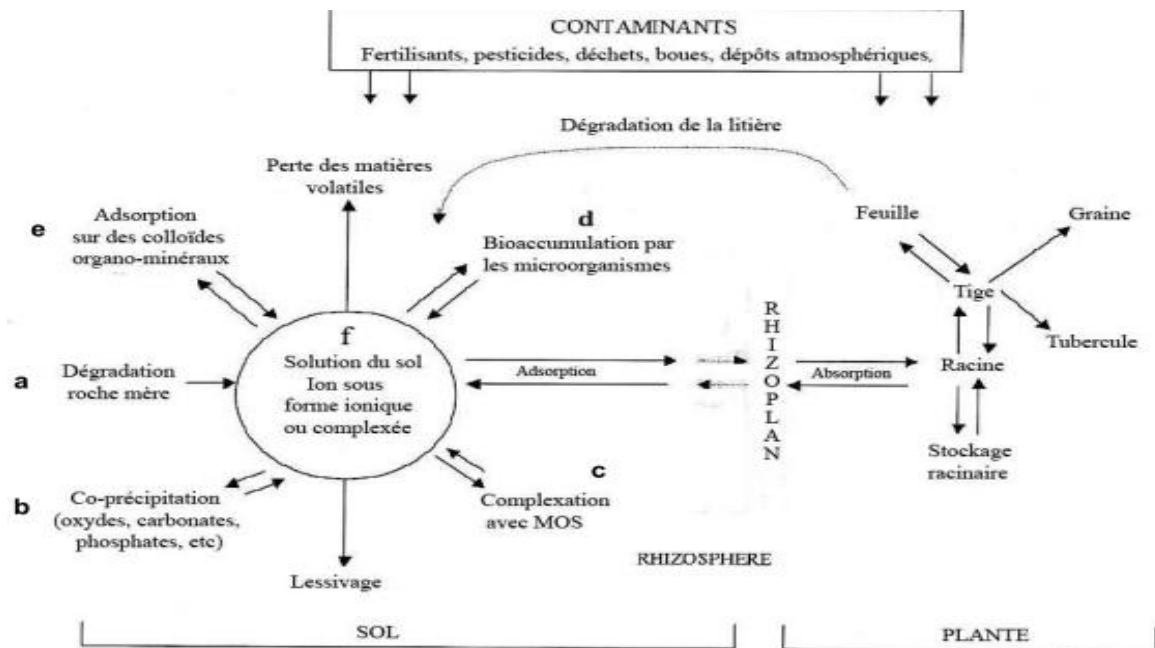


Fig. 6 : Dynamique du plomb dans le système sol-plante (Alloway, 1995).

b) Effets toxiques chez l'homme :

Le plomb a de nombreux effets toxiques sur la santé (Cecchi, 2008), il se diffuse rapidement vers les différents organes comme le cerveau, les dents, les os, par la circulation sanguine. La demi-vie du plomb dans les tissus mous et dans le sang est de 30 jours environ, mais elle passe de 1 à 10 ans dans les os (Pichard, 2002).

En général, le plomb dans le corps humain se répartit comme suit :

- 1 à 2 % dans le sang ;
- 5 à 10 % dans les tissus mous (rein, foie, rate) ;
- Plus de 90 % est fixé sur les os.

L'élimination du plomb se fait majoritairement par les urines, puis par les fèces, la salive et la sueur, et enfin par les ongles et les cheveux.

Les effets toxiques du plomb sur la santé, sont basés sur les niveaux de plomb dans le sang ou plombémie sanguine. En effet, il est responsable du saturnisme en cas d'exposition chronique. Il peut provoquer une grande fatigue, des troubles du comportement, de la mémoire, du sommeil, des systèmes immunitaires et reproducteurs, mais ses principaux organes cibles sont le système nerveux, les reins et le sang. En bloquant plusieurs enzymes nécessaires à la synthèse de l'hémoglobine, il entraîne une diminution du nombre de globules rouges et une anémie. De plus, le plomb passe

facilement la barrière placentaire par diffusion, d'où un risque d'exposition prénatale (Cecchi, 2008).

Chapitre *IV*

La phytoremediation

IV-1- La phytoremédiation :

La phytoremédiation est l'utilisation des plantes pour absorber, dégrader ou immobiliser les contaminants du sol. Cette technique est considérée comme très prometteuse pour la remédiation des sites pollués (**Garbisu et Alkorta, 2001**). Elle peut être utilisée pour dépolluer des surfaces contaminées par des polluants qui sont présents dans le sol, dans l'air et dans l'eau (**Salt et al., 1998**).

La phytoremédiation est une technologie innovatrice peut être plus rentable qu'est les méthodes mécaniques ou chimiques alternatives (**Wendy, 2003**).

La phytoremédiation est un cas particulier de la «bioremédiation» qui consiste en l'emploi d'êtres vivants pour réhabiliter des sols ou des eaux polluées contaminés par divers polluants (organiques et inorganiques) (**Judicaëlle, 2008**).

La phytoremédiation est un ensemble de technologies utilisant les plantes pour réduire, dégrader ou immobiliser des composés organiques (naturels ou de synthèses) polluants du sol, de l'eau ou de l'air provenant d'activités humaines. Cette méthode de dépollution ne laisse que très peu d'espoir car elle n'est efficace que si la plante absorbe rapidement et en grande quantité le polluant (**David et Sarah, 2008**).

Il existe plusieurs classifications pour les techniques de phytoremédiation. Nous citons ici les plus employées:

- La phytoextraction.
- La phytostabilisation.
- La phytovolatilisation.
- La phytodégradation.

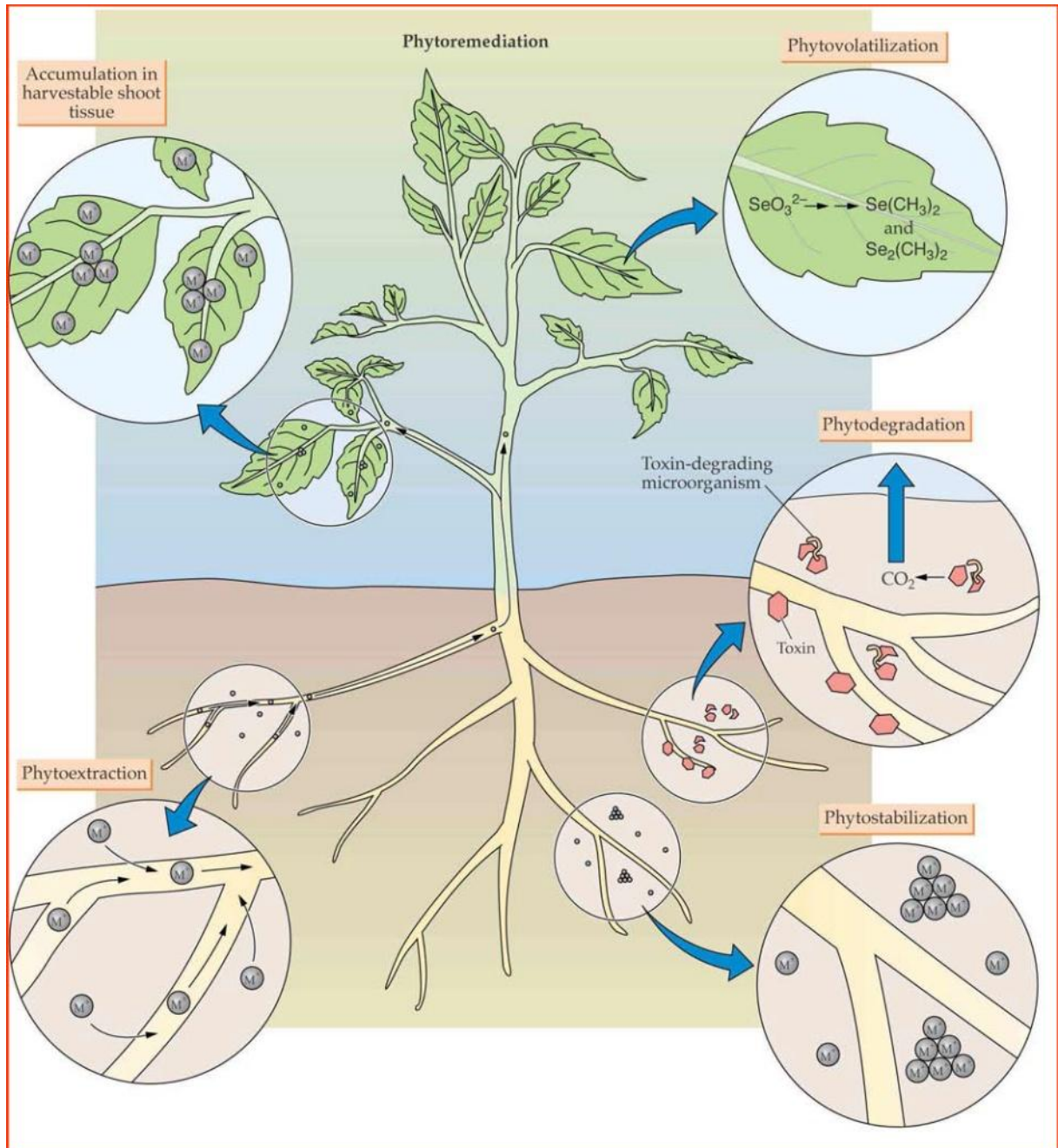


Fig. 7: Les différents types de phytoremédiation

IV-1-1 La phytoextraction:

C'est la voie dans laquelle les chercheurs se sont le plus investis depuis le début de cette décennie. La phytoextraction utilise des plantes capables de prélever les éléments traces toxiques et de les accumuler dans les parties aériennes qui seront ensuite récoltées puis incinérées. Les cendres seraient alors mises en décharge ou mieux, réutilisées en métallurgie.

Deux stratégies sont actuellement développées dans la phytoextraction .Il y a d'une part la phytoextraction assistée par des chélateurs des métaux cette méthode est désignée également par la « phytoextraction induite », et d'autre part la phytoextraction continue (Jemal et Ghorbal, 2002).

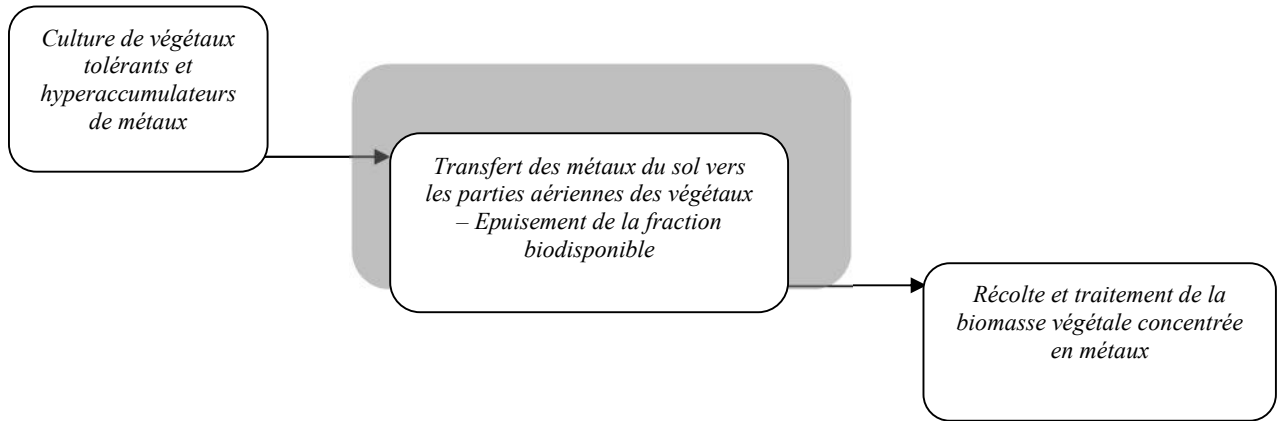


Fig. 8: Schéma de principe du traitement de sols pollués par phytoextraction (ADEME, 2010)

a)Phytoextraction induite:

La phytoextraction induite se fait en présence de chélateurs et de plantes à forte biomasse et à croissance rapide. Lorsque la plante a atteint un certain niveau de croissance, les chélateurs de métaux sont appliqués au sol. Ceux-ci permettent d'induire l'accumulation de métaux lourds dans la plante par augmentation de la biodisponibilité de l'élément ciblé.

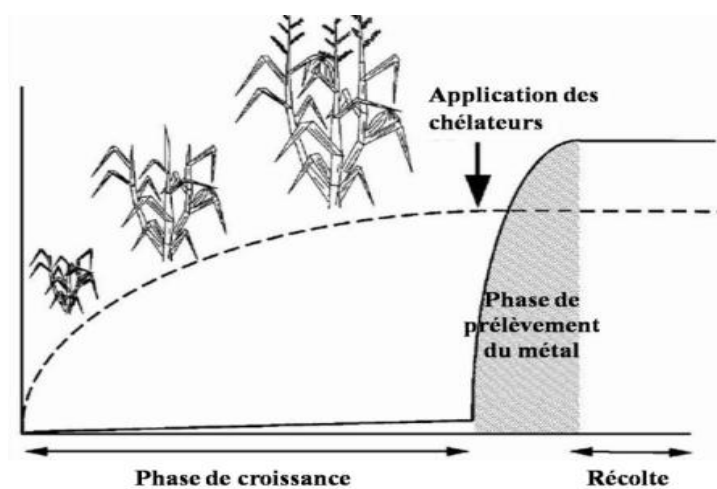


Fig. 9 : Schéma représentant une phytoextraction induite par des chélateurs (Salt et al., 1998).

(La ligne continue représente la teneur en métal de la partie aérienne; la ligne discontinue représente la production de biomasse de la partie aérienne).

b) Phytoextraction continue :

Contrairement à l'absorption induit par des chélateurs, la phytoextraction continue est basée sur les capacités génétiques et physiologiques des plantes spécialisées dans l'absorption, la translocation et la tolérance des métaux lourds. On parle de «plante hyperaccumulatrice» (Dung huynh, 2009).

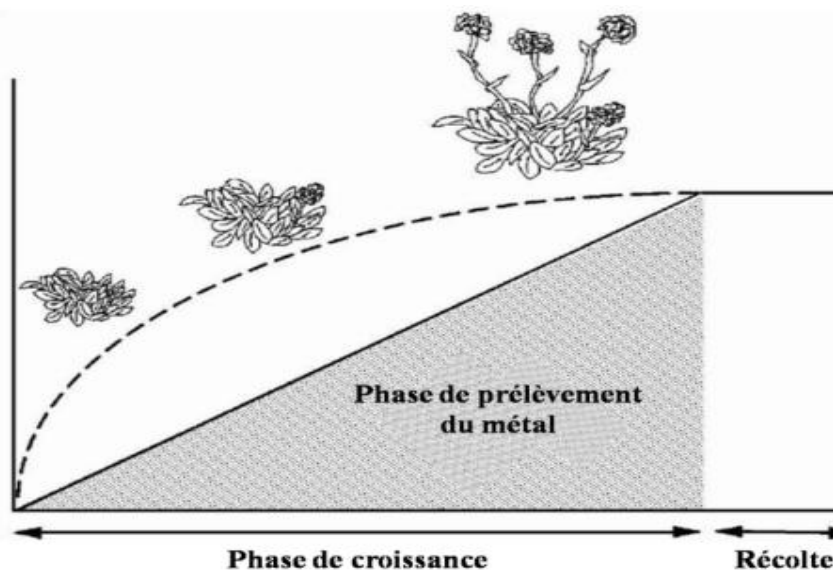


Fig. 10: Schéma représentant une phytoextraction continue (Salt et al., 1998 ; Jemal et Ghorbal, 2002). (La ligne continue représente la teneur en métal de la partie aérienne; la ligne discontinue représente la production de biomasse de la partie aérienne).

IV-1-2 La phytostabilisation :

Utilisation des plantes pour éviter la mobilisation (et le lessivage) des polluants présents dans les sols pollués. Cette technique est basée sur les conditions physico-chimiques qui génèrent les racines des plantes dans le sol pour contribuer à stabiliser des polluants. Il peut être également mis sous ce terme, la capacité de certaines plantes plus résistantes aux polluants que d'autres à se développer sur des sols usuellement stériles, favorisant par le développement de leurs racines et leurs couvert végétal une stabilisation physique du sol qui limite l'entraînement superficiel du sol polluée (Anonyme, 2004).

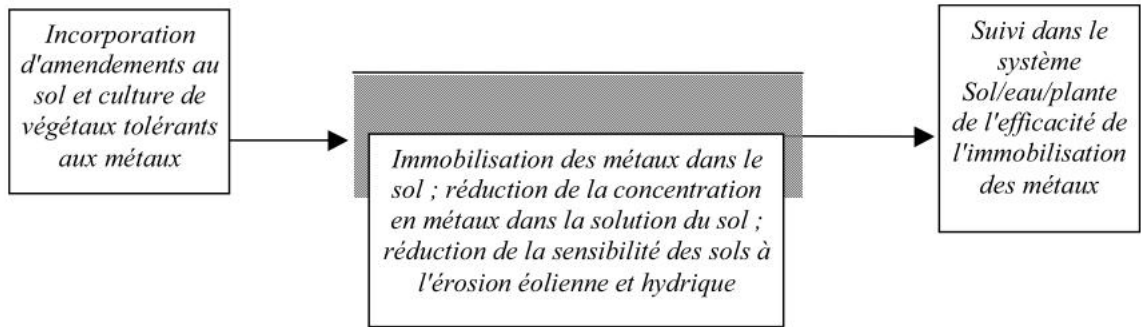


Fig. 11: Schéma de principe du traitement de sols pollués par phytostabilisation (ADEME, 2010)

IV-1-3 La phytovolatilisation :

Cette technique utilise les plantes pour extraire les métaux lourds puis les éliminer par évapotranspiration via les stomates des feuilles ou les tiges. Parmi les métaux lourds, seuls le mercure et le sélénium sont adaptés à cette technique. La possibilité d'y inclure l'arsenic n'est pas à écarter. Une fois volatilisés, les polluants se dispersent dans l'atmosphère à des concentrations qui, normalement, ne représentent plus un danger pour l'homme. La phytovolatilisation présente également l'avantage de ne pas nécessiter de récolte de la biomasse puisque les contaminants sont dispersés dans l'atmosphère (Pilon-Smits, 2005 ; Anonyme, 2009; Dechamp et Meerts, 2003; Bert et Deram, 1999).

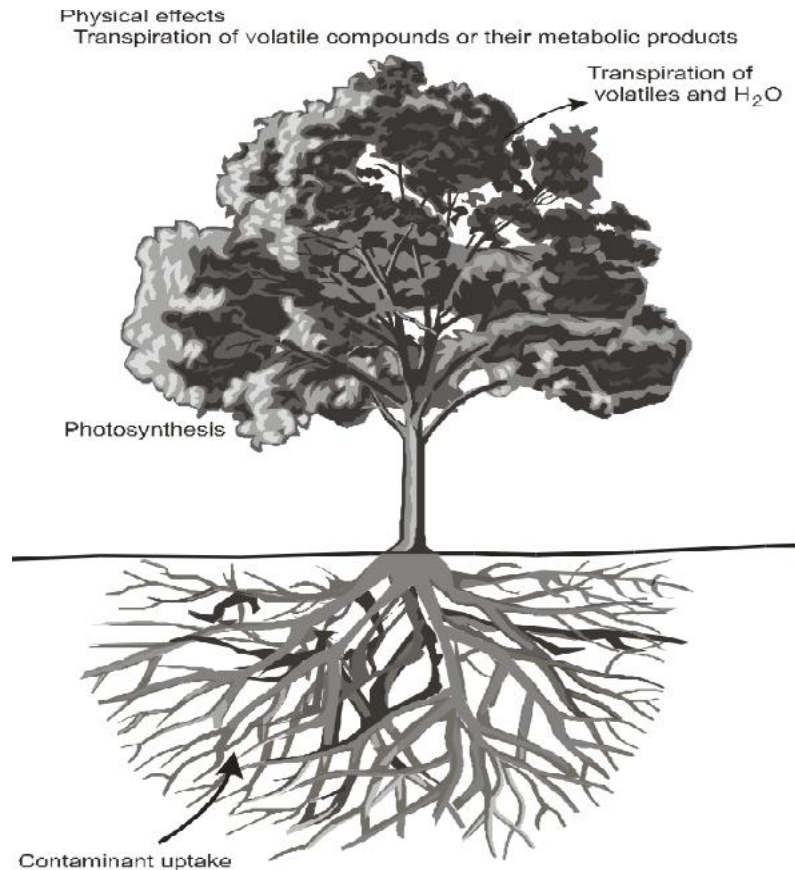


Fig. 12: schéma de la Phytovolatilisation (Anonyme^a, 2000).

IV-1-4 La phytodégradation :

La phytodégradation ou phytostimulation est l'utilisation de plantes pour dégrader les polluants organiques difficilement biodégradables tels que les hydrocarbures. Les deux termes sont souvent mélangés mais il existe une distinction. En effet, la phytodégradation est la dégradation des composés par le métabolisme de la plante alors que la phytostimulation est la stimulation de la flore du sol capable de dégrader les composés organiques. Les plantes peuvent croître sur un sol contaminé par les hydrocarbures jusqu'à un certain seuil. Une concentration de 7 tonnes par hectare permet une croissance normale de la plante et un rythme de dégradation élevé par les micro-organismes se développant dans la rizosphère (Chaîneau et *al.*, 2000).

IV-2 Avantages de la phytoremédiation :

Avec la phytoremédiation, l'activité biologique et la structure du sol sont préservées. Cette technique s'inscrit donc dans une démarche de développement durable et est mieux perçue par le public que les techniques classiques (Dechamp et Meerts, 2003 ; Ademe, 2010).

La phytoremédiation garantit un couvert végétal qui participe à la beauté du paysage et qui freine l'érosion du sol et le lessivage des particules du sol tout en assurant une augmentation des infiltrations (**Dechamp et Meerts, 2003**). Ce couvert végétal permet de réduire le déplacement des polluants dans l'air, l'eau ou le sol, puisqu'ils sont maintenus près ou dans les plantes (sauf dans le cas de la phytovolatilisation)

Le coût de la phytoremédiation est faible : celui-ci est estimé 10 à 100 fois moins coûteux que les techniques classiques (**Bert et Deram, 1999**). La phytoremédiation requiert moins d'équipement et de travail que les autres méthodes puisque ce sont les plantes qui font la plupart du travail. Le relativement faible coût de la phytoremédiation combiné avec les fonds disponibles limités pour l'assainissement de l'environnement, a renforcé la popularité de cette technique (**Pilon-Smits ; 2005**).

IV-3 Inconvénients de la phytoremédiation:

Les inconvénients des techniques de phytoremédiation sont encore nombreux. Ils sont liés à un manque de connaissances mais aussi à la difficulté inhérente à la gestion d'un matériel vivant.

Pour appliquer les techniques de phytoremédiation, il est nécessaire, à travers des analyses préalables, de s'informer le mieux possible sur les propriétés physico-chimiques du terrain : type de sol (caractéristiques minéralogiques, granulométriques, microbiologiques, écotoxicologiques, etc.), type de contaminants, concentration/ distribution/ biodisponibilité des contaminants, etc. Cependant, il semble qu'une des difficultés rencontrées lors de la réalisation d'études sur la phytoremédiation est la détermination de la mobilité et l'évaluation de la biodisponibilité des métaux lourds.

La phytoremédiation doit, dans certains cas, être précédée d'un travail du sol, d'une décompaction, de l'homogénéisation des polluants dans le sol. L'utilisation des plantes suppose également une éventuelle fertilisation du sol souvent pauvre en éléments nutritifs majeurs, des traitements pour les plantes (herbicides, protection contre les ravageurs ou les maladies), etc. Dans le cas de la phytostabilisation, une fertilisation raisonnée du sol permettra de compenser l'éventuelle immobilisation d'éléments nutritifs essentiels concomitante à celle des polluants et susceptible d'entraîner des carences (**Ademe, 2010**).

Les techniques de remédiation conventionnelle sont des techniques efficaces mais coûteuses et destructrices. Les techniques de phytoremédiation sont moins efficaces mais aussi moins coûteuses et destructrices. Cependant, les techniques de phytoremédiation prennent du temps et s'appliquent principalement aux contaminations moyennes à faibles et peu profondes (**Vanobberghen, 2010**).

Partie expérimentale

Chapitre v

Matériels et Méthodes

V. Matériels et méthodes :**V.1 Matériel sol :****V.1.1 Préparation du substrat de culture :**

Les pots utilisés de diamètre de 15cm, de poids 600g. Le fond de chaque pot a été garni d'une couche de gravier afin d'assurer un bon drainage. Le substrat utilisé correspond à un mélange du sable avec la bentonite. Le sable est récupéré au bord de la plage de Chaibia ayant subi plusieurs traitements successifs :

- Tamisage avec un tamis de 2mm de diamètre pour obtenir un sable fin ;
- Lavage à l'eau de robinet ;
- Trempage dans une solution de HCl dilué au 1/5 dans l'eau distillée ;
- Lavage plusieurs fois à l'eau distillée ;
- Désinfection avec l'eau de javel à 25%;
- Lavage plusieurs fois avec l'eau distillée ;
- En fin on procède à la désalinisation du sable, en utilisant le nitrate d'argent.

La bentonite sous sa forme naturelle granulée a été préalablement broyée à l'aide d'un broyeur électrique et tamisé au tamis à maille de 2mm pour obtenir une poudre fine afin de faciliter son enfouissement et son mélange. La quantité de bentonite ajoutée au sol traité correspond à des doses exprimées en pourcentage du poids sec du sol. Trois doses de bentonite sont retenues : 0, 07 et 10%.

Les substrats choisis reçoivent quatre traitements du plomb en utilisant une solution de nitrate de plomb ($PbNO_3$). Chaque dose de bentonite comporte 20 pots pour quatre concentrations soit: 0 ppm, 2000 ppm, 5000 ppm et 10000 ppm et pour chaque traitement on a réalisé 5 répétitions.

Les substrats témoins sont irrigués uniquement à l'eau déminéralisée pendant la période d'application du stress. Après cinq mois de germination des graines, l'application du stress métallique a été effectuée une fois durant la dernière semaine, avant le prélèvement de la plante cultivée dans les substrats afin de les analyser.

Tableau 9 : Poids sec de bentonite en grammes par rapport au pourcentage de la dose de bentonite retenue.

Dose de bentonite	0%	7%	10%
Poids sec de bentonite (g)	0	42	60



Photo 3: Méthode de préparation du sable (étape de tamisage).

V.2 Matériel végétal :

V.2.1.Choix de l'espèce végétale :

Les *Chénopodiacées* représentent une famille d'halophytes hyperaccumulatrices très importante qui mérite une attention toute particulière. Cette famille de plantes halophiles est très répandue en Algérie et est utilisée pour l'alimentation humaine et animale, surtout dans les régions à climats aride et semi-aride. A cette famille appartiennent le genre *Atriplex* qui peut contribuer à la valorisation des sols marginaux et l'amélioration de la production végétale et animale (**Bouchoukh, 2010**).

Notre étude a été menée sur deux espèces d'*Atriplex* ; *Atriplex halimus* L. dont l'échantillonnage des graines a été effectué à l'IAP, qui se situe à l'université d'Es-Senia d'Oran. Par contre les graines d'*Atriplex canescens* L. ont été récoltées dans la zone de Boukheit qui se situe à 15 Km de chef lieu de la willaya d'El Bayadh (**Photo 4**). Les graines sont décortiquées de leurs valves fructifères et semées dans des plaquettes

afin d'assurer leur prégermination. Après une période d'un mois, les jeunes pousses sont transplantées dans les pots.

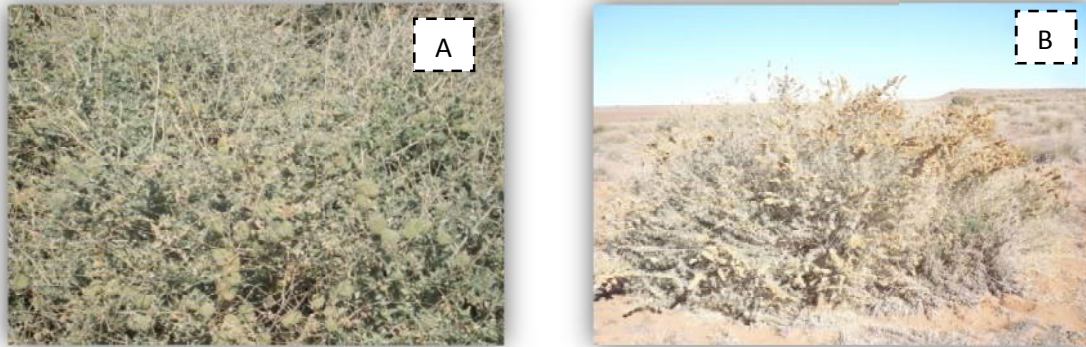


Photo 4: Deux espèces d'*Atriplex* : **A:** *Atriplex halimus* L. **B:** *Atriplex canescens* L

V.3. Conduite de l'essai :

V.3.1. Le semis :

L'essai expérimental a été réalisé à l'université Es-Senia d'Oran. (**Photo 5**), dans une serre où le contrôle de la température, humidité et vent est automatique. Le semis a eu lieu le: 02-02-2011 dans des pots remplis chacun de 600 g du substrat mélangé à raison de trois graines par pot.



Photo 5 : La serre automatisée de l'université d'Es- Senia d'Oran .

Tableau 10: Caractéristiques de la serre automatisée de l'université d'Oran.

Période	Jour	Nuit
Conditions		
Photopériode	8h	25°C
température	30 ^{±1.4} °C	
humidité	70 ^{±3.6} %	0Km/h
vent	0Km/h	
Intensité lumineuse	10000L	
ensoleillement		

V.3.2. L'arrosage :

L'irrigation est effectuée à l'eau distillée, la capacité de rétention en eau est déterminée par la différence entre la quantité d'eau apportée avant l'arrosage et celle récupérée après 24h de décantation. La réserve facilement utilisable RFU correspond à 30 et 60% de la capacité de rétention soit 40 et 80ml par pot. L'arrosage se fait trois fois par semaine, deux fois à l'eau déminéralisée et une fois à la solution nutritive (**Hoagland et Arnon, 1938**) diluée au 1/1000^{ème} couramment utilisé au laboratoire de physiologie végétale (**Tableau 11**).

Tableau 11: Composition chimique de la solution **Hoagland**.

Produit	Composition	Poids en g/l
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
Di-potassium hydrogénophosphate	PO ₄ K ₂ H 3H ₂ O	34.23
Chlorure de manganèse	Cl ₂ Mn 4H ₂ O	1.80
Sulfate de cuivre	Cu SO 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

Tableau 12 : Composition de la solution de nitrate de plomb

Doses du plomb	PbNo ₃
0 ppm	0 g /L
2000 ppm	2 g /L
5000ppm	5 g /L
10000 ppm	10 g /L

Le dispositif expérimental adopté est en randomisation à deux facteurs, le plomb avec quatre niveaux de traitement (0 ppm, 2000 ppm, 5000 ppm, 10000 ppm) et le facteur bentonite avec trois doses (0 ,7 et 10 %) (**Tableau 12**).

Tableau 13: Dispositif expérimental adopté dans la serre.

Dose de bentonite (en%)	Doses du plomb (ppm)	Nombre de variété	Nombre total de pots
0	0	2	10 pots
	2000		10 pots
	5000		10 pots
	10000		10 pots
7	0	2	10 pots
	2000		10 pots
	5000		10 pots
	10000		10 pots
10	0	2	10 pots
	2000		10 pots
	5000		10 pots
	10000		10 pots
Total=120 pots			



Photo 6 : Dispositif expérimental adopté à la serre pour les deux espèces d'*Atriplex* (*Atriplex halimus* L. et *Atriplex canescens* L.)

V.4. Paramètres mesurés

V.4.1 Mesures physiologiques

V.4.1.1 Dosage des sucres soluble

Les sucres simples (glucose, fructose et saccharose) sont extraits par un solvant capable de les solubiliser et de bloquer les activités enzymatiques susceptibles de les dégrader (**Shields et Burnett, 1960**).

Le principe de la réaction est basé sur la condensation des produits de dégradation des oses neutres par l'acide sulfurique. Ce dernier très concentré transforme à chaud les oses en dérivés furfurals donnant une coloration bleu vert avec l'antrone. Les solutions d'extraction sont dosées à la colorimétrie à 585 nm. Cette même méthode est décrite par **Gomez (2003)**.

Le matériel végétal prélevé (les feuilles), 100 mg, est introduit dans un tube à essai contenant 5.25 ml d'éthanol à 80 %, pendant 20 heures. 2 ml sont prélevés de l'extrait préalablement dilué 10 fois avec l'éthanol 80% (réactif A). 4 ml de réactif composé de 2 g d'antrone pur additionné à 01 litre d'acide sulfurique (réactif B) sont ajoutés au réactif A. Le réactif B est préparé 04 heures à l'avance avant la réalisation de l'essai. L'ensemble est délicatement mélangé et maintenu dans la glace fondante. Après agitation les tubes sont placés dans un bain-marie à 92°C pendant 08 mn et

ensuite le tout est refroidit pendant 30 mn à l'obscurité. L'absorbance est lue au Spectrophotomètre UV à une longueur d'onde de 585 nm et la concentration est exprimée en mg.g⁻¹ de MS.

V.4.1.2 Dosage de la chlorophylle:

L'extraction de la chlorophylle (a) et (b) est réalisé selon la méthode de **Francis et al (1970)**, qui consiste en une macération des feuilles (0.1g) dans 10ml d'un mélange de l'acétone et de l'éthanol (75% et 25%) de volume et de (80% et 20%) de concentration; les feuilles sont coupées en petits morceaux et mises dans les boites noires (pour éviter l'oxydations de la chlorophylle par la lumière), après 48h, on procède à la lecture des densités optiques des solutions avec un Spectrophotomètre UV, à deux longueurs d'ondes : (645 et 663nm). La détermination des teneurs est réalisée selon les formules suivantes :

$$\text{Chl a } (\mu\text{g/g MF}) = 12,7 \times \text{DO (663)} - 2,59 \times \text{DO (645)} \times V / (1000 \times W).$$

$$\text{Chl b } (\mu\text{g/g MF}) = 22,9 \times \text{DO (645)} - 4,68 \times \text{DO (663)} \times V / (1000 \times W).$$

$$\text{Chl (a+b)} (\mu\text{g/g MF}) = \text{Chl a} + \text{Chl b}$$

V : volume de la solution extraite ;

W: le poids de matière fraîche de l'échantillon.

V.4.1.3. Teneur en eau relative

Le contenu relatif en eau est mesuré à partir des masses fraîches (FW), turgescente (TW) et sèche (DW) d'un matériel végétal, les feuilles le plus souvent. Il est donné par l'équation de **Barrs et Weatheley (1968)**, :

$$\text{RWC (\%)} = [(FW-DW) / (TW-DW)] \times 100.$$

La masse fraîche est mesurée immédiatement après le prélèvement des feuilles. La masse turgescente est obtenue après 24h de contact de la feuille avec du papier filtre humide, en atmosphère confinée à 4°C et à l'obscurité. La masse sèche est obtenue après 48h de séchage dans une étuve à 60°C (poids constant).

V.5. Extraction et dosage chimique de la plante

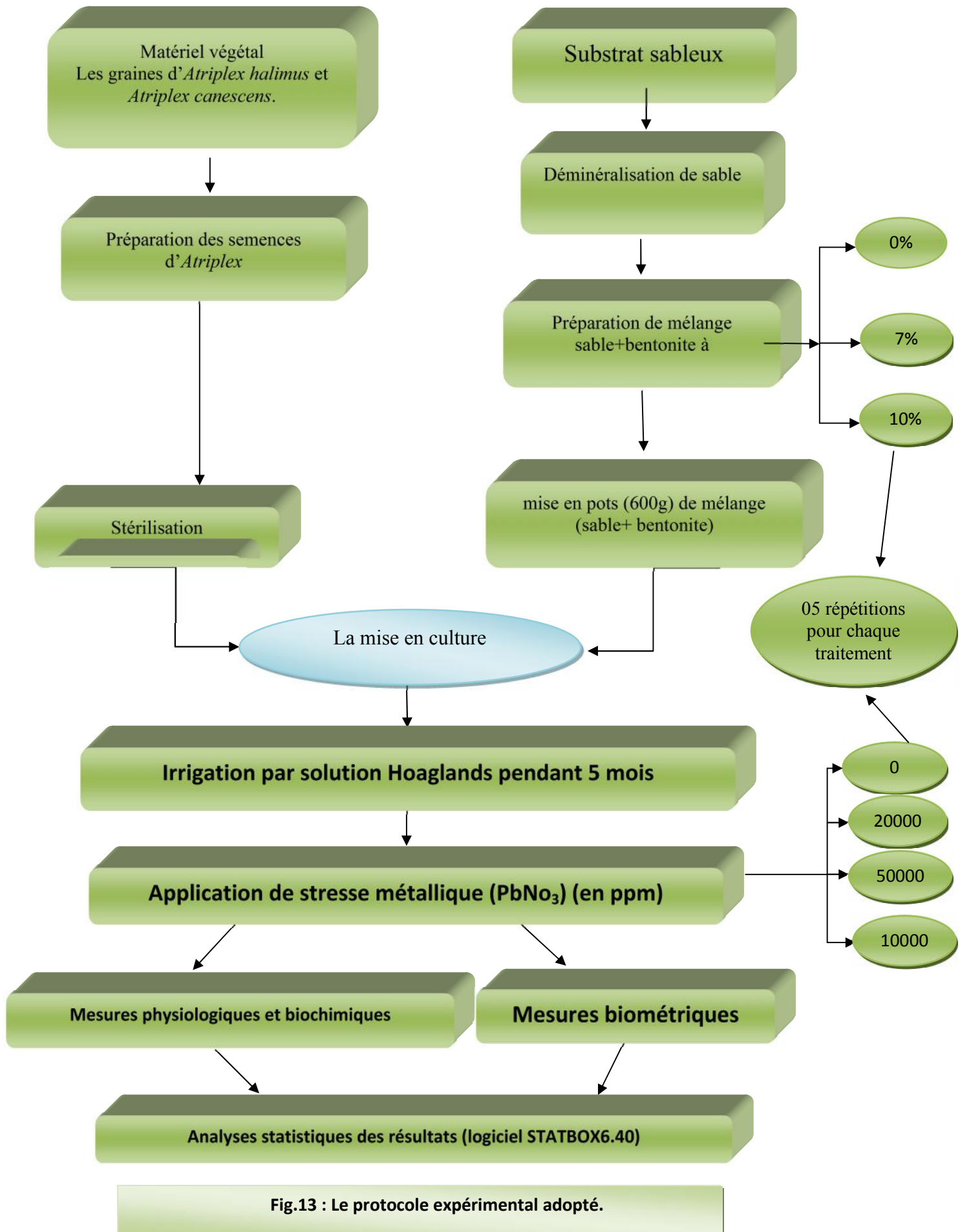
V.5.1. Le dosage des métaux lourds dans les plantes

Les plants issus des différents traitements ont été préalablement rincés à l'eau distillée, scindés en leurs parties aériennes et souterraines, séchés à l'étuve (pendant 72heures à 70°C) puis réduites en fine poudre végétale.

30 mg de poudre de chaque échantillon a été dissoute dans 3,5 ml de mélange ($\text{HNO}_3 / \text{HClO}_4$) (7V/1V) et incubée à l'obscurité pendant 24 heures puis diluée dans 5ml de HNO_3 à 0,2 %. Les mesures de concentration en plomb, sont réalisées par un passage au Spectrophotomètre à absorption atomique à longueur d'onde de 217nm sur des extraits préalablement filtrés. (Vogel-Milkus et al., 2005).

V.5 Analyse statistique :

Les données obtenues sont soumises à une analyse de la variance à deux Facteurs en randomisation fixes de classification, les moyennes sont comparées selon la méthode de **Student** et **Fisher**, réalisés par le logiciel **STATBOX 6.40**. On considère que les résultats sont significatifs quand $P \leq 0,05$. On a aussi utilisé l'**Excel** pour la construction des graphes et pour calculer la moyenne et l'écartype.



Chapitre VI

Résultats et discussions

1. Paramètres physiologiques

1.1. Teneur en chlorophylle

Les figures (14, 15, 16 et 17) représentent la teneur en chlorophylle des deux espèces étudiées *Atriplex halimus* L. et *Atriplex canescens* L. en fonction de l'intensité du stress métallique (0, 2000, 5000 et 10000 ppm) dans des substrats sableux amendés en bentonite (0, 7 et 10 %).

a) Espèce *Atriplex halimus* L.

a.1 Chlorophylle a

- À 0% de bentonite

L'examen de la figure 14 montre que le contenu en **Chlorophylle a** dans la plante est le plus élevé dans le substrat témoin sans plomb comparativement aux autres plantes stressées à 2000, 5000 et 10000 ppm. Le taux de réduction en **chlorophylle a** dans les plantes stressées varie entre 0,002 et 0,029 $\mu\text{g/g}$ MF par rapport à celles non stressées au plomb. La dose 2000 ppm représente le taux de réduction le plus important soit 0,099 $\mu\text{g/g}$ MF. L'analyse statistique de Student à P=5% montre que le stress métallique ne provoque aucun effet significatif dans le substrat sableux sans bentonite sur la teneur en **chlorophylle a** (tableau 1, annexe)

- À 7 et 10 % de bentonite

On remarque que le taux de **Chlorophylle a** diminue au fur et mesure que la dose de la bentonite augmente. L'espèce *Atriplex halimus* L, cultivée dans le sol amendé à 7% de bentonite et recevant les différentes concentrations du plomb, présente des valeurs sont les plus élevés en **Chlorophylle a** par rapport au substrat sableux enrichi à 10% de bentonite. Il faut noter également que la teneur en **Chlorophylle a** devient plus faible dans le sol sableux amendé à 10% de bentonite et stressé à la dose de 5000 ppm du plomb soit une diminution de 0,057 $\mu\text{g/g}$ MF (44,5 %) par rapport au substrat sableux témoin (0% de bentonite) non stressé au plomb. On note que la diminution de la teneur en **chlorophylle a** est importante chez les plantes stressées et cultivées dans les substrats sableux à 7 % de bentonite. Le contenu en **chlorophylle a** diminue davantage dans les sols sableux traités à 10 % de bentonite.

L'analyse statistique de Student à P=5% révèle un effet hautement significatif de la bentonite sur la teneur en **chlorophylle a**. Par contre le stress métallique au seuil de 5% ne

déclenche aucun effet significatif dans les deux substrats amendés en bentonite sur le contenu en **chlorophylle a** (tableau 1, annexe).

Le test t de la comparaison des moyennes montre des effets hautement significatifs de la dose 10% de bentonite sur la teneur en **chlorophylle a** par rapport à la dose 7% de bentonite et des effets hautement significatifs par rapport aux sols sableux témoins (0% de bentonite).

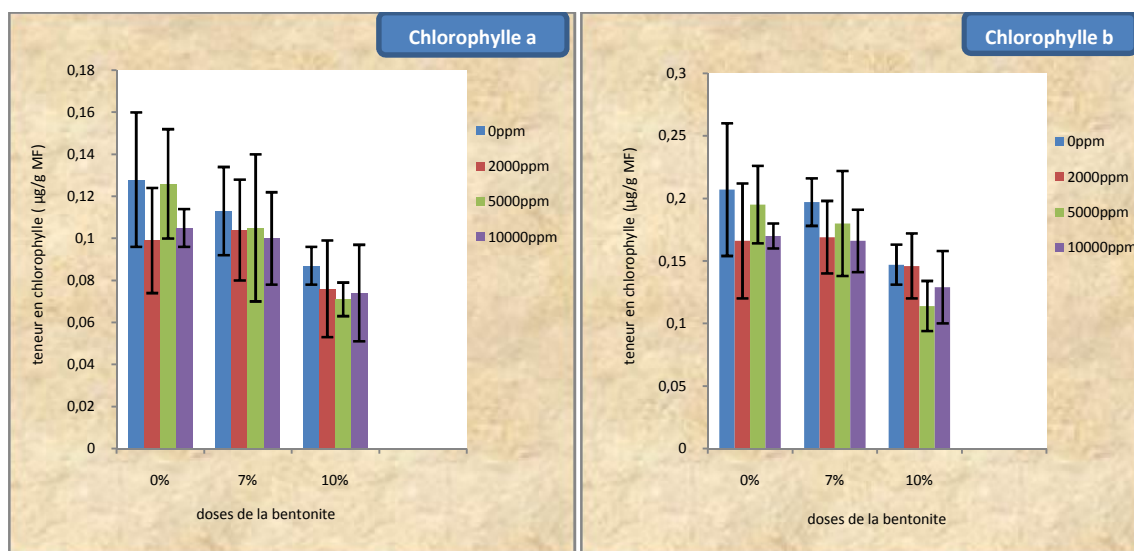


Fig.14 : Effet combiné du plomb et de la bentonite sur la teneur en **chlorophylle a** et **chlorophylle b** de l'espèce *Atriplex halimus* L.

a.2 Chlorophylle b

- À 0% de bentonite

La teneur en **Chlorophylle b** la plus élevée est enregistrée dans les plantes du sol sans traitement à la bentonite et non stressé au plomb soit un taux de 0,207 µg/g MF. Par contre les plantes traitées au plomb à 2000 ppm présentent une teneur plus faible (0,166 µg/g MF) comparativement aux plantes non stressées. On remarque que la teneur en **chlorophylle b** diminue largement dans l'espèce *Atriplex halimus* L. stressée au plomb, la réduction en **chlorophylle b** varie entre 5,8 et 19,8% par rapport au substrat témoin (0% de bentonite) non stressé au plomb.

L'analyse statistique de Student à P=5% montre que l'effet du stress au plomb est non significatif sur la teneur en **chlorophylle b** des plantes cultivées dans le substrat sableux sans bentonite (tableau 3, annexe).

• À 7 et 10% de bentonite

Dans les substrats sableux amendés à 7 et 10% de bentonite, la diminution de la teneur en **chlorophylle b** est proportionnelle à la dose de bentonite. La figure 14 montre que la **chlorophylle b** atteint sa valeur optimale dans les substrats sableux amendés à 7% de bentonite et ne recevant aucun stress métallique soit une petite réduction de 0,01 µg/g MF de **chlorophylle b** par rapport aux plantes sans plomb du substrat témoin à 0 % de bentonite. Il est noté également que le substrat sableux amendé à 10 % de bentonite et stressé au plomb à 5000 ppm présente la teneur en **chlorophylle b** la plus faible comparativement aux autres substrats étudiés (0 et 7% de bentonite), soit un taux de réduction de 0,093 µg/g MF par rapport aux sols sableux témoins (0% de bentonite). On remarque que la réduction en **chlorophylle b** chez les plantes stressées au plomb et cultivées dans les substrats sableux amendés à 7% de bentonite varie entre 0,017 et 0,031 µg/g MF par rapport à celles non stressées par le plomb. En revanche la réduction en **chlorophylle b** chez les plantes cultivées dans les substrats sableux amendés à 10% de bentonite varie entre 0,001 et 0,017 µg/g MF (8,6 et 12,5%) par rapport au sol témoin (10% de bentonite) et non stressé au plomb. (Tableau 14)

L'analyse statistique de Student à P=5% indique que l'effet de la bentonite est hautement significatif sur le contenu en **chlorophylle b**, en revanche le stress métallique ne montre aucun effet significatif dans les deux substrats amendés en bentonite (tableau 3, annexe).

Le test t de la comparaison des moyennes révèle un effet hautement significatif de la dose 10% de bentonite sur la teneur en **chlorophylle b** par rapport aux autres doses (0 et 7% de la bentonite).

Tableau 14: teneurs moyennes en chlorophylle a, chlorophylle b et chlorophylle totale chez *Atriplex halimus* L. cultivée dans les substrats amendés en bentonite et stressés au plomb.

Dose de la bentonite (%)	Doses métalliques en (ppm)	Teneur en chlorophylle ($\mu\text{g/g}$ MF)		
		Chlorophylle a	Chlorophylle b	chlorophylle totale
0	0	0,128	0,207	0,335
	2000	0,099 NS	0,166 NS	0,265 NS
	5000	0,126 NS	0,195 NS	0,321 NS
	10000	0,105 NS	0,17 NS	0,275 NS
7	0	0,113 NS	0,197 NS	0,31 NS
	2000	0,104 NS	0,169 NS	0,273 NS
	5000	0,105 NS	0,18 NS	0,285 NS
	10000	0,1 NS	0,166 NS	0,266 NS
10	0	0,087 **	0,147 *	0,235 *
	2000	0,076 **	0,146 NS	0,222 *
	5000	0,071 **	0,114 **	0,185 **
	10000	0,074 **	0,129 *	0,203 *

NS : Non significatif ** : hautement significatif * : Significatif.

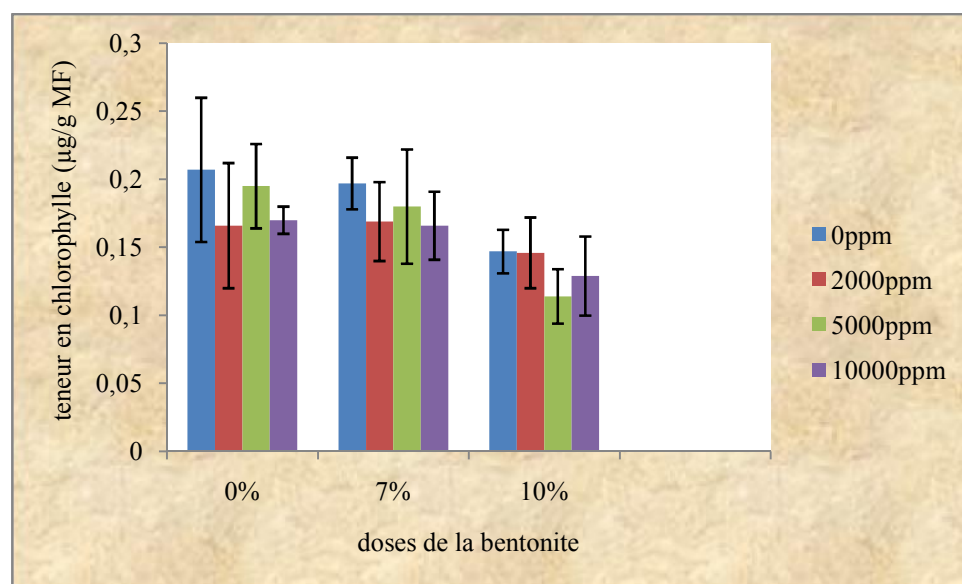


Fig.15 : Effet combiné du plomb et de la bentonite sur la teneur en chlorophylle total de l'espèce *Atriplex halimus* L.

a.3 Chlorophylle totale

- À 0% de bentonite

La teneur en chlorophylle totale constitue la somme des deux **chlorophylles a et b**. La figure 15 montre que la teneur en chlorophylle totale chez les plantes non stressées au plomb est la plus élevée par rapport aux plantes stressées. L'application du stress métallique se traduit par une légère réduction en contenu de chlorophylle variant entre 0,017 et 0,001 $\mu\text{g/g}$ MF (4,2 et 20,9%). Malgré la présence d'une légère diminution dans le taux de chlorophylle totale l'analyse statistique de Student à $P=5\%$ montre que l'effet du stress métallique est toujours non significatif (tableau 4, annexe).

- À 7 et 10% de bentonite

La figure 15 montre que les plantes cultivées dans le substrat traité à 7% de bentonite, en l'absence du plomb sont les plus riches en chlorophylle totale. Alors que les plantes cultivées dans le substrat à 10% de bentonite et stressées à de 5000 ppm de plomb sont celles qui élaborent moins de chlorophylle totale avec un taux de 0,114 $\mu\text{g/g}$ MF par rapport à tous les traitements. (Tableau 14)

L'analyse statistique de Student à $P=5\%$ montre que le facteur bentonite provoque un effet hautement significatif sur la teneur en chlorophylle totale, par contre le stress métallique ne provoque aucun effet significatif sur la teneur en chlorophylle totale dans les deux substrats amendés en bentonite (tableau 4, annexe).

Le test t de la comparaison des moyennes montre des effets hautement significatifs à 10% de la bentonite par rapport au sol sableux témoin (0% de bentonite) et des effets significatifs à la dose de 10% de bentonite sur la teneur en chlorophylle totale par rapport à la dose 7% de bentonite.

Espèce *Atriplex canescens* L.

b.1 Chlorophylle a

- À 0% de bentonite

L'analyse de la figure 16 montre que les teneurs en **chlorophylle a** les plus élevées sont enregistrées dans les plantes stressées au plomb à 2000 et 5000 ppm, soit 0,131 et 0,130 $\mu\text{g/g}$ MF respectivement. En revanche l'espèce *Atriplex canescens* L. stressée au plomb à 10000 ppm présente la teneur la plus faible avec une valeur de 0,118 $\mu\text{g/g}$ MF, avec un taux de réduction de 0,007 $\mu\text{g/g}$ MF par rapport au témoin.

L'analyse statistique de Student à P=5% montre que le stress métallique n'exerce aucun effet significatif sur la fluctuation des niveaux de la **chlorophylle a** dans le substrat sableux non amender (tableau 6, annexe).

- **À 7 et 10% de bentonite**

Comparativement aux substrats témoins à 0 % de bentonite, les plantes cultivées dans les sols traités à 7 % de bentonite présentent des teneurs en **chlorophylle a** plus importantes. La figure 16 montre que la **chlorophylle a** atteint une teneur optimale de 0,19 $\mu\text{g/g}$ MF dans les plantes non stressées et cultivées dans le substrat sableux amendé à 7% de bentonite. On remarque pour les plantes stressées que la teneur en **chlorophylle a** la plus élevée est enregistrée à la dose métallique de 5000 ppm dans le substrat à 7 % de bentonite (0,180 $\mu\text{g/g}$ MF), par contre l'application de 5000 ppm de plomb à la plante dans le sol traité à 10 % de bentonite présente la teneur la plus faible, soit une valeur de 0,077 $\mu\text{g/g}$ MF.

L'analyse statistique de Student à P=5% montre que l'effet du stress métallique et de la bentonite sur teneur en **chlorophylle a** est non significatif, mais l'effet de l'interaction du plomb et de la bentonite sur teneur en **chlorophylle a** est significatif (tableau 6, annexe). Le test t de la comparaison des moyennes montre que l'effet des doses de 0 et 5000 ppm de plomb sur la teneur en **chlorophylle a** est significatif dans les substrats amendés à 7% de bentonite. L'effet de la dose de 5000 ppm sur la teneur en **chlorophylle a** est significatif à la dose 10% de bentonite par rapport au témoin.

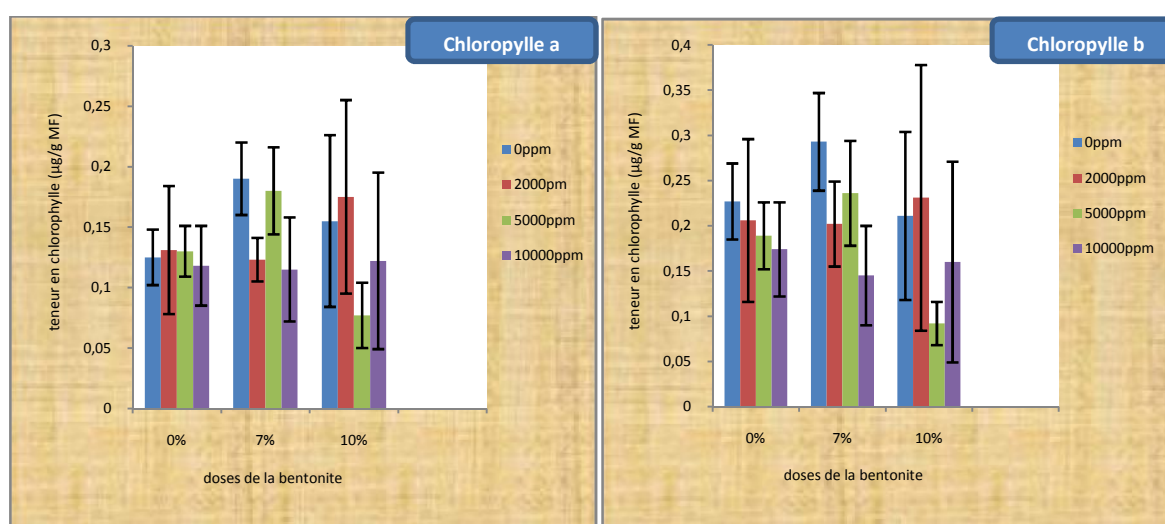


Fig.16: Effet combiné du plomb et de la bentonite sur la teneur en **chlorophylle a** et **chlorophylle b** de l'espèce *Atriplex canescens* L.

b.2 chlorophylle b

- À 0% de bentonite

L'examen de la figure 16 montre que le taux de **chlorophylle b** le plus élevé est obtenu par les plantes non stressées au plomb avec une valeur de 0,227 $\mu\text{g/g}$ MF (Tableau 15). On note que le taux de **chlorophylle b** chez les plantes stressées au plomb est inversement proportionnel avec la concentration croissante du plomb appliquée. On enregistre la teneur la plus faible à la dose métallique de 10000 ppm avec une valeur de 0,174 $\mu\text{g/g}$ MF soit une réduction de 0,053 $\mu\text{g/g}$ MF par rapport à la plante non stressée.

Le test t de la comparaison des moyennes montre que l'effet du stress métallique est non significatif sur la teneur en **chlorophylle b** par rapport aux plantes non stressées au plomb.

- À 7 et 10% de bentonite

Comparativement aux sols sans bentonite, les teneurs en **chlorophylle b** sont plus élevées dans les plantes cultivées dans les substrats amendés à 7 % de bentonite. L'analyse de la figure 16 montre également que la **chlorophylle b** atteint la teneur optimale chez les plantes non stressées cultivées dans le substrat enrichi à 7 % de bentonite soit 0,293 $\mu\text{g/g}$ MF. Il est noté chez les plantes stressées au plomb que la teneur la plus élevée en **chlorophylle b** est enregistrée à la dose de 5000 ppm dans les substrats traités à 7% de bentonite, soit 0,236 $\mu\text{g/g}$ MF. En revanche l'application de 5000 ppm de plomb à la plante dans le sol traité à 10% de bentonite présente la teneur la plus faible (0,092 $\mu\text{g/g}$ MF) de **chlorophylle b** (Tableau 15). On note une légère augmentation du taux de **chlorophylle b** soit 0,02 $\mu\text{g/g}$ MF dans les plantes stressées à 2000 ppm de plomb et cultivées dans les sols à 10 % de bentonite, puis une diminution conséquente dans les plantes stressées à 5000 et 10000 ppm de plomb.

L'analyse statistique de Student à P=5% montre que l'effet du plomb est significatif sur le contenu en **chlorophylle b**, par contre la bentonite n'exerce aucun effet significatif sur la fluctuation des niveaux de la **chlorophylle b** dans la plante (tableau 8, annexe).

Le test t de la comparaison des moyennes chez les substrats enrichis en bentonite révèle des effets hautement significatifs de la dose de 5000 ppm du plomb sur le contenu en **chlorophylle b** des plantes cultivées dans le substrat amendé à 10% de bentonite et un effet significatif de la dose de 10000 ppm sur la teneur en **chlorophylle b** des plantes cultivées dans le substrat à 7% de bentonite comparativement à celles cultivées dans le substrat témoin (0% de bentonite).

Tableau 15: teneurs moyennes en **chlorophylle a**, **chlorophylle b** et chlorophylle totale chez *Atriplex canescens* L. cultivées dans les substrats amendés en bentonite et stressées au plomb.

Dose de la bentonite (%)	Doses métalliques en (ppm)	Teneur en chlorophylle ($\mu\text{g/g MF}$)		
		Chlorophylle a	Chlorophylle b	chlorophylle totale
0	0	0,125	0,227	0,352
	2000	0,131NS	0,206 NS	0,337NS
	5000	0,13NS	0,189 NS	0,319 NS
	10000	0,118 NS	0,174 NS	0,292 NS
7	0	0,19 S	0,293 NS	0,483 *
	2000	0,123 NS	0,202 NS	0,325 NS
	5000	0,18 S	0,236 NS	0,417 NS
	10000	0,115 NS	0,145 *	0,26 NS
10	0	0,155 NS	0,211 NS	0,365 NS
	2000	0,175 NS	0,231 NS	0,406 NS
	5000	0,077 *	0,092 **	0,169HS
	10000	0,122 NS	0,16 NS	0,283 NS

NS : Non significatif ** : hautement significatif * : Significatif.

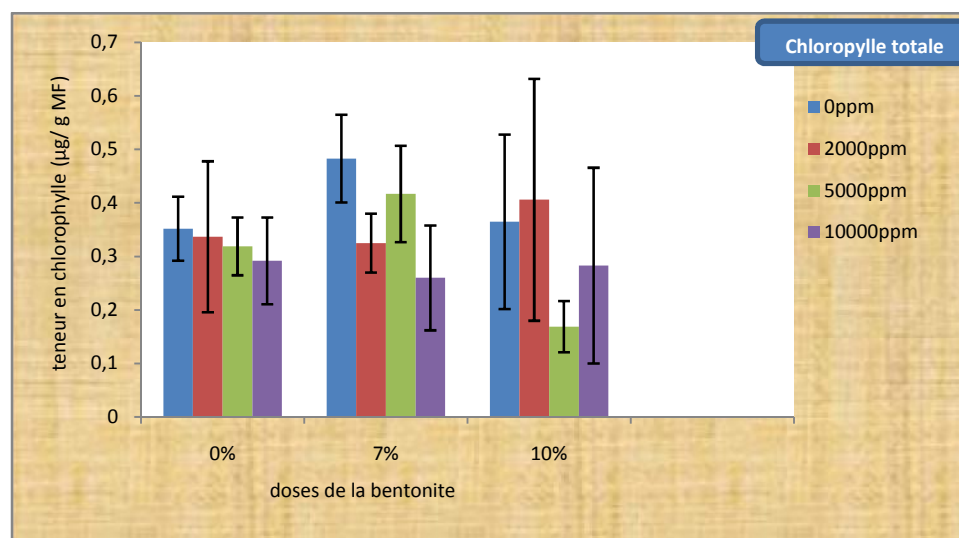


Fig.17: Effet combiné du plomb et de la bentonite sur la teneur en chlorophylle totale de l'espèce *Atriplex canescens* L.

b.3 chlorophylle totale**• À 0% de bentonite**

L'examen de la figure 17 révèle que les plantes non stressées contiennent plus de chlorophylle totale comparativement aux plantes stressées au plomb à 2000, 5000 et 10000 ppm soit une teneur de 0,352 $\mu\text{g}/\text{g}$ MF (Tableau 15). Le taux de chlorophylle totale est inversement proportionnel à la dose appliquée du plomb. Il faut noter également que le taux le plus faible en chlorophylle totale est obtenu chez les plantes traitées à la dose de 10000 ppm du plomb.

Le test t de comparaison des moyennes montre que l'effet de la dose métallique est non significatif sur le taux de chlorophylle totale par rapport aux plantes non stressées.

• À 7 et 10% de bentonite

La figure 17 montre que la teneur la plus élevée en chlorophylle totale est enregistrée dans les plantes non stressées cultivées dans le substrat traité à 7% de bentonite avec une valeur optimale de 0,483 $\mu\text{g}/\text{g}$ MF (Tableau 15). Par contre chez les plantes stressées au plomb, le taux le plus élevé de chlorophylle totale est obtenu à la dose de plomb de 5000 ppm dans le substrat amendé à 7 % de bentonite. En revanche, la teneur la plus faible est enregistrée à la dose de 5000 ppm de plomb dans les plantes cultivées dans le substrat enrichi à 10 % de bentonite, soit 0,169 $\mu\text{g}/\text{g}$ MF de chlorophylle totale (Tableau 15). Il faut noter une légère augmentation de 0,041 $\mu\text{g}/\text{g}$ MF dans le contenu de chlorophylle totale à la dose de 2000 ppm du plomb dans les plantes cultivées dans le substrat à 10% de bentonite comparativement aux plantes non stressées.

L'analyse statistique de Student à P=5% montre que l'effet du plomb est significatif sur le taux de chlorophylle totale, par contre la bentonite ne déclenche aucun effet significatif sur le contenu en chlorophylle totale (tableau 10, annexe).

Le test t de comparaison des moyennes montre que l'effet est hautement significatif à la concentration 5000 ppm du plomb pour la dose de 10% de bentonite sur le contenu en chlorophylle totale de la plante et il est significatif à la concentration 0 ppm du plomb pour le substrat à 7% de bentonite comparativement aux plantes non stressées cultivées dans le substrat témoin (0 % de bentonite).

Discussion

L'étude de l'effet combiné du plomb et de la bentonite sur le taux de la chlorophylle montre pour :

- *Atriplex halimus* L.

- Les résultats de l'analyse de la variance de la teneur en **Chlorophylle a, b** et la **chlorophylle totale** révèlent que la bentonite est le seul facteur qui présente un effet hautement significatif ($P= 0,00001$) sur le contenu en chlorophylle.

- Le facteur plomb et l'interaction entre les deux facteurs plomb et bentonite ne montrent aucun effet significatif sur la teneur en chlorophylle. (tableau 1, 3 et, 4 annexe)

- *Atriplex canescens* L.

- L'analyse de la variance au seuil d'une probabilité $P= 5\%$ de l'effet combiné du plomb et de la bentonite sur le taux de **chlorophylle** montre un effet significatif de l'interaction combiné de la bentonite et du plomb sur la **chlorophylle a** ($P < 0,05$) (tableau 6 annexe).

- L'effet du facteur plomb est significatif sur la teneur en **chlorophylle b** et totale ($P < 0,05$) (tableau 8, 10 annexe). Néanmoins le facteur bentonite ne provoque aucun effet significatif sur la teneur en **chlorophylle a, b et totale**.

- **Pour les deux espèces**

Le stress au plomb a provoqué une légère diminution de la chlorophylle d'une manière générale, mais l'effet de ce stress demeure non significatif. Huang et *al.*, 1974; Bazzaz et *al.*, 1975; Poskuta et *al.*, 1988 ont confirmé que l'exposition des plantes au plomb conduit à une forte inhibition de la photosynthèse, du rendement photosynthétique et à une limitation du taux d'assimilation de CO_2 . Le rendement photosynthétique très sensible, peut chuter de plus de 50 %. Cette inhibition s'explique par la diminution des teneurs en chlorophylles. (Kosobrukhov et *al.*, 2004; Irfan Qureshi et *al.*, 2005; Chen et *al.*, 2007; Gopal and Rizvi, 2008); il est noté chez *Atriplex canescens* L. que le stress au plomb conduit à une légère augmentation de la **chlorophylle a** par rapport aux plantes non stressées cultivées dans le substrat témoin sans bentonite à la dose de 2000 et 5000 ppm de plomb dans le substrat sableux sans bentonite. De manière similaire en remarque une légère augmentation de la **chlorophylle a, b et totale** par rapport aux plantes non stressées cultivées dans le substrat amendé à 10 % de bentonite chez les plantes cultivées dans le même substrat et stressées à la dose de 2000 ppm de plomb. Ces résultats sont confirmés par des études qui désignent que des petites quantités du plomb dans les tissus végétaux peuvent avoir un effet

stimulant de la chlorophylle sur quelques plantes (**Balsberg Pahlsson, 1989; Liu et al., 2000**).

Il ressort de ces résultats également que :

- Sous l'effet combiné du plomb et de la bentonite, les teneurs en **chlorophylle a**, **b** et totale sont beaucoup plus importants chez les plantes cultivées dans les substrats amendés à 7 % de bentonite et recevant la dose de 5000 ppm du plomb.
- Le taux en chlorophylle d'une manière générale devient plus faible chez les plantes cultivées dans les sols enrichis à 10 % de bentonite et soumises au stress métallique de 5000 ppm du plomb, ceci est peut être du à la nature sodique de la bentonite et de l'effet de la dose appliquée du plomb.
- Les plantes qui ont poussé dans les sols amendés à 7 % de bentonite présentent des teneurs en chlorophylle beaucoup plus importantes par rapport à celles cultivées dans les substrats sableux enrichis à 10% de bentonite et recevant les mêmes doses du plomb.
- La **chlorophylle b** est la plus sensible aux variations des concentrations croissantes du plomb comparativement à la teneur en **chlorophylle a**, ceci est confirmé par les travaux de Kacabova et Natr, 1986; Stiborova et al., 1986; Wozny et al., 1995 ; Vodnik et al., 1999.

D'après les résultats de l'analyse de la variance (seuil de probabilité de $P= 5\%$), l'effet espèce est hautement significatif sur les teneurs en **Chlorophylle a**, **b** et la **chlorophylle totale**. La comparaison des moyennes du facteur espèce du test de NEWMAN-KEULS (seuil de 5%), permet de constituer deux groupes homogènes pour la **chlorophylle a**, **b** et totale : Le premier groupe A qui concerne l'espèce *Atriplex canescens* L. contient les teneurs les plus importantes de la **chlorophylle a**, **b** et totale, la deuxième groupe B représentant *Atriplex halimus* L. englobe les teneurs les plus faibles en chlorophylle.

1.2 Sucres solubles

Les figures 18 et 19 représentent la teneur en sucres solubles des deux espèces étudiées (*Atriplex halimus* L. et *Atriplex canescens* L.) en fonction de l'intensité du stress métallique (0 ; 2000 ; 5000 et 10000 ppm) dans des substrats sableux amendés en bentonite (0 ; 7 et 10 %).

Tableau 16: teneurs moyennes en sucres solubles chez les deux espèces d'*Atriplex* cultivées dans les substrats amendés en bentonite et stressées au plomb.

Dose de la bentonite (%)	Doses métalliques (ppm)	Teneur en sucre soluble ($\mu\text{g/g MF}$)	
		<i>Atriplex halimus</i> L.	<i>Atriplex canescens</i> L.
0	0	3,604 \pm 1,007	2,797 \pm 0,298
	2000	3,351 \pm 1,031	2,799 \pm 0,266
	5000	3,317 \pm 0,43	3,011 \pm 0,67
	10000	2,741 \pm 0,351	3,136 \pm 0,582
7	0	3,355 \pm 1,229	2,709 \pm 0,482
	2000	3,44 \pm 2,148	2,672 \pm 0,214
	5000	5,021 \pm 4,274	2,720 \pm 0,143
	10000	3,22 \pm 0,853	2,826 \pm 0,507
10	0	5,814 \pm 2,662	2,791 \pm 0,326
	2000	2,987 \pm 0,351	2,697 \pm 0,234
	5000	3,238 \pm 1,569	3,118 \pm 1,152
	10000	2,591 \pm 0,587	2,572 \pm 0,104

a) Espèce *Atriplex halimus* L.

• **À 0% de bentonite**

Comparativement aux plantes non stressées, Les résultats de la figure 18 montrent que le taux des sucres solubles est le plus faible chez les plantes traitées à 2000,5000, et 10000 ppm du plomb. On remarque que le taux des sucres solubles diminue au fur et mesure que l'application du plomb augmente. Il faut noter également que la dose 10000 ppm du plomb présente le taux le plus faible du sucres soluble avec une valeur de 2,741 mg/g MS (tableau 16).

L'analyse statistique de Student à P=5% montre que l'effet du plomb est non significatif sur le taux des sucres solubles chez plantes stressées dans le substrat sableux sans bentonite (tableau 12, annexe).

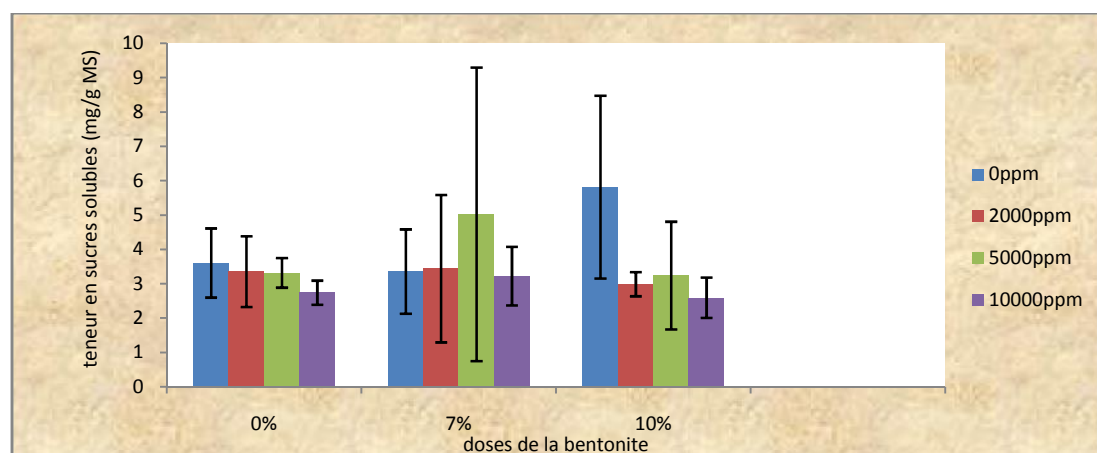


Fig.18: Effet combiné du plomb et de la bentonite sur la teneur en sucres solubles de l'espèce *Atriplex halimus* L.

- **À 7 et 10% de bentonite**

L'accumulation des sucres solubles est la plus élevée chez les plantes non stressées au plomb cultivées dans le substrat à 10% de bentonite avec une valeur de 5,814 mg/g MS. On remarque que les plantes soumises au stress métallique cultivées dans le substrat amendé à 7% de bentonite accumulent plus des sucres solubles en comparaison avec celles cultivées dans les substrats à 10% de bentonite. Le taux des sucres solubles atteint son optimum (5,021 mg/g MS) dans les plantes cultivées dans le substrat amendé à 7 % de bentonite et recevant la dose de 5000 ppm du plomb. Il faut noter que le taux de sucres solubles est le plus faible dans les plantes stressées au plomb à 10000 ppm dans les deux substrats amendés à 7 et 10% de bentonite soit respectivement 3,22 et 2,591 mg/g MS (tableau 16).

L'analyse statistique de Student à P=5% montre que l'effet du plomb et de la bentonite est non significatif sur le taux des sucres solubles des plantes stressées d'*Atriplex halimus* L. dans les substrats amendés en bentonite (tableau 12, annexe).

b) *Atriplex canescens* L .

- **À 0% de bentonite**

Les résultats des moyennes des teneurs en sucres solubles rapportés dans la figure 19, montrent que les plantes non traitées au plomb présentent le taux le plus faible en sucres solubles soit 2,797 mg/g MS par rapport aux plantes stressées à 2000,5000, et 10000 ppm du plomb. On remarque que l'accumulation des sucres solubles augmente proportionnellement avec la dose du plomb. Il faut noter que la teneur la plus élevée en sucres solubles est enregistré par les plantes traitées à la dose 10000 ppm du plomb, soit une valeur de 3,136 mg/g MS (tableau 16).

L'analyse statistique de Student à P=5% montre que l'effet du plomb est non significatif sur le taux des sucres solubles chez les plantes stressées dans le substrat sableux sans bentonite (tableau 13, annexe).

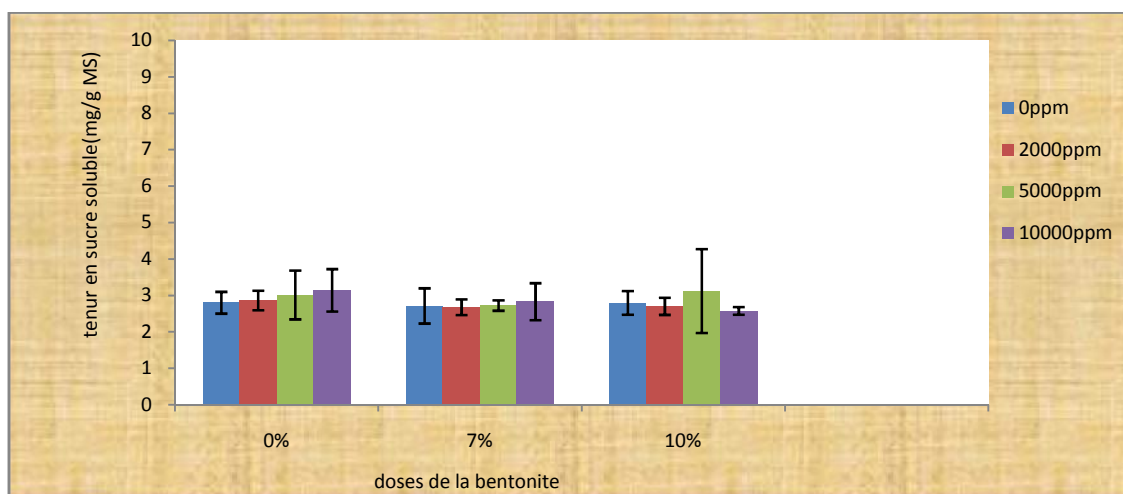


Fig.19 : Effet combiné du plomb et de la bentonite sur la teneur en Sucres solubles de l'espèce *Atriplex canescens* L.

- **À 7 et 10% de bentonite**

Comparativement aux plantes cultivées dans le substrat sableux, les plantes cultivées dans les substrats amendés à 7% en bentonite enregistre les taux les plus faibles en sucre solubles, en revanche le taux des sucres solubles des plantes cultivées dans les sols amendés à 10% de bentonite est plus important en comparaison avec les substrats à 7% de bentonite. La figure 19 montre que chez les plantes cultivées dans les substrats à 7% de bentonite, l'accumulation des sucres solubles augmente régulièrement en fonction de l'intensité du stress métallique. On remarque que la teneur en sucres solubles dans les plantes atteint sa valeur optimale dans le substrat sableux amendé à 10% de bentonite et recevant un stress métallique de 5000 ppm du plomb soit 3,118 g/g MS de sucres solubles (Tableau 16). Néanmoins la teneur en sucres solubles devient plus faible dans le substrat sableux amendé à 10% de bentonite et traité à la dose de 10000 ppm du plomb.

L'analyse statistique de Student à P=5% montre que l'effet du plomb et de la bentonite est non significatif sur le taux des sucres solubles des plantes d'*Atriplex canescens* L. dans les substrats amendés en bentonite (tableau 12, annexe).

Discussion

- Les résultats trouvés sur l'effet combiné du plomb et de la bentonite ne révèlent aucun effet significatif sur le taux des sucres solubles chez les deux espèces étudiés ; *Atriplex canescens* L. et *Atriplex halimus* L.

- **Pour *Atriplex halimus* L.**

- L'effet combiné du plomb et de la bentonite sur le taux des sucres solubles est beaucoup plus important chez les plantes cultivées dans les substrats amendés à 7 % de bentonite et recevant la dose de 5000 ppm du plomb.

- **Pour *Atriplex canescens* L.**

- La teneur des sucres solubles est plus importante dans les plantes stressées à 5000 ppm de plomb et cultivées dans les substrats amendés à 10 % de bentonite.

- **Pour les deux espèces**

- Le taux des sucres solubles devient plus faible dans les plantes cultivées dans les substrats amendés à 10 % de bentonite et recevant la dose de 10000 ppm de plomb. L'accumulation des sucres solubles dans les tissus des végétaux sous l'effet d'un stress environnemental a été considérée comme un aspect d'adaptation (**Flowers et al., 1977**), les métaux lourds comme le cadmium(Cd) augmentent la teneur en sucres solubles chez les plantes de riz (**Verma et Dubey, 2003**). Les résultats de l'analyse des sucres solubles montrent que les plantes *Atriplex halimus* et *Atriplex canescens* ne sont pas affectés par la présence des métaux lourds, ceci a été confirmé par les études précédentes (**Lutts et al., 2004; Kadukova et al., 2004**), qui indiquent que cette plante est tolérante au plomb et au cadmium, leurs biomasse, teneur en eau, et contenue en chlorophylle n'ont pas été affecté par la présence des métaux lourds.

Depuis longtemps, il est connu que le taux des sucres augmente considérablement chez les plantes soumises aux différents types de stress ; en effet, cela a été vérifié par Chunyang., (2003) chez des arbres adultes d'eucalyptus sous différents stress hydriques. Les principaux sucres solubles accumulés sous stress sont : le glucose, fructose et le saccharose (Hare et al ., 1998), et ces derniers semblent jouer un rôle très important dans le maintien d'une pression de turgescence qui est à la base des différents processus contrôlant la vie d'une plante

Les résultats de l'analyse de la variance (seuil de probabilité P= 5 %) montrent que l'effet espèce est hautement significatif sur la teneur en sucres solubles. La comparaison des moyennes du facteur espèce du test de NEWMAN-KEULS (seuil de 5%), permet de constituer deux groupes homogènes pour la teneur en sucres solubles : Le premier groupe A

qui concerne l'espèce *Atriplex halimus* L. contient les teneurs les plus importantes en sucres solubles, le deuxième groupe B représentant *Atriplex canescens* L. regroupe les teneurs les plus faibles en sucres solubles.

1.3 Teneur en eau relative

Les figures 20 et 21 représentent la teneur relative en eau des deux espèces étudiées (*Atriplex halimus* L. et *Atriplex canescens* L.) en fonction de l'intensité du stress métallique (0 ; 2000 ; 5000 et 10000 ppm) dans des substrats sableux amendés en bentonite (0 ; 7 et 10%).

Tableau 17: teneur en eau relative chez les deux espèces d'*Atriplex* cultivées dans les substrats amendés en bentonite et stressées au plomb.

Dose de la bentonite (%)	Doses métalliques (ppm)	Teneur relative en eau (%)	
		<i>Atriplex halimus</i> L.	<i>Atriplex canescens</i> L.
0	0	74,65	75,47
	2000	84,45	78,20
	5000	73,45	79,09
	10000	81,97	74,78
7	0	84,87	78,42
	2000	79,30	80,06
	5000	81,68	75,24
	10000	79,05	77,62
10	0	73,97	77,10
	2000	76,90	75,53
	5000	78,11	77,57
	10000	79,77	76,82

a) Espèce *Atriplex halimus* L.

- À 0% de bentonite

Chez les plantes cultivées dans les sols sableux, sans bentonite le contenu relatif en eau atteint sa valeur optimale avec la concentration 2000 ppm du plomb avec une valeur de 84,45%, puis on enregistre une légère diminution de la teneur relative en eau avec les traitements de 5000 et 10000 ppm de plomb. Il faut noter également que la teneur la plus

faible est enregistrée chez les plantes traitées à la dose de 5000 ppm du plomb, soit une valeur de 73,45% (Tableau 17).

L'analyse statistique de Student à P=5% montre que l'accroissement du stress métallique appliqué ne provoque pas un effet significatif sur le contenu relatif en eau des plantes des substrats sans bentonite (tableau 14, annexe).

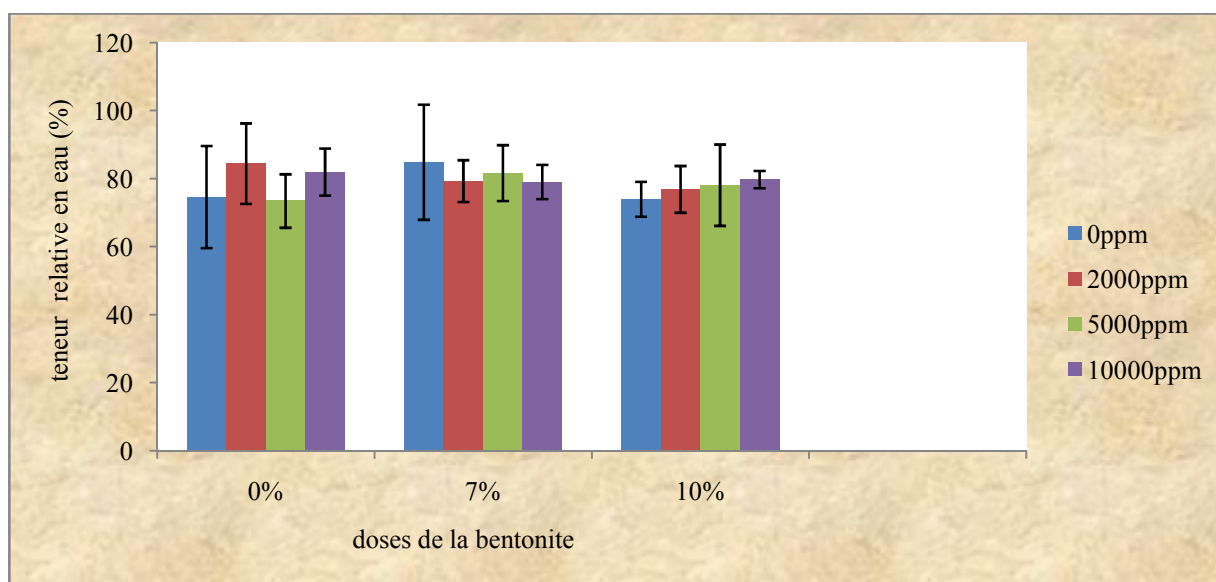


Fig.20 Effet combiné du plomb et de la bentonite sur la teneur en relative en eau de l'espèce *Atriplex halimus* L.

- **À 7 et 10% de bentonite**

- Le contenu relatif en eau est le plus élevé chez les plantes cultivées dans les sols enrichis à 7% de la bentonite et non stressé au plomb soit 84,87%. L'exposition des plantes cultivées au stress métallique dans les substrats amendés à 7% de la bentonite provoque une légère diminution aux niveaux des contenus relatifs en eau par rapport aux plantes non stressées au plomb et cultivées dans le même substrat. On remarque dans les plantes cultivées dans les substrats enrichis à 10% de bentonite, que le contenu relatif en eau augmente proportionnellement avec les doses du plomb appliquées. Il faut noter que la teneur relative en eau la plus faible est obtenue par les plantes cultivées dans le substrat amendé à 10% de bentonite et non stressé au plomb avec une valeur de 73,97% (Tableau 17).

L'analyse statistique de Student à P=5% montre que l'effet du plomb et de la bentonite est non significatif sur le contenu relatif en eau des plantes d'*Atriplex halimus* L. dans les substrats amendés en bentonite (tableau 14, annexe).

b) Espèce *Atriplex canescens* L.

• **À 0% de bentonite**

Dans les substrats sableux sans amendement de bentonite, Le contenu relatif en eau est très élevé dans les plantes stressées à 2000 et 5000 ppm de plomb, par contre la teneur la plus faible est enregistrée à la dose de 10000 ppm avec un taux de réduction de 0,69% par rapport au témoin. On note également que les plantes stressées à la dose de 5000 ppm du plomb enregistrent une teneur en eau relative la plus élevée soit 79,09%.

L'analyse statistique de Student à P=5% révèle des effets non significatifs du stress métallique sur le contenu relatif en eau dans le substrat sableux sans bentonite (tableau 15, annexe).

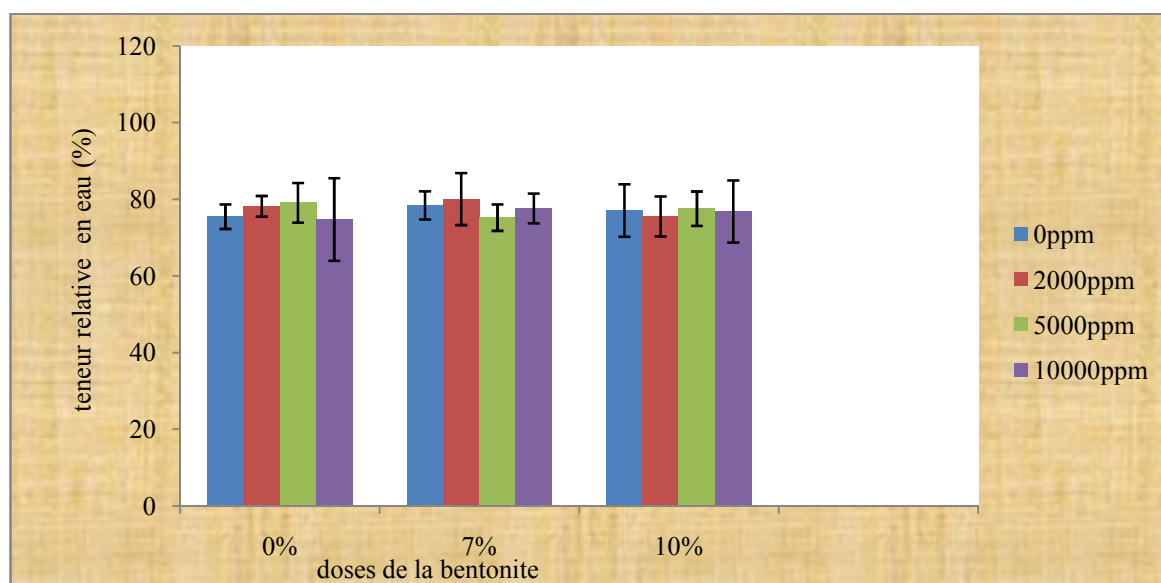


Fig.21 : Effet combiné du plomb et de la bentonite sur la teneur en relative en eau de l'espèce *Atriplex canescens* L.

• **À 7 et 10% de bentonite**

Les résultats montrent, que les doses appliquées du plomb ne provoquent pas une variation significative de la teneur relative en eau des plantes cultivées dans les deux substrats amendés en bentonite (figure 21). Néanmoins on enregistre la teneur en eau relative la plus élevée dans les plantes stressées à 2000 ppm du plomb et cultivées dans les sols traités à 7% de bentonite, soit une valeur de 80,06%. En revanche on note le taux le plus faible chez les plantes stressées à la dose de 2000 ppm du plomb et cultivées dans le substrat à 10% de bentonite (75,53%).(Tableau 17)

L'analyse statistique de Student à P=5% montre que l'effet du plomb et de la bentonite est non significatif sur le contenu relatif en eau des plantes d'*Atriplex canescens* L. dans les substrats amendés en bentonite (tableau 15, annexe).

Discussion

- L'étude de l'effet combiné du plomb et de la bentonite ne déclenche aucun effet significatif sur la teneur relative en eau chez les deux espèces étudiés ; *Atriplex canescens* L. et *Atriplex halimus* L.
- L'effet du plomb sur le contenu relatif en eau est non significatif. **Lutts et al., 2004; Kadukova et al., 2004** indiquent que la teneur en eau chez *Atriplex* n'est pas affectée par la présence des métaux lourds.
- Par contre le contenu relatif en eau chez les plantes stressées au plomb et cultivées dans les substrats amendés à 7 et 10 % de bentonite est plus élevé par rapport aux plantes non stressées cultivées dans les substrats témoins (0 % de bentonite).
- Les plantes stressées au plomb et cultivées dans les substrats amendés à 7 % de bentonite enregistrent les moyennes les plus élevées des teneurs relatives en eau comparativement à celles cultivées dans les sols enrichis à 10% de bentonite.

2. Paramètres biométriques

2.1 La biomasse fraîche des plantes

a) Espèce *Atriplex halimus* L.

La figure 24 représente la biomasse fraîche de la partie aérienne et racinaire de la plante d'*Atriplex halimus* L. en fonction de l'intensité du stress métallique (0, 2000, 5000 et 10000 ppm) dans les substrats sableux amendés en bentonite (0, 7 et 10 %).

Tableau 18: Poids frais de la partie aérienne et des racines chez *Atriplex halimus* L. cultivée dans les substrats amendés en bentonite et stressées au plomb.

Dose de la bentonite (%)	Dose du plomb (ppm)	Biomasse végétale fraîche (g)	
		Poids frais de la partie aérienne	Poids frais des racines
0	0	7,23	2,378
	2000	7,376	1,954 NS
	5000	6,686	1,34 NS
	10000	5,872	1,204 *
7	0	6,464	0,766 **
	2000	7,666	0,786 **
	5000	7,478	1,084 *
	10000	7,462	1,192 *
10	0	6,866	0,984 *
	2000	6,992	0,982 *
	5000	8,968	0,948**
	10000	6,394	0,592**

NS : Non significatif ** : hautement significatif * : Significatif.

• À 0 % de bentonite

Les résultats rapportés sur la figure 22 montrent que le poids frais de la partie aérienne est plus élevé comparativement aux poids frais de la partie racinaire de la plante. On remarque que le taux de diminution du poids frais de la partie racinaire est plus important que celui de la partie aérienne et ceci par rapport aux plantes non stressées et cultivées dans le substrat témoin à 0 % de bentonite. On note également que le taux de réduction du poids frais varie entre 7,5 et 18,8 %, pour la partie aérienne et de 17,18 à 49,4% pour la partie racinaire par rapport aux plantes non stressées et cultivées dans le substrat témoin sans bentonite (figure 23).

Le poids frais de la partie aérienne le plus élevé est enregistré dans les plantes stressées à la dose de 2000 ppm de plomb soit 7,376 g. On remarque que le poids frais de la partie aérienne diminue au fur et à mesure que le stress au plomb augmente. Il faut noter

également que les plantes stressées à la dose de 10000 ppm de plomb enregistrent le poids frais le plus faible avec une valeur de 5,872g (Tableau 18). En revanche le poids frais des racines chez les plantes stressées aux dose de 2000,5000 et 10000 ppm de plomb est plus faible comparativement aux plantes non stressées au plomb. On remarque également que le poids frais des racines est inversement proportionnel à la dose du plomb appliquée. Il faut noter que les plantes stressées à la dose de 10000 ppm de plomb enregistrent le poids frais le plus faible (tableau 18).

Le test t de la comparaison des moyennes montre que l'effet du stress métallique à la dose de 10000 ppm de plomb est significatif sur le poids frais des racines par rapport aux plantes non stressées au plomb et cultivées dans le substrat sableux sans bentonite. Par contre l'analyse statistique de Student à P=5% montre que l'effet du plomb est non significatif sur le poids frais de la partie aérienne des plantes stressées dans le substrat sableux sans bentonite (tableau 16, annexe).

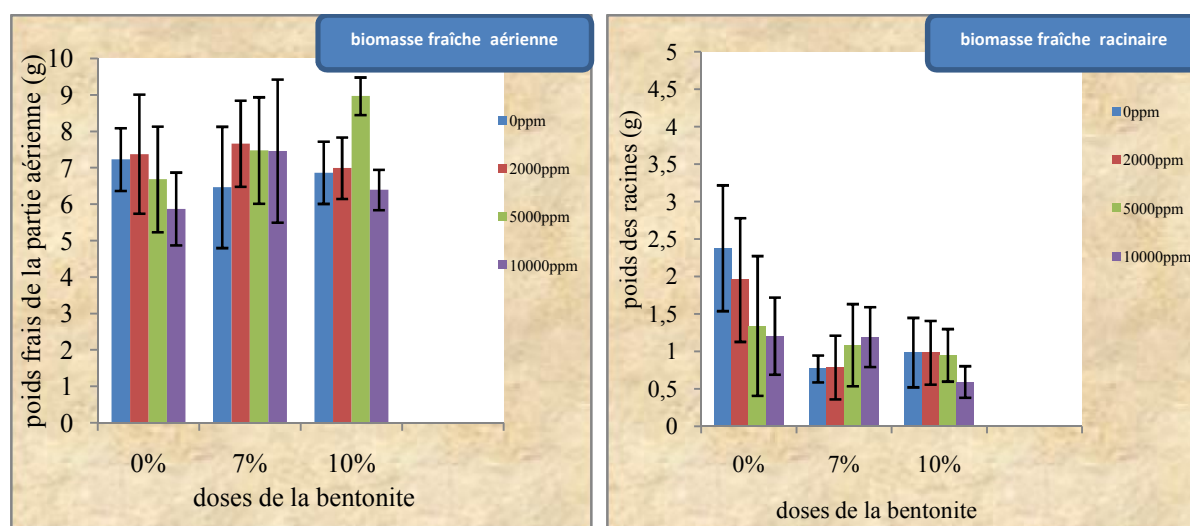


Fig.22 : Effet combiné du plomb et de la bentonite sur biomasse fraîche aérienne et racinaire d'*Atriplex halimus* L.

• **À 7 et 10 % de bentonite**

L'examen de la figure 22 montre que le poids frais de la partie aérienne est également plus élevé comparativement à celui de la partie racinaire de la plante. Le taux de diminution du poids frais de la partie racinaire est plus important que celui de la partie aérienne comparativement aux plantes non stressées et cultivées dans le substrat témoin à 0 % de bentonite (figure 23).

Comparativement aux plantes non stressées cultivées dans le substrat sans bentonite, le poids frais diminue de 10,6 % dans la partie aérienne de la plante cultivée dans le substrat amendé à 7 % de bentonite. En revanche le taux de diminution chez la partie racinaire varie entre 17,18 et 49,4% par rapport aux plantes non stressées et cultivées dans le substrat témoin sans bentonite. Néanmoins chez les plantes cultivées dans le substrat amendé à 10 % de bentonite la réduction de poids frais de la partie aérienne par rapport aux plantes non stressées et cultivées dans le substrat sans bentonite, varie entre 3,3 et 11,6 % ; par contre la réduction de poids frais de la partie racinaire varie entre 58,6 et 75,1 %. Corrélativement aux substrats précédents sans bentonite, la biomasse fraîche aérienne chez les plantes stressées est plus importante dans les sols traités à 7 % de bentonite. On remarque que le poids frais de la partie aérienne diminue au fur et à mesure que la dose du plomb appliquée augmente chez les plantes cultivées dans le substrat amendé à 7% de bentonite, où on enregistre le poids frais de la partie aérienne le plus élevé à la dose métallique de 2000 ppm, soit une valeur de 7,666 g. En revanche les plantes cultivées dans le substrat amendé à 10% de bentonite et stressées à la dose de 5000 ppm de plomb présentent le poids frais de la partie aérienne le plus élevé soit 8,968 g (Tableau 18). Il faut noter également que le poids frais de la partie aérienne le plus faible est enregistré chez les plantes cultivées dans le substrat amendé à 10% de bentonite et stressées à la dose de 10000 ppm de plomb, soit 6,394 g. En ce qui concerne la biomasse fraîche racinaire, on note que les plantes cultivées dans les substrats amendés à 7 et 10% de bentonite présentent les poids frais des racines les plus faibles en comparaison avec les plantes cultivées dans le substrat sableux sans bentonite (tableau 18).

L'analyse de la figure 22 montre que le poids frais des racines le plus élevé est enregistré chez les plantes cultivées dans le substrat enrichi à 7% de bentonite et stressées à la dose de 10000 ppm de plomb soit 1,192 g. On note chez les substrats amendés à 7% de bentonite que le poids frais des racines augmente proportionnellement avec la dose appliquée du stress métallique, par contre le poids frais des racines diminue au fur et mesure que la dose du plomb appliquée augmente chez les plantes cultivées dans le substrat amendé à 10% de bentonite. Il faut noter également que le poids frais des racines le plus faible est obtenu chez les plantes stressées à la dose de 10000 ppm de plomb et cultivées dans le substrat enrichi à 10 % de bentonite, soit une valeur de 0,592 g (tableau 18).

L'analyse statistique de Student à P=5% montre que l'effet du plomb et de la bentonite est non significatif sur le poids frais de la partie aérienne d'*Atriplex halimus* L. dans les

substrats amendés en bentonite (tableau 16, annexe).. En revanche l'effet de la bentonite est hautement significatif sur le poids frais des racines d'*Atriplex halimus* L. dans les substrats amendés en bentonite. Tandis que l'effet combiné de la bentonite et du plomb est significatif sur le poids frais des racines d'*Atriplex halimus* L. Enfin l'effet du plomb est non significatif sur le poids frais des racines de la plante (tableau 17, annexe).

Le test t de la comparaison des moyennes montre des effets hautement significatifs des traitements aux plomb à des doses de 0 et 2000 ppm et des effets significatifs des traitements aux plomb à des doses de 5000 et 10000 ppm sur le poids frais des racines dans les substrats amendés à 7% de bentonite par rapport aux plantes non stressées dans le substrat témoin sans bentonite ; par ailleurs il est hautement significatif à des traitements aux plomb de 5000 et 10000 ppm et des effets significatifs à des traitements aux plomb à des doses de 0 et 2000 ppm sur le poids frais des racines dans les substrats amendés à 10% de bentonite par rapport aux plantes non stressées cultivées dans les substrats témoins à 0% de bentonite. Ce test révèle une différence hautement significative entre le poids frais de la partie aérienne et de la partie racinaire de la plante .

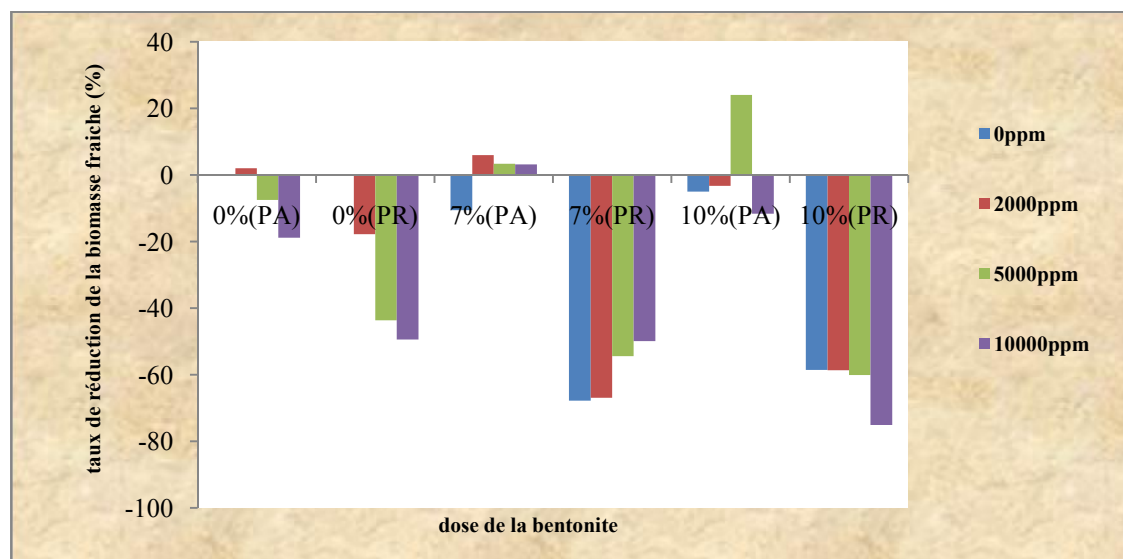


Fig.23 : Effet combiné du plomb et de la bentonite sur l'évolution de la biomasse fraîche aérienne et racinaire d'*Atriplex halimus* L. PA : Partie aérienne. PR : Partie racinaire

b) Espèce *Atriplex canescens* L.

La figure 24 représente la biomasse fraîche des plantes d'*Atriplex canescens* L. en fonction de l'intensité du stress au plomb (0, 2000, 5000 et 10000 ppm) dans les substrats sableux amendés en bentonite à 0, 7 et 10 %.

Tableau 19 : Poids frais de la partie aérienne et des racines chez *Atriplex canescens* L. cultivée dans les substrats amendés en bentonite et stressés au plomb.

Dose de la bentonite (%)	Dose du plomb (ppm)	Biomasse végétale fraîche (g)	
		Poids frais de la partie aérienne	Poids frais des racines
0	0	3,544	0,264
	2000	4,378 NS	0,576 NS
	5000	3,216 NS	0,468 *
	10000	4,88 NS	0,658 NS
7	0	4,244 NS	0,216 NS
	2000	5,754 *	0,52 NS
	5000	6,96 **	0,694 *
	10000	6,264 **	0,914 *
10	0	5,266 **	0,39 NS
	2000	3,94 NS	0,342 NS
	5000	3,52 NS	0,3 NS
	10000	3,856 NS	0,466 NS

NS : Non significatif ** : hautement significatif * : Significatif.

- **À 0 % de bentonite**

Les résultats rapportés sur la figure 24 montrent que le poids frais de la partie aérienne est plus élevé comparativement au poids frais de la partie racinaire ; mais contrairement à *Atriplex halimus* L., on constate d'une manière générale qu'il y a augmentation de la biomasse fraîche de la partie aérienne et racinaire chez *Atriplex canescens* L. par rapport aux plantes non stressées cultivées dans les substrats témoins sans bentonite. Le taux d'augmentation du poids frais de la partie racinaire est plus important que celui de la partie aérienne comparativement aux plantes non stressées et cultivées dans le substrat témoin à 0 % de bentonite (figure 25). Le taux d'augmentation du poids frais de la partie aérienne par rapport aux plantes non stressées et cultivées dans le substrat témoin à 0% de bentonite varie entre 23,5 et 37,7 %, par contre le taux d'augmentation chez la partie racinaire varie entre 77,3 et 149,2% (figure 25).

Le poids frais de la partie aérienne chez les plantes cultivées dans les sols sableux sans bentonite atteint sa valeur optimale à la dose de 10000 ppm de plomb avec une valeur de

4,88 g, par contre dans la partie aérienne de la plante on enregistre le poids frais le plus faible à la dose de 5000 ppm du plomb, soit une valeur de 3,216g (Tableau 19). Néanmoins le poids frais des racines des plantes est plus élevé chez les plantes stressées à 2000, 5000 et 10000 ppm de plomb comparativement aux autres dans le substrat sableux sans plomb. Il faut noter également que les plantes stressées à la dose de 10000 ppm de plomb présentent le poids frais des racines le plus élevé, soit 0,658 g (tableau 19).

Le test t de la comparaison des moyennes montre que l'effet du stress métallique est non significatif sur le poids frais de la partie aérienne par rapport aux plantes non stressées au plomb et cultivées dans le substrat sableux sans bentonite. Par contre l'effet du traitement 5000 ppm de plomb est significatif sur le poids frais des racines par rapport aux plantes non stressées cultivées dans le substrat témoin 0 % de bentonite.

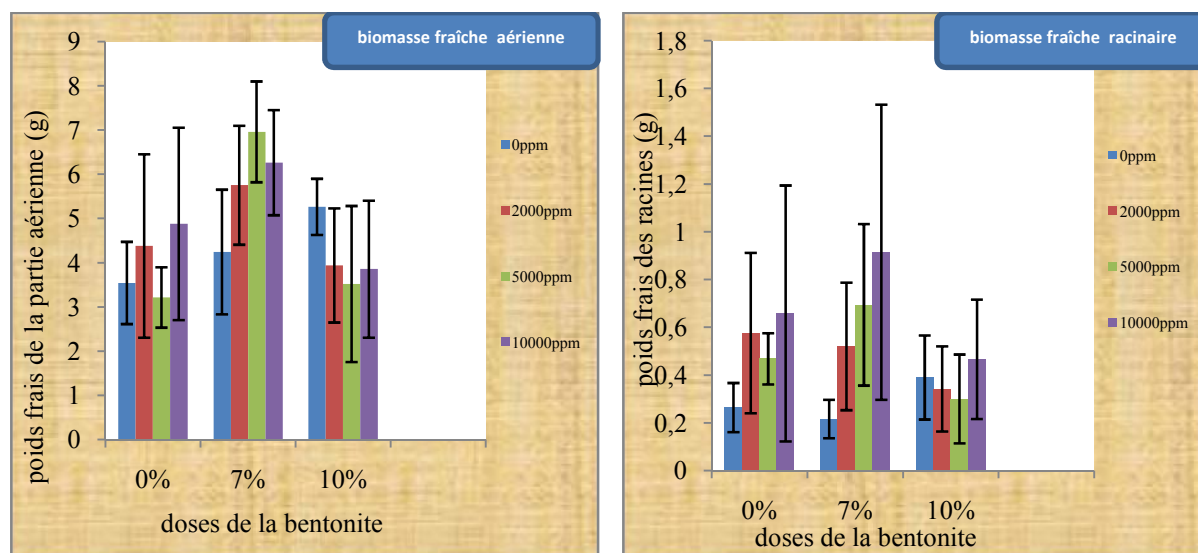


Fig.24: Effet combiné du plomb et de la bentonite sur biomasse fraîche aérienne et racinaire d'*Atriplex canescens* L.

- **À 7 et 10 % de bentonite**

L'examen de la figure 24 montre que le poids frais de la partie aérienne est plus élevé comparativement à celui de la partie racinaire de la plante. Contrairement à l'*Atriplex halimus* L., la biomasse fraîche de la partie aérienne et racinaire enregistre généralement une augmentation plus importante chez les plantes d'*Atriplex canescens* L. par rapport aux plantes non stressées et cultivées dans les substrats témoins sans bentonite. Le taux d'augmentation du poids frais de la partie racinaire est plus important que celui de la partie aérienne comparativement aux plantes non stressées et cultivées dans le substrat témoin à 0 % de bentonite (figure 25).

La figure 24 montre que le poids frais de la partie aérienne chez les plantes non stressées augmente au fur et à mesure avec l'augmentation de la dose de bentonite appliquée. Le poids frais de la partie aérienne des plantes stressées cultivées dans le substrat amendé à 7 % de bentonite est plus élevé par rapport aux plantes stressées cultivées dans les substrats à 0 et 10% de bentonite. Dans les substrats traités à 7 % de bentonite, le poids frais de la partie aérienne des plantes stressées est plus élevé comparativement à celui des plantes non stressées qui enregistrent une valeur de 4,244 g (Tableau 19). On constate que le poids frais de la partie aérienne de la plante atteint sa valeur optimale chez les plantes stressées à la dose de 5000 ppm de plomb cultivées dans le substrat sableux enrichi à 7 % de bentonite, soit une valeur de 6,96 g. En revanche dans le substrat sableux amendé à 10 % de bentonite les plantes stressées à la dose de 5000 ppm de plomb enregistrent le poids frais de la partie aérienne le plus faible soit 3,52g. Dans le substrat amendé à 10 % de bentonite on remarque également que les plantes stressées au plomb enregistrent le poids frais de la partie aérienne le plus faible en comparaison avec celles non exposées au stress métallique (figure 24).

Par ailleurs l'analyse de la figure 24 montre que le poids frais des racines le plus faible est enregistré chez les plantes non stressées au plomb et cultivées dans le substrat amendé à 7% de bentonite. Le poids frais des racines est proportionnel avec la dose appliquée de plomb dans le substrat amendé à 7 % de bentonite. On remarque que le poids frais des racines des plantes stressées au plomb cultivées dans le substrat amendé à 7 % de bentonite est plus élevé à celui des plantes stressées au plomb et cultivées dans le substrat amendé à 10 % de bentonite. Il faut noter également que le poids frais des racines est optimal chez les plantes soumises à 10000 ppm de plomb et cultivées dans le substrat amendé à 7 % de bentonite. En revanche le poids frais des racines des plantes stressées et cultivées dans le substrat amendé à 10 % de bentonite subit une légère diminution inversement à l'accroissement de la dose du plomb il augmente ensuite à la dose de 10000 ppm de plomb. Il faut noter que les plantes cultivées dans le substrat amendé à 10% de bentonite et stressées à la dose de 5000 ppm de plomb enregistrent le poids frais des racines le plus faible parmi les plantes stressées au plomb (tableau 19).

L'analyse statistique de Student à P=5% montre que l'effet l'interactif de plomb et de la bentonite est hautement significatif sur le poids frais de la partie aérienne des plantes d'*Atriplex canescens* L. dans les substrats amendés en bentonite, tandis que l'effet de la

bentonite est significatif sur le poids frais de la partie aérienne (tableau 19, annexe). Par contre l'effet du plomb est non significatif sur le poids frais de la partie aérienne.

L'analyse statistique de Student à P=5% montre que l'effet combiné du plomb et de la bentonite est significatif ; sur le poids frais des racines des plantes d'*Atriplex canescens* L. dans les substrats amendés en bentonite (tableau 21, annexe).

Le test t de la comparaison des moyennes par rapport aux plantes non stressées au plomb dans le substrat témoin à 0% de bentonite chez les substrats enrichis en bentonite révèle des effets hautement significatifs de la dose de 5000 et 10000 ppm et des effets significatifs de la dose de 2000 ppm de plomb sur le poids frais des tiges des plantes cultivées dans le substrat amendé à 7 % de bentonite. Ce test montre un effet hautement significatif de la dose de 0 ppm sur le poids frais des tiges des plantes cultivées dans le substrat amendé à 10 % de bentonite .

Le test t de la comparaison des moyennes du poids frais des racines montre des effets significatifs des traitements métalliques 5000 et 10000 ppm de plomb sur le poids frais des racines dans le substrat amendé à 7 % de bentonite par rapport aux plantes non stressées au plomb dans le substrat témoin sans bentonite 0 % de bentonite.

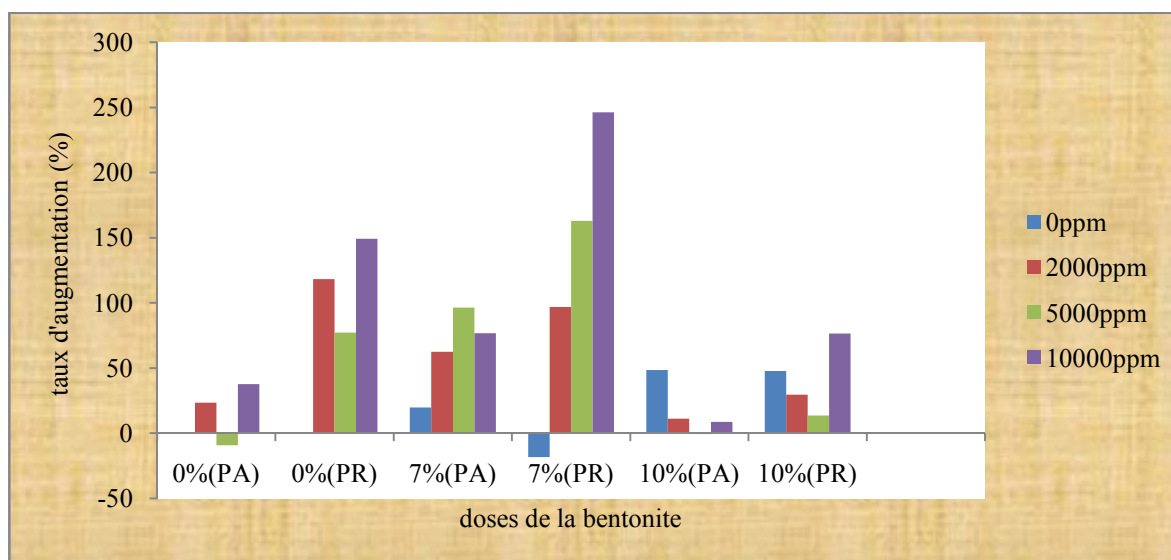


Fig.25: l'effet combiné du plomb et de la bentonite sur l'évolution de la biomasse fraîche aérienne et racinaire d'*Atriplex canescens* L. PA : Partie aérienne. PR : Partie racinaire

2. 2 La biomasse sèche des plantes

a) Espèce *Atriplex halimus* L.

La figure 26 représente la biomasse sèche des plantes d'*Atriplex halimus* L. en fonction de l'intensité du stress métallique (0, 2000, 5000 et 10000 ppm) dans les substrats sableux amendés en bentonite à 0, 7 et 10 %.

Tableau 20 : Poids sec de la partie aérienne et des racines chez *Atriplex halimus* L. cultivée dans les substrats amendés en bentonite et stressés au plomb.

Dose de la bentonite (%)	Dose du plomb (ppm)	Biomasse végétale sèche (g)	
		Partie aérienne	Partie racinaire
0	0	2,095	0,439
	2000	2,168	0,349
	5000	1,786	0,276
	10000	1,521	0,245
7	0	1,395	0,17
	2000	1,675	0,192
	5000	1,765	0,249
	10000	1,805	0,307
10	0	1,727	0,254
	2000	1,368	0,226
	5000	2,017	0,244
	10000	1,782	0,422

- **À 0% de bentonite**

L'analyse de la figure 26 montre que le poids sec de la partie aérienne est largement plus élevé en comparaison au poids sec de la partie racinaire de la plante. Comparativement aux plantes non stressées et cultivées dans le substrat témoin à 0 % de bentonite, le taux de diminution du poids sec de la partie racinaire est plus important que celui de la partie aérienne (figure 27), ou on note une diminution de 14,7 à 27,4 % pour la partie aérienne et de 20,5 à 44,2% pour la partie racinaire (figure 27). On constate que le poids sec de la partie aérienne et de la partie racinaire d'*Atriplex halimus* L. diminue au fur et à mesure que le stress au plomb augmente. Le poids sec le plus élevé de la partie aérienne est enregistré chez les plantes stressées à la dose de 2000 ppm de plomb soit 2,168 g (Tableau 20). Par contre la partie aérienne des plantes stressées à la dose de 10000 ppm de plomb présentent le poids sec le plus faible, avec une valeur de 1,521 g. Il faut noter également que le poids sec le plus faible

des racines est enregistré chez les plantes stressées à la dose de 10000 ppm de plomb avec un taux de réduction de 0,194 g par rapport aux plantes non stressées (tableau 20).

Les racines des plantes non stressées au plomb présentent le poids sec le plus élevé en comparaison à celles soumises aux doses 2000, 5000 et 10000 ppm du plomb soit 0,439 g (Tableau 20).

L'analyse statistique de Student à P=5% montre que l'effet du plomb et de la bentonite est non significatif sur le poids sec de la partie aérienne et racinaire d'*Atriplex halimus* L. dans les substrats non amendés en bentonite (tableau 23, annexe).

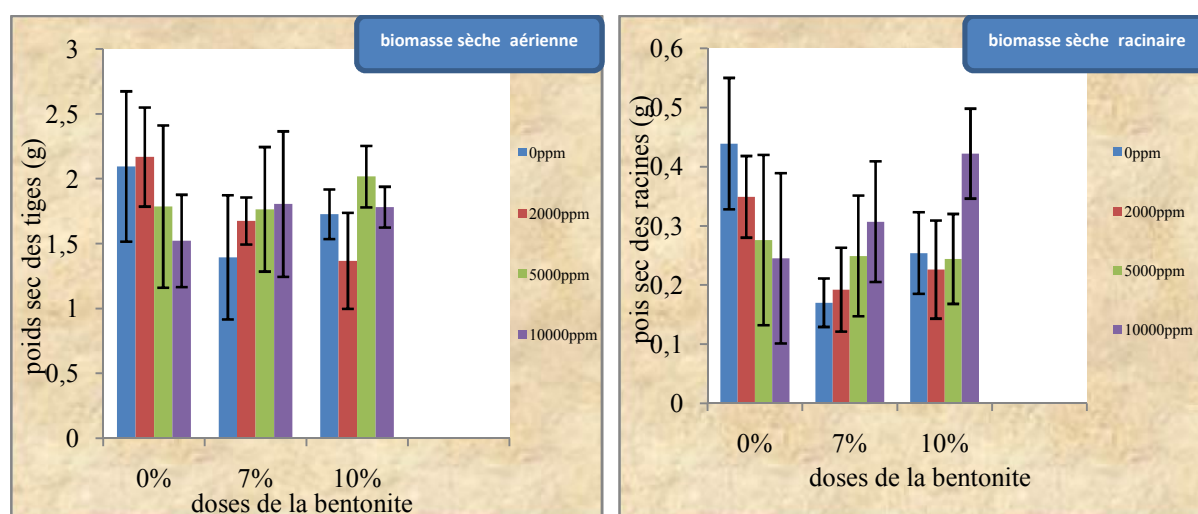


Fig. 26: Effet combiné du plomb et de la bentonite sur biomasse sèche aérienne et racinaire d'*Atriplex halimus* L.

- **À 7 et 10 % de bentonite**

L'étude des résultats (figure 26) montre que le poids sec de la partie aérienne est plus élevé comparativement à celui de la partie racinaire de la plante. Ces résultats révèlent également que le taux de diminution du poids sec de la partie racinaire est plus important que celui de la partie aérienne par rapport aux plantes non stressées et cultivées dans le substrat témoin (0 % de bentonite).

On remarque dans le substrat amendé à 7% de bentonite, que le poids sec de la partie aérienne de l'*Atriplex halimus* L. augmente proportionnellement avec l'intensité du stress métallique. Il est noté que la partie aérienne et racinaire des plantes stressées au plomb présentent le poids sec le plus élevé par rapport à celles non stressées au plomb et cultivées dans le sol à 7% de bentonite. En revanche les plantes cultivée dans le substrat enrichi à 10%

de bentonite et stressées à la dose de 5000ppm du plomb présentent le poids sec de la partie aérienne le plus élevé soit 2,017 g. Par contre le poids sec des racines des plantes cultivées dans le substrat à 10 % de bentonite augmente proportionnellement avec l'intensité du stress au plomb (figure 26), avec une teneur optimum enregistrée à 10000 ppm, soit une valeur de 0,422 g (Tableau 20).

L'analyse statistique de Student à P=5% montre que l'effet du plomb et de la bentonite est non significatif sur le poids sec de la partie aérienne et des racines d'*Atriplex halimus* L. dans les substrats amendés en bentonite (tableau 25 et 27 annexe). Il faut noter que le test t de la comparaison des moyennes des poids sec de la partie aérienne et de la partie racinaire résulte une différence hautement significative.

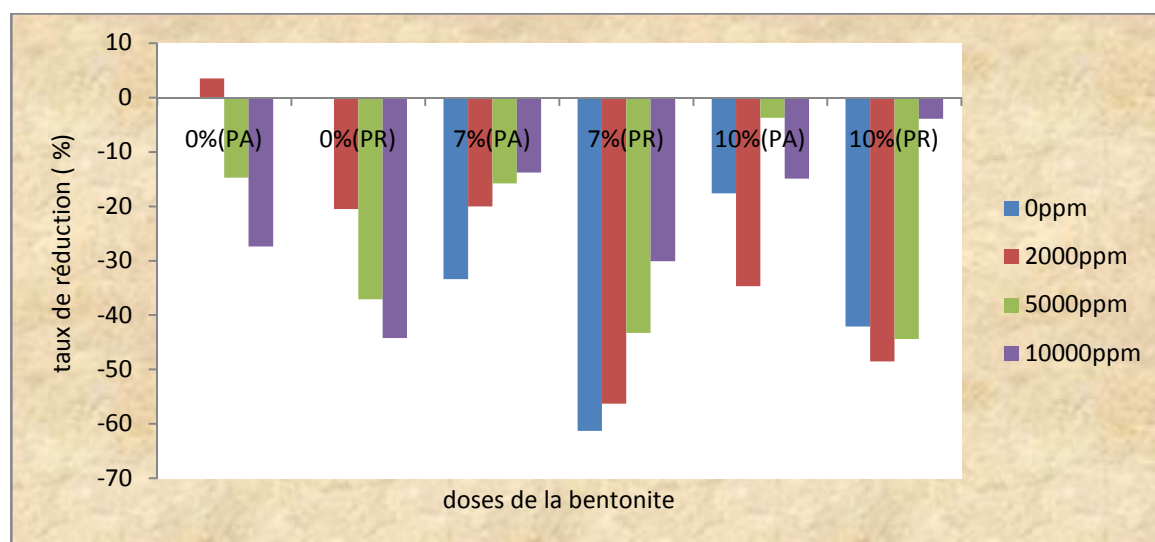


Fig. 27: l'effet combiné du plomb et de la bentonite sur l'évolution de la biomasse fraîche aérienne et racinaire d'*Atriplex halimus* L. PA : Partie aérienne. PR : Partie racinaire

b) Espèce *Atriplex canescens* L.

La figure 28 représente la biomasse sèche des plantes d'*Atriplex canescens* L. en fonction de l'intensité du stress métallique (0, 2000, 5000 et 10000 ppm) dans des substrats sableux amendés en bentonite (0, 7 et 10 %).

Tableau 21 : Poids sec de la partie aérienne et des racines chez les plantes d'*Atriplex canescens* L. cultivées dans les substrats amendés en bentonite et stressés au plomb.

Dose de la bentonite (%)	Dose du plomb (ppm)	Biomasse végétale sèche (g)	
		Poids sec des tiges	Poids sec des racines
0	0	0,7	0,059
	2000	1,032 NS	0,152 *
	5000	0,671 NS	0,096 **
	10000	1,119 NS	0,113 NS
7	0	0,859 NS	0,066 NS
	2000	1,417 **	0,155 *
	5000	1,828 **	0,186 **
	10000	1,519 **	0,25 *
10	0	1,334 **	0,126 *
	2000	0,923 NS	0,095 NS
	5000	0,974 NS	0,091 NS
	10000	0,758 NS	0,143 *

NS : Non significatif ** : hautement significatif * : Significatif.

- **À 0 % de bentonite**

L'analyse de la figure 28 montre que le poids sec de la partie aérienne est plus élevé comparativement à celui de la partie racinaire. Contrairement à *Atriplex halimus* L., on constate d'une manière générale une augmentation de la biomasse sèche de la partie aérienne et racinaire chez *Atriplex canescens* L. par rapport aux plantes non stressées et cultivées dans le substrat témoin sans bentonite (figure 29). On remarque que le taux d'augmentation du poids sec de la partie racinaire est plus important que celui de la partie aérienne et ceci par rapport aux plantes non stressées et cultivées dans le substrat témoin à 0 % de bentonite. On note également que le taux d'augmentation du poids sec varie entre 47,4 et 59,9 %, pour la partie aérienne et de 91,5 à 157,6 % pour la partie racinaire comparativement aux plantes non stressées et cultivées dans le substrat témoin sans bentonite (figure 29).

Chez les plantes stressées cultivées dans les sols sableux sans bentonite, le poids sec de la partie aérienne atteint sa valeur optimale avec la concentration de 10000 ppm de plomb avec une valeur de 1,119 g, par contre à la dose de 5000 ppm du plomb on enregistre le poids sec de la partie aérienne le plus faible, soit une valeur de 0,671 g (Tableau 20). En revanche le poids sec des racines (figure 28) est plus élevé dans les plantes stressées à 2000, 5000, et 10000 ppm au plomb par rapport aux plantes non stressées au plomb. L'évolution du poids sec dans les plantes stressées est identique dans les deux parties de la

plante ; racinaire et aérienne, ou on constate une diminution du poids sec de 2000 à 5000 ppm puis une augmentation à la dose de 10000 ppm (tableau 21).

Le test t de la comparaison des moyennes montre que l'effet de la dose métallique est non significatif sur le poids sec de la partie aérienne par rapport aux plantes non stressées dans le substrat sableux sans bentonite. Par ailleurs le test t de la comparaison des moyennes de la partie racinaire montre que l'effet de la dose métallique est hautement significatif à la dose de 2000 ppm et significatif à la dose de 5000 ppm de plomb sur le poids sec des racines par rapport aux plantes non stressées dans le substrat sableux sans bentonite.

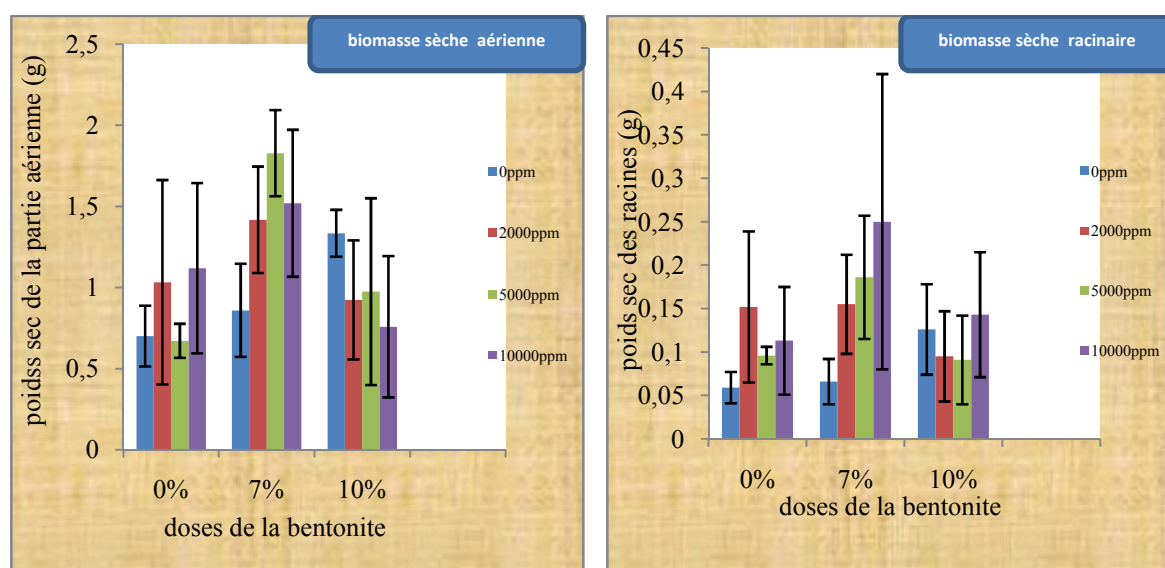


Fig.28: Effet combiné du plomb et de la bentonite sur biomasse sèche aérienne et racinaire d'*Atriplex canescens* L.

- **À 7 et 10 % de bentonite**

Le poids sec des plantes cultivées dans les substrats amendés à 7 % de bentonite est largement plus important comparativement aux substrats témoins à 0 % de bentonite. Il est noté que le poids sec de la partie aérienne est plus élevé que celui des racines (figure 28).

On observe également dans les substrats amendés à 7 % de bentonite que la biomasse végétale sèche de partie aérienne et des racines des plantes stressées est plus élevée que chez les plantes non stressées.

On note un parallélisme dans l'évolution du poids sec dans les plantes stressées, où on enregistre une augmentation du poids sec pour les doses de 2000 et 5000 ppm de plomb puis une diminution à la dose de 10000 ppm du plomb, On obtient la valeur optimale de la biomasse végétale dans la partie aérienne des plantes stressées à la dose de 5000 ppm de

plomb et cultivées dans le substrat enrichi à 7 % de bentonite (1,828 g), Par contre la plus faible est enregistrée chez les plantes stressées à la dose de 10000 ppm et cultivées dans les substrats amendés à 10 % de bentonite, soit une valeur de 0,758 g (tableau 21). Comparativement aux plantes stressées cultivées dans les substrats enrichis à 10% de bentonite, le poids sec le plus élevé de la partie racinaire est enregistré chez les plantes cultivées dans les substrats amendés à 7 % de bentonite; on remarque par ailleurs que le poids sec optimal des racines est obtenu à la dose de 10000 ppm de plomb dans les substrats amendés à 7 % de bentonite, soit une valeur de 0,25 g. (Tableau 21)

Par contre on constate une diminution assez conséquente du poids sec dans la partie aérienne et racinaire des plantes cultivées dans les substrats amendés à 10 % de bentonite et ceci par rapport à celles cultivées dans les substrats enrichis à 7 % de bentonite ; néanmoins la biomasse végétale sèche est plus élevée dans la partie aérienne des plantes cultivées dans les substrats amendés à 7 % de bentonite.

Le taux de l'augmentation du poids sec de la partie racinaire est plus important que celui de la partie aérienne dans les deux substrats amendés à 7 et 10 % de bentonite comparativement aux plantes non stressées et cultivées dans le substrat témoin à 0 % de bentonite (figure 29). Comparativement aux plantes non stressées cultivées dans le substrat sans bentonite, l'augmentation du poids sec varie entre de 22,7 et 161,1 % dans la partie aérienne de la plante cultivée dans le substrat amendé à 7 % de bentonite, en revanche l'augmentation chez la partie racinaire varie entre 11,9 et 323,7%. Par contre et en comparaison avec les plantes non stressées cultivées dans les substrats à 0 % de bentonite, l'augmentation de la biomasse végétale sèche varie de 8,3 à 90,6 % pour la partie aérienne et de 54,2 à 142,4 % pour la partie racinaire (figure 29)

Les résultats montrent que le poids sec de la partie aérienne et racinaire chez les plantes non stressées au plomb augmente proportionnellement avec la dose de la bentonite (figure 28).

L'analyse statistique de Student à P=5% montre que l'effet de la bentonite et de l'effet combiné de la bentonite et du plomb est hautement significatif sur le poids sec de la partie aérienne des plantes d'*Atriplex canescens* L. dans les substrats amendés en bentonite. Par contre chez la partie racinaire l'analyse statistique de Student à P=5% montre que l'effet de la bentonite et du plomb est significatif sur le poids sec des racines des plantes dans les

substrats amendés en bentonite. Par contre l'effet interactif de la bentonite avec le plomb est non significatif sur le poids sec des racines d'*Atriplex canescens* L. (tableau 27 et 27, annexe).

Comparativement aux plantes non stressées et cultivées dans le substrat témoin sans bentonite, le test t de la comparaison des moyennes chez les substrats enrichis en bentonite révèle des effets hautement significatifs de la dose de 2000,5000 et 10000 ppm du plomb sur le poids sec de la partie aérienne des plantes cultivées dans les substrats amendés à 7 % de bentonite. L'effet est hautement significatif de la dose de 0 ppm sur le poids sec de la partie aérienne des plantes cultivées dans les substrats amendés à 10 % de bentonite.

Chez la partie racinaire le test t de la comparaison des moyennes montre que l'effet de la dose métallique est hautement significatif à la dose de 5000 ppm de plomb et significatif à la dose de 2000 et 10000 ppm de plomb sur le poids sec des racines des plantes dans les substrats amendés à 7 % de bentonite par rapport aux plantes non stressées dans le substrat sableux sans bentonite. Par contre dans le substrat amendé à 10 % de bentonite l'effet de la dose métallique est significatif à la dose de 0 et 10000 ppm de plomb sur le poids sec des racines par rapport aux plantes non stressées dans les substrats sableux sans bentonite.

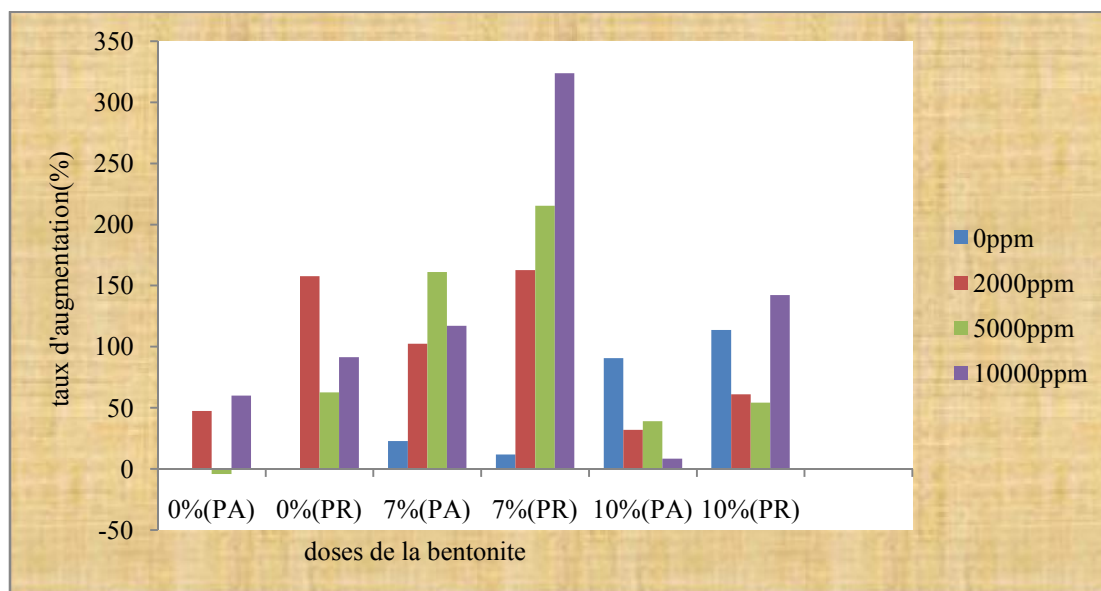


Fig.29: l'effet combiné du plomb et de la bentonite sur l'évolution de la biomasse fraîche aérienne et racinaire d'*Atriplex canescens* L. PA : Partie aérienne. PR : Partie racinaire

Discussion

L'étude de l'effet combiné du plomb et de la bentonite sur la biomasse fraîche et sèche des parties aérienne et racinaire montre pour :

- *Atriplex halimus* L.

- L'effet du plomb et de la bentonite est non significatif ($P > 0,05$) sur le poids frais et sec de la partie aérienne de la plante.
- L'effet de la bentonite est hautement significatif ($P = 0,00003$) sur le poids frais et non significatif sur le poids sec des racines des plantes.
- L'effet combiné de la bentonite et du plomb est significatif ($P = 0,040$) sur le poids frais des racines d'*Atriplex halimus* L.
- L'effet du plomb est non significatif sur le poids frais et sec des racines de la plante. (tableau 17 annexe)
- Chez *Atriplex halimus* L. le stress métallique appliqué aux plantes cultivées dans les substrats témoins 0 % de bentonite amène une diminution de poids frais et sec des parties aérienne et racinaire des plantes par rapport aux plantes non stressées cultivées dans le même substrat. Ces résultats sont corroborés par des études précédentes qui signalent que le plomb affecte la croissance et la morphogénèse des plantes, et fait diminuer la taille des racines primaires et peut même causer l'inhibition de la division et de l'élongation cellulaire. (Seregin et Ivanov, 2001 ; Malkowski et al, 2002 ; Patra et al., 2004 ; Kopittke et al., 2007).
- Contrairement aux plantes stressées et cultivées dans les substrats sans traitement à la bentonite (0% de bentonite), les plantes stressées cultivées dans les substrats amendés à 7 % de bentonite font apparaître une augmentation du poids frais de la partie aérienne de la plante,
- Il est noté aussi que le poids sec des plantes stressées au plomb cultivées dans les substrats amendés à 7 % de bentonite augmente par rapport aux plantes non stressées cultivées dans le même substrat, ce qui explique que la dose de 7 % de bentonite assure une bonne adaptation chez les plantes vis-à-vis cette contrainte du stress métallique. Selon Reguieg YH, Belkhodja et Benkhalifa M l'adjonction de la bentonite aux sols sableux conduit au maintien de leur stabilité structurale et à l'amélioration de leurs propriétés chimiques.
- Dans les substrats traités à 10 % de bentonite le poids frais et sec de la partie aérienne des plantes stressées au plomb diminue par rapport aux plantes non stressées cultivées

dans les substrats témoins sans bentonite, à l'exception des plantes stressées à la dose de 5000 ppm de plomb, ceci est dû à la dégradation des propriétés physico-chimiques résultant de l'excès de la bentonite.

- ***Atriplex canescens* L.**

- L'effet combiné du plomb et de la bentonite est significatif ($P= 0,0206$) sur le poids frais de la partie aérienne de la plante, par contre il est hautement significatif sur le poids sec de la partie aérienne de la plante.
- L'effet de la bentonite est hautement significatif ($P = 0,0001$) sur le poids frais et sec de la partie aérienne des plantes.
- L'effet du plomb est non significatif ($P > 0,05$) sur le poids frais et sec de la partie aérienne des plantes.
- l'effet combiné du plomb et de la bentonite est significatif sur le poids frais des racines de l'*Atriplex canescens* L..
- L'effet de la bentonite et du plomb est significatif sur le poids sec des racines de la plante.
- D'une manière générale la réponse au stress au plomb chez les plantes cultivées dans tous les substrats utilisés se traduit par une augmentation du poids frais et sec des parties aérienne et racinaire par rapport aux plantes non stressées cultivées dans les substrats témoin sans bentonite.
- L'augmentation du poids frais et sec des parties aérienne et racinaire de plantes est plus importante chez les plantes stressées cultivées dans les substrats enrichis à 7 % de bentonite, ce qui explique l'effet de la bentonite à la dose de 7%, en favorisant l'adaptation de la plante à l'application du stress métallique.
- Le poids sec de la partie aérienne et racinaire des plantes cultivées dans les substrats amendés à 7 % de bentonite et stressées au plomb est largement plus important comparativement aux substrats amendés à 10 % de bentonite.

- **Pour les deux espèces**

- La biomasse fraîche et sèche de la partie aérienne est largement supérieure comparativement à la biomasse fraîche et sèche de la partie racinaire de la plante chez les deux espèces étudiées.

D'après les résultats de l'analyse de la variance (seuil de probabilité de $P= 5 \%$), l'effet espèce est hautement significatif sur la biomasse fraîche et sèche des parties aérienne et racinaire des plantes. La comparaison des moyennes du facteur espèce du test

de NEWMAN-KEULS (seuil de 5%), permet de constituer deux groupes homogènes pour la biomasse sèche et fraîche des parties aérienne et racinaire : Le premier groupe A concerne l'espèce *Atriplex halimus* L. qui contient les biomasses fraîche et sèche les plus importantes, le deuxième groupe B représente *Atriplex canescens* L. qui englobe la biomasse la moins importante.

2.3 Dosage du plomb dans les plantes

a) Espèce *Atriplex halimus* L.

La figure 30 représente l'accumulation du plomb dans la partie aérienne et racinaire chez *Atriplex halimus* L. à 0, 2000, 5000 et 10000 ppm dans les substrats sableux amendés en bentonite à 0, 7 et 10 %.

Tableau 22: Accumulation du plomb dans les parties aérienne et racinaire chez *Atriplex halimus* L. cultivée dans les substrats amendés en bentonite et stressées au plomb.

Dose de la bentonite (%)	Dose du plomb appliquée au sol (ppm)	Concentration du plomb dans la plante (ppm)	
		Partie aérienne	Partie racinaire
0	0	0	0
	2000	0,567	1,179
	5000	0,522	1,097
	10000	0,941	1,635
7	0	0	0
	2000	0,58	1,453
	5000	0,982	2,449
	10000	0,915	2,706
10	0	0	0
	2000	0,664	0,946
	5000	1,097	1,008
	10000	0,585	1,555

- **À 0 % de bentonite**

Les résultats présentés dans la figure 30 montrent que l'accumulation du plomb dans la partie souterraine de la plante stressée au plomb est largement supérieure à celle de la partie aérienne. On remarque que les plantes stressées à la dose de 10000 ppm de plomb accumulent le taux du plomb le plus élevé pour les parties aérienne et racinaire, soit 0,941 et 1,635 mg/l respectivement (tableau 22).

Le test t de la comparaison des moyennes révèle une différence significative entre le taux d'accumulation du plomb dans la partie aérienne et la partie souterraine de l'*Atriplex halimus* L.

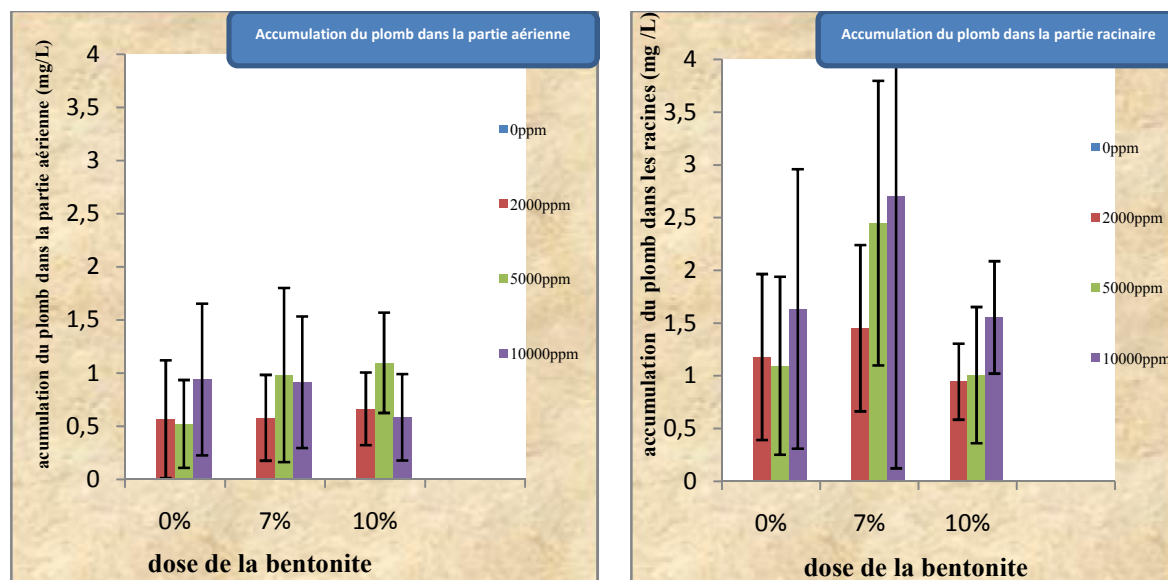


Fig. 30 : Effet combiné du plomb et de la bentonite sur la concentration du plomb dans les parties aérienne et racinaire d'*Atriplex halimus* L.

- **À 7 et 10 % de bentonite**

Comparativement aux substrats témoins sans bentonite, l'accumulation du plomb dans la partie aérienne est plus importante chez l'*Atriplex halimus* cultivée dans les substrats sableux amendés à 7 et 10 % de bentonite. Comparativement aux plantes cultivées dans les substrats sableux sans bentonite, on remarque une légère diminution de la teneur du plomb dans la partie aérienne de la plante à 10000 ppm de plomb appliquée au sol chez les deux substrats traités à 7 et 10 % de bentonite. Il est noté également que la concentration du plomb dans la partie racinaire est largement supérieure à celle de la partie aérienne de la plante et que l'accumulation du plomb dans les racines d'*Atriplex halimus* L. augmente au fur et à mesure que la dose du plomb appliquée augmente. L'accumulation du plomb dans les racines est largement plus élevée chez les plantes cultivées dans le substrat amendé à 7 % de bentonite comparativement à celle cultivées dans le substrat traité à 10 % de bentonite.

L'analyse statistique de Student à P=5% montre que l'effet du stress au plomb est hautement significatif sur l'accumulation du plomb dans les parties aérienne et racinaire chez *Atriplex halimus* L. dans les substrats amendés en bentonite. Par contre l'effet de la bentonite

est significatif sur le taux d'accumulation du plomb dans la partie racinaire et non significatif dans la partie aérienne (tableau 29 et 31, annexe).

Le test t de la comparaison des moyennes révèle une différence significative entre l'accumulation du plomb dans les parties aérienne et souterraine de l'*Atriplex halimus* L. dans les substrats amendés en bentonite.

b) Espèce *Atriplex canescens* L.

La figure 31 représente l'accumulation du plomb dans la partie aérienne et racinaire de la plante d'*Atriplex canescens* L. en fonction de l'intensité du stress métallique (0, 2000, 5000 et 10000 ppm) dans les substrats sableux amendés en bentonite (0, 7 et 10 %).

Tableau 23: Accumulation du plomb dans les parties aérienne et racinaire chez *Atriplex canescens* L. cultivée dans les substrats amendés en bentonite et stressées au plomb.

Dose de la bentonite (%)	Dose du plomb appliquée au sol (ppm)	Concentration du plomb dans la plante (ppm)	
		Partie aérienne	Partie racinaire
0	0	0	0
	2000	0,837	1,778
	5000	0,69	1,56
	10000	0,807	2,225
7	0	0	0
	2000	0,688	2,123
	5000	0,513	1,635
	10000	0,653	1,572
10	0	0	0
	2000	0,735	0,912
	5000	0,681	1,396
	10000	0,693	1,6

• À 0 % de bentonite

Les plantes cultivées dans les substrats traités à 0% de bentonite montrent que l'accumulation du plomb est nettement importante dans la partie racinaire comparativement à la partie aérienne. On note que la concentration du plomb de la partie aérienne est plus élevée chez les plantes stressées à 2000 ppm, soit 0,837 ppm (figure 31). Par contre la partie racinaire enregistre la teneur la plus élevée chez les plantes soumises à la dose de 10000 ppm de plomb avec une valeur de 2,225 ppm (tableau 23).

Le test t de la comparaison des moyennes de l'accumulation du plomb révèle une différence significative entre les deux parties aérienne et souterraine chez *Atriplex canescens* L. cultivée dans le substrat sableux sans bentonite.

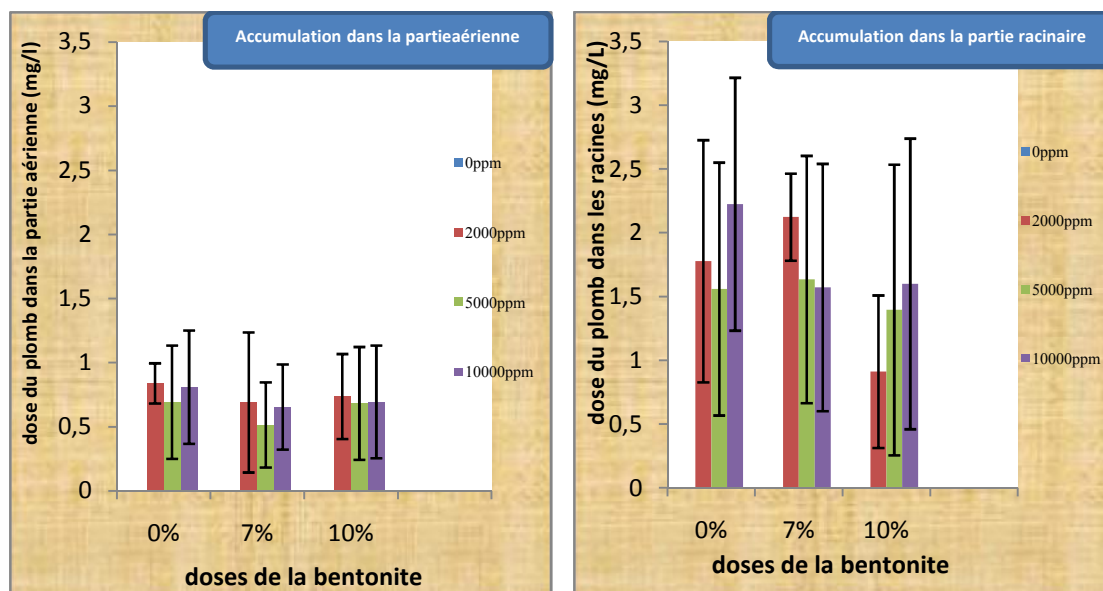


Fig. 31 : Effet combiné du plomb et de la bentonite sur la concentration du plomb dans les parties aérienne et racinaire d'*Atriplex canescens* L.

- **À 7 et 10 % de bentonite**

Comparativement aux plantes stressées au plomb et cultivées dans les substrats sableux sans bentonite, le taux d'accumulation du plomb est plus faible chez les plantes stressées au plomb et cultivées dans les substrats amendés en bentonite. On observe que l'accumulation du plomb dans la partie racinaire est plus élevée par rapport à la partie aérienne. On note que le taux d'accumulation du plomb le plus élevé de la partie aérienne est enregistré à la dose appliquée de 2000 ppm dans les deux substrats amendés à 7 et 10 % de bentonite avec des valeurs de 0,688 et 0,735 ppm respectivement (Tableau 23). En revanche chez la partie racinaire de la plante l'accumulation du plomb est plus importante dans les substrats amendés à 7 % de bentonite comparativement aux substrats traités à 10 % de bentonite.

L'analyse statistique de Student à P=5% montre que l'effet de la dose du plomb appliquée est hautement significatif sur le taux d'accumulation du plomb dans les parties aérienne et racinaire chez *Atriplex canescens* L. dans les substrats amendés en bentonite. Par contre l'effet dose de la bentonite est non significatif sur le taux d'accumulation du plomb dans les parties aérienne et racinaire de la plante (tableau 33 et 35, annexe).

Le test t de la comparaison des moyennes du taux d'accumulation du plomb révèle une différence significative entre les deux parties aérienne et souterraine chez *Atriplex canescens* L. dans les substrats sableux amendés en bentonite.

Discussion

L'étude de l'effet combiné du plomb et de la bentonite sur le taux d'accumulation du plomb dans les plantes montre pour :

- ***Atriplex halimus* L.**

- L'effet de la dose du plomb appliquée au sol est hautement significatif sur le taux d'accumulation du plomb dans les parties aérienne et racinaire de la plante.

- L'effet de la bentonite est significatif sur le taux d'accumulation du plomb dans la partie racinaire ($P=0,045$) et non significatif dans la partie aérienne de la plante.

- L'accumulation du plomb la plus élevée de la partie aérienne de la plante est obtenue à la dose de 5000 ppm de plomb dans les substrats amendés à 7 et 10% de bentonite.

- ***Atriplex canescens* L.**

- L'effet de la dose du plomb appliqué est hautement significatif sur le taux d'accumulation du plomb dans les parties aérienne et racinaire chez les plantes ($p < 0,001$).

- Par contre l'effet de la bentonite est non significatif sur le taux d'accumulation du plomb dans les parties aérienne et racinaire de la plante.

- Le taux d'accumulation le plus élevé du plomb dans la partie aérienne est enregistré chez les plantes stressées à la dose de 2000 ppm de plomb appliquée au sol.

- **Pour les deux espèces**

- L'accumulation du plomb dans la partie racinaire des plantes est nettement importante comparativement à celle de la partie aérienne. Le test t de la comparaison des moyennes d'accumulation du plomb entre la partie aérienne et la partie racinaire montre une différence significative dans le substrat témoin sans bentonite à la dose de 10000 ppm de plomb chez *Atriplex halimus* L. et une différence hautement significative dans les substrats amendés à 7 % de bentonite à la dose de 2000 ppm de plomb. Ces résultats sont confirmés par les travaux de **Seregin et al, 2004** ; Sharma et **Dubey, 2005** indiquant que chez la plupart des espèces, la majorité du plomb absorbé par les plantes réside dans les racines, et seulement une faible proportion est transloquée vers les parties aériennes de la plante.

- pour les deux espèces étudiées, le taux d'accumulation dans la partie racinaire est plus important chez les plantes stressées à la dose du plomb de 10000 ppm.
- Les racines des plantes cultivées dans les substrats amendés à 7 % de bentonite accumulent des teneurs plus importantes de plomb comparativement aux racines des plantes cultivées dans les substrats amendés à 10 % de bentonite. Selon Halilat et Tessier., 2006, la bentonite améliore les paramètres chimiques des sols sableux.
- D'après les résultats de l'analyse de la variance (seuil de probabilité de P= 5 %), l'effet espèce est non significatif sur le taux d'accumulation des partie aérienne et racinaire des plantes.
- Le test t de student de la comparaison des moyennes de taux d'accumulation du plomb dans la partie aérienne et racinaire d'*Atripilex halimus* L. et *canescens* L., au seuil d'une probabilité de 5% ne déclenche aucune différence significative entre les deux espèces étudiées, mais l'espèce *Atriplex halimus* L. accumule comme même une quantité importante par rapport à l'espèce *Atriplex canescens* L.

Conclusion générale

Discussion et conclusion générale

Le présent travail, a permis d'étudier les variations des teneurs en chlorophylles, en sucres solubles, le contenu relatif en eau et la biomasse fraîche et sèche des parties aérienne et racinaire des plantes de deux espèces d'*Atriplex* : *Atriplex halimus* et *Atriplex canescens* cultivées dans des substrats sableux amendés en bentonite, en fonction de l'intensité du stress au plomb appliquée à la plante.

L'étude de l'effet combiné de la bentonite et du plomb sur l'*Atriplex*, a permis de dégager les résultats essentiels suivants :

Pour *Atriplex halimus* L.

- La teneur en chlorophylle totale chez les plantes non stressées au plomb est la plus élevée par rapport à celle des plantes stressées.
- Le plomb provoque une perturbation de l'état physiologique des plantes traduite par une diminution de la teneur en chlorophylle totale chez *Atriplex halimus*L.
- Chez *Atriplex halimus* L. l'addition de 7 et 10% de bentonite provoque une diminution de la teneur en chlorophylle totale.
- La biomasse fraîche et sèche des parties aérienne et racinaire des plantes est généralement inférieure, par rapport aux plantes non stressées et cultivées dans les substrats sans bentonite,
 - Le poids sec des plantes stressées au plomb cultivées dans les substrats amendés à 7 % de bentonite augmente par rapport aux plantes non stressées cultivées dans le même substrat, ce qui explique l'effet positif de la dose de 7 % de bentonite sur le poids sec de l'*Atriplex halimus*.
- Le poids frais et sec de la partie aérienne des plantes stressées au plomb et cultivées dans les substrats traités à 10 % de bentonite diminue par rapport aux plantes non stressées cultivées dans les substrats témoins sans bentonite, ceci est dû à la dégradation des propriétés physico-chimiques du sol à la dose de 10% de bentonite.

Pour *Atriplex canescens* L.

- La teneur en chlorophylle totale dans les plantes cultivées dans les substrats sableux sans bentonite diminue au fur et à mesure que la dose du plomb appliquée augmente.
- En absence du plomb, les sols sableux amendés à 7% de bentonite ; améliore nettement les taux de chlorophylle totale chez *Atriplex canescens* L.

- La biomasse fraîche et sèche des parties aérienne et racinaire des plantes stressées est plus élevée comparativement aux plantes non stressées et cultivées dans les substrats sans bentonite, ce qui montre que l'espèce *Atriplex canescens* L. s'adapte mieux au milieu stressé au plomb par rapport à l'*Atriplex halimus* L.

- La biomasse végétale évaluée en poids frais et en poids sec des parties aérienne et racinaire des plantes stressées au plomb et cultivées dans les sols amendés à 7% de bentonite est largement plus importante que celle obtenue dans les substrats sableux amendés à 10% de bentonite.

- Des réductions notables de la biomasse végétale fraîche et sèche sont obtenues chez les plantes stressées et cultivées dans les substrats sableux amendés à 10 % de bentonite.

-L'accumulation du plomb dans la partie aérienne des plantes est plus élevée lors de l'application de 2000 ppm de plomb aux substrats de culture.

Pour les deux espèces

- Le taux des sucres solubles et la teneur relative en eau ne sont pas affectés par le stress au plomb appliqué à ces deux espèces d'*Atriplex*.

- Le bilan hydrique des plantes est nettement amélioré dans les substrats sableux non stressés et amendés à 7 % de bentonite.

- La biomasse fraîche et sèche de la partie aérienne est largement supérieure comparativement à la biomasse fraîche et sèche de la partie racinaire de la plante chez les deux espèces étudiées.

- La biomasse de la partie racinaire des plantes est la plus affectée par le plomb par rapport à celle de la partie aérienne.

- Le poids frais de la partie aérienne de la plante stressée au plomb augmente fortement dans les substrats sableux amendés à 7% de bentonite.

- L'accumulation du plomb dans la partie racinaire est largement supérieure que celle dans la partie aérienne chez les deux espèces étudiées.

- L'accumulation du plomb dans la partie racinaire est largement supérieure que dans la partie aérienne chez les deux espèces étudiées.

- L'accumulation du plomb au niveau des racines des plantes cultivées dans les substrats enrichis à 7% de bentonite est importante comparativement à celles cultivées dans les substrats amendés à 10 % de bentonite.

-L'accumulation du plomb dans la partie racinaire des plantes est plus élevée à la dose métallique de 10000ppm de plomb dans la majorité des substrats étudiés.

-La faible translocation du plomb des racines vers la partie aérienne de la plante, apparait comme un mécanisme important qui limite la toxicité du plomb chez ces deux espèces.

- L'application du stress métallique de 10000 ppm a révélé une bonne aptitude d'adaptation des deux espèces d'*Atriplex* étudiées. Ces résultats confirment qu'il existe très probablement un mécanisme efficace de tolérance à la surcharge métallique ; chez *Atriplex* dans ces milieux pollués en plomb.

Les résultats trouvés suggèrent que les deux espèces d'*Atriplex* peuvent être utilisées dans un système de dépollution des sols car elles possèdent des propriétés particulières de résistance naturelle à de nombreuses contraintes abiotiques.

Le passage à une culture sur sol pollué dans les conditions naturelles permettrait d'étudier les capacités d'*Atriplex* à extraire le plomb présent dans le sol.

Enfin, un tel travail ouvre de multiples perspectives qui consiste à développer notre recherche par l'étude et l'analyse électrophorétique des enzymes impliquées dans la réponse au stress métallique telles que les peroxydases, la cinétique et la dynamique d'accumulation des métaux chez les deux espèces étudiées.

Référence bibliographique

Références bibliographiques

- ◆ **Abbad, Cherkaoui, M., Walid, N., Elhadrami, A. et Bencahaabane, A. 2004.** Variabilités phénotypique et génotypique de trois populations naturelles d'*Atriplex halimus*. *C.R. Biologie, R. Biologie*, 327- :371-380.
- ◆ **Abrahams, P.W., 2002.** Soil : their implication to human health. *The Science of the total Environment* 291,1-32.
- ◆ **Ademe, 2003.** Guide méthodologique du plomb appliqué à la gestion des sites et des sols pollués.
- ◆ **Ademe, 2010.** Traitabilité des sols pollués. Guide méthodologique pour la sélection des techniques et l'évaluation de leurs performances.
- ◆ **Ademe, 2005.** Traitement biologique des sols pollués : recherche et innovation.
- ◆ **Adriano, D.C., 2001.** Trace element in the terrestrial environment Biochemistry, bioavailability and risks of metals. Springer-Verlag, New York, Berlin, Heidelberg.
- ◆ **Afshin Qishlaqi et Farid , 2007.** More Statistical Analysis of Accumulation and Sources of Heavy Metals Occurrence in Agricultural Soils of Khoshk River Banks, Shiraz, Iran. *American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci.*, 2 (5): 565-573, 2007. ISSN 1818-6769. IDOSI Publications, 2007
- ◆ **Alloway, B.J., 1995.** "Heavy metals in soils." Blackie Academic & Professional, London, 2nd Edition, 368 pp
- ◆ **Anonyme, 2004.** Phytoremédiation. CLEFS CEA - N° 49 - PRINTEMPS.
- ◆ **Anonyme^a, 2000** Introduction to Phytoremediation. EPA/600/R-99/107.
- ◆ **Arfaoui, A., Frini, N., et Sara, E., 2008.** Modelling of adsorption of the chromium ion modified clays. *J. Desalination*, 222:474- 481.
- ◆ **Auboiroux, M., Baillif, P., Touray, J.C. et Bergaya, F., 1996.** Fixation of Zn²⁺ Pb²⁺ by a Ca-montmorillonite, *J. Applied Clay Science*, 11:117-126.
- ◆ **Baize D., 1997.** Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France). Références et stratégies d'interprétation. INRA Éditions, Paris. 410 pp.
- ◆ **Baize, D., 2002.** Les éléments traces métalliques dans les sols. INRA éditions.
- ◆ **Balsberg Pålsson, A.M. 1989)** Toxicity of heavy metals (Zn, Cu, Cd, Pb) to vascular plants. *Water Air Soil Pollut* 47:287 – 319
- ◆ **Bazzaz, F.A., Rolfe, G.L., et Windle, P. 1974** Differing sensitive of corn and soybean photosynthesis and transpiration to lead contamination. *Journal of Environmental Quality* 3: 156-158

- ◆ **Belarbi, A. 2008.** Contribution à l'étude de réponse des métaux lourds (plomb et cuivre par l'Atriplex halimus L. Thèse de magister Université de Mostaganem.146P
- ◆ **Ben Ahmed, H., Zid, E.,M. El Gazzah,M. et C. Grignon,C. 1996.** Croissance et accumulation ionique chez *Atriplex halimus* L. *Cahiers "Agricultures", Vol. 5, numéro 5, pages 365-372, 9-10 1996 .*
- ◆ **Bendjama, 1982.** Bendjama Z. 1982- Sorption du mercure par des bentonites algériennes activées, Thèse de Magister en génie – Chimique, E.N.P.
- ◆ **Bendou, S., 2009.** Utilisation des argiles traitées pour la décoloration des bains de teinture. Thèse magister, option chimie Tannerie Université M'hamed Bougara Boumerdes.
- ◆ **Benkhelifa M., 2007.** Influence des conditions salines sur les propriétés physiques des Mélanges sable-bentonite. Conséquences sur le comportement écophysologique de la tomate (*Lycopersicum esculentum* Mill.). Thèse doctorat INA-EL Harrach Alger p 138-142
- ◆ **Bental., 2002.** Projet de développement de l'exploitation du gisement d'argiles bentonitiques de Mzila, Wilaya de Mostaganem, Algerie. Documentation BENTAL. Editions EIRéda. 20 p.
- ◆ **Bert, V., et Deram, A. 1999.** Guide des phytotechnologies : utilisation des plantes dans la dépollution et la réhabilitation des sites contaminés par les métaux lourds. Lille : Environnement et développement alternatif,1999, 154p
- ◆ **Bouchoukh.,2010.** Comportement écophysologique de deux Chénopodiacées des genres *Atriplex* et *Spinacia* soumises au stress salin. MEMOIRE de magistère en Biologie végétale Option : Ecophysologie et biotechnologie végétale Université Mentouri – Constantine N° d'ordre : 205/Mag/2010 N° de série : 009/SN/2010
- ◆ **Boumaaza B., 2011.** Effets de la salinité sur le comportement écophysologique et biochimique d'une culture de pois chiche (*Cicer arietinum*. L) au stade juvénile. Mémoire en Sciences Agronomiques Magister 109P , option systèmes de culture intégrés et gestion conservatoire
- ◆ **Bouras, 2003.** Propriétés adsorbantes d'argiles pontées organophiles : synthèse et caractérisation. Thèse doctorat, Discipline : *Chimie et Microbiologie de l'Eau*. Université de Limoges
- ◆ **Bradl et al, 2005 Bradl, H. Kim, C. Kramar, U. et Stüben, D. 2005.** Heavy Metals in the Environment *H.B. Bradl (editor) 2005 Elsevier Ltd. All rights reserved.*

- ◆ **Brooks, R.R., 1998.** Plants that hyperaccumulate heavy Metals.(ed) CBA international, Wallingford,UK,380pp
- ◆ **Burzynski, M. 1987** The influence of lead and cadmium on the absorption and distribution of potassium, calcium, magnesium and iron in cucumber seedlings. *Acta Physiologiae Plantarum* 9: 229-238.
- ◆ **Caillère, S., S. Hénin and M. Rautureau, 1982.**"Minéralogie des argiles" Masson, Tomes 1 et 2, 184p et 189p.
- ◆ **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 Doctorat Institut national polytechnique de Toulouse N° d'ordre : 2603
- ◆ **Cédric GIROUD, 2007.** Evaluation du risque pour l'environnement des métaux lourds issus du milieu urbain. Travail pratique de Master Université de Lausanne.
- ◆ **Chaîneau, C.H., Morel, J.L., Oudot, J. 2000.** Biodegradation of fuel oil hydrocarbons in the rhizosphere of maize. *Journal of Environmental Quality* 29, 569-578.
- ◆ **Chen, J., Zhu, C., Li, L.-p., Sun, Z.-y., Pan, X.-b., 2007.** Effects of exogenous salicylic acid on growth and H₂O₂-metabolizing enzymes in rice seedlings under lead stress. *Journal of Environmental Sciences* 19, 44-49.
- ◆ **Choukr-Allah,1997.** the potential of salt-tolerant plants for utilisation of saline water , Sér. A /n031, 1997 *Séminaires Méditerranéens*.
- ◆ **Cruz de Carvalho, M.H., 2008.** Drought stress and reactive oxygen species: Production, scavenging and signaling. *Plant Signaling & Behavior* 3: 156-165.
- ◆ **Chatterton, N.J. and McKell, C.M., 1969.** *Atriplex polycarpa* I. Germination and growth as affected by sodium chloride in water cultures. *Agron. J.* 61, 448-450.
- ◆ **DECHAMP C., MEERTS P. 2003.** La phytoremediation : Panacee pour l' environnementou menace pour la biodiversite ?, *Les Naturalistes belges*, n°82, pp. 135-148.
- ◆ **Engelthaler Z A et al., 1985.** l'explication industrielle complexe de la bentonite ONUDI, Pilsen, Tchecoslovaquie. 78p.
- ◆ **Engelthaler , Z. A. , Lostak ., 1983.** Production des métaux non ferreux et leur application dans l'agriculture. ONUDI, Pilsen, Tchecoslovaquie. 163p.

- ◆ **Ernst WHO, 1998.** Effects of heavy metals in plants at the cellular and organismic level. In GSaB Markert, ed, Ecotoxicology. J Wiley and Sons Inc and Spectrum Akademisher Verlag, p 587–620
- ◆ **Esteban.,2006.** Tolérance et accumulation des métaux lourds par la végétation spontanée des friches métallurgiques vers de nouvelles méthodes de bio-dépollution. Thèse de doctorat 157 P . Université Jean Monnet.
- ◆ **Eun, S.O., H.S. Youn and Y. Lee, 2000.** Lead disturb microtubule organization in the root meristem of *Zea mays*. *Physiol. Plant*, 110: 357-365.
- ◆ **Feret,B., 1992.** L'Interaction dans les systèmes montmorillonite/Carboxymethyl cellulose application aux fluides de forage,"Thèse de doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie
- ◆ **Flowers T.J., Hajibagheri M.A. and Clipsonn.C.W., 1977-** Halophytes. *Quarterly Review of Biology* 61, p. 313-337.
- ◆ **Francllet et Houérou, 1971.** Les *Atriplex* en Tunisie et en Afrique du Nord, 271 P
- ◆ **Garbisu, C. et Alkorta I., 2001.** Phytoextraction a costeffective plant-based technology for the removal of metals from the environment. *Biores. Tech.* 77: 229-236.
- ◆ **Garnier, R., 2005.** Toxicity of lead and lead compounds. *EMC-Toxicologie Pathologie* 2 (2005) 67–88.
- ◆ **Gérard MIQUEL, 2001.** Rapport sur les effets des métaux lourds sur l'environnement et la santé.
- ◆ **Gopal, R. and Rizvi, A.H., 2008.** "Excess lead alters growth, metabolism and translocation of certain nutrients in radish." *Chemosphere* 70(9): 1539-1544.
- ◆ **Grenet,1997.** Aspects microscopiques de la dégradation microbienne des tissus végétaux dans le rumen. *INRA Prod. Anim*, 10, 241-249 pp.
- ◆ **Haddioui, A., et Baaziz, M., 2001.** Genetic diversity of natural population of *Atriplex halimus* L. in morocco: An isoenzyme-based overview. *Euphytica*.121:99-106.
- ◆ **Halilat , M.T. et Tessier D.,2006-** Amélioration de la rétention en eau de matériau sableux par l'ajout de bentonite. *Cahiers Agricultures*, Vol. n°4, 347-353.
- ◆ **Hamel, 2009.** Absorption du chrome et du zinc par l'*Atriplex halimus* L. et leurs effets sur sa croissance cultivée en sol amendé en bentonite. Thèse magister Université de Mostaganem. Spécialité : Gestion conservatoire de la fertilité des sols et de l'eau.
- ◆ **Hare PD, Cress WA.** Metabolic implications of stress-induced proline accumulation in plants. *Plant Growth Regul* 1997;21: 79–102.

- ◆ **Haussling, M., Jorns, C.A., Lehmbecker, G., Hecht-Buchholz, C., Marschner, H., 1988.** Ion and water uptake in relation to root development of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst). *Journal of Plant Physiology* 133: 486-491
- ◆ **Henri-Charles, D., Daniel, P., Annabelle, D. et Catherine, L. 2001** LE phytomanagement Eléments de synthèse. Pôle de Compétence Sites et Sédiments Pollués. ISBN 2-9517290-0-6
- ◆ **Ilyin I., Travnikov, O., Ass, W. and Ugerud, H. Th., 2003.** Heavy metals: transboundary pollution of the environment. EMEP Status Report 2/2003. MSC-E, June, 2003. 40 pgs.
- ◆ **Iqbal, J., and Mushtaq, S., 1987.** "Effect of lead on germination, early seedling growth, soluble protein and acid phosphatase content in *Zea mays*." *Pakistan Journal of Scientific and Industrial Research* 30(11): 853-856.
- ◆ **Irfan Qureshi M., Israr, M., Abdin, M.Z. and M Iqbal 2005.** "Responses of *Artemisia annua* L. to lead and salt-induced oxidative stress." *Environmental and Experimental Botany* 53(2): 185-193.
- ◆ **Jacque THOHERZ, 2003 .** L'argile, minéral pluriel. *Bulletin de la Société Royal des Science de Liège, Vol.72,1, 2003, pp.19-70*
- ◆ **Jarvis, M.D., Leung, D.W.M., 2002** Chelated lead transport in *Pinus radiata*: an ultrastructural study. *Environmental and Experimental Botany* 48: 21-32.
- ◆ **Jean-Marie Kinet, Fatima Benrebaha, Sadok Bouzid, Sergio Lailhacar, Pierre Dutuit, 1998.** Le réseau *Atriplex*. Allier biotechnologies et écologie pour une sécurité alimentaire accrue en régions arides et semi-arides. *Cahiers Agricultures, Volume 7, Numéro 6, pages 505-9, Novembre-Décembre 1998.*
- ◆ **Jeannot , R., Lemièrre, B. et Chiron , 2001.** Guide méthodologique pour l'analyse des sols pollués.
- ◆ **Jemal, F. ,et Ghorbal, H.,2002.** la phytoremédiation. *Revue H.T. E. N° 122*
- ◆ **JOHN H. DUFFUS, 2002,** "Heavy metals"—A meaningless term? *Pure Appl. Chem.*, Vol. 74, No. 5, pp. 793–807, 2002.
- ◆ **Jozja, N., 2003.** Etude de matériaux argileux Albanais. Caractérisation "multi-échelle" d'une bentonite magnésienne. Impact de l'interaction avec le nitrate de plomb sur la perméabilité."Thèse de doctorat de l'Université d'Orléans.
- ◆ **Judicaëlle, B., 2008.** Adaptation aux métaux lourds d'une Fabacée (légumineuse) : Réponses phénologique et moléculaire au plomb du *Lathyrus sativus* L. *Thèse doctorat Université Paris Est.*

- ◆ **Kacabova, P and Natr, L. 1986.** "Effect of lead on growth characteristics and chlorophyll content in barley seedlings." *Photosynthetica* 20(4): 411-417.
- ◆ **Kadukova, J., Papadontonakis, N., Naxakis, G. et kalogevakis. N, 2004.** Lead accumulation by the salt-tolerant plant *Atriplex halimus*. *Protection*.
- ◆ **Kelley, B.D., Goodin, J.R et Miller, D.R. 1982.** Biology of *Atriplex*. In : Contribution to the ecology of Halophytes Ed. Dr W. Junk, London, pp. 79-107.
- ◆ **Kopittke PM., Colin JA., Kopittke RA., Menzies NW., 2007.** Toxic effects of Pb²⁺ on growth of cowpea (*Vigna unguiculata*). *Environmental Pollution*, in press.
- ◆ **Kosobrukhov, A., Knyazeva, I. and Mudrik, V. 2004.** "Plantago major plants responses to increase content of lead in soil: Growth and photosynthesis." *Plant Growth Regulation* 42: 145-151.
- ◆ **Kozaki, A., Takeba, G. 1996.** Photorespiration protects C₃ plants from photooxidation. *Nature* 384: 557-560.
- ◆ **Krause, G.H., 1994.** The role of oxygen in photo-inhibition of photosynthesis. In MP Foyer CH, ed, Causes of photo-oxidative stress and amelioration of defense systems in plants. CRC Press, Boca Raton, p 43–76.
- ◆ **Kuperberg, 2002.** "Lead distribution in corn seedlings (*Zea mays* L.) and its effect on growth and the concentrations of potassium and calcium." *Plant Growth Regulation* 37(1): 69-76.
- ◆ **Lamhamdi, M., Bakrim, A., Aarab, A., Lafon, R. et Sayah, F. 2010.** Lead phytotoxicity on wheat (*Triticum aestivum* L.) seed germination and seedlings growth. *Elsevier Masson SAS. C. R. Biologies* 334 (2011) 118–126
- ◆ **Le Houérou, H.N., 1996.** The role of cacti (*Opuntia sp.*) in erosion control, land reclamation, and agricultural development in the Mediterranean Basin. *Journal of Arid Environment*, 33: 135-159.
- ◆ **Le Houérou, H.N 1992.** The role of saltbushes (*Atriplex spp*) in arid lands rehabilitation in the Mediterranean basin. A review. *Agroforestry systems*.18:107-148
- ◆ **Luckham, P. F. and S. Rossi, 1999.** "Colloidal and rheological properties of bentonite suspensions" *Adv. Colloid Interface Sci.* 82, 43-92.
- ◆ **Lutts, S., Lefevre, I., Delperee, C., Kivits, S., Dechamps, C., Rebledo, A. et Correal, E., 2004.** Heavy metals accumulation by the halophyte species Mediterranean saltbush. *J. Enviro. Qual.* 33(4):1271-1279

- ◆ **Malecka, A., Jarmuszkiewicz, W., Tomaszewska, B. 2001.** Antioxidative defense to lead stress in subcellular compartments of pea root cells. *Acta Biochimica Polonica* 48:687-698
- ◆ **Malkowski, E., Kita, A., Galas, W., Karcz, W., and Kuperberg, J.M., 2002.** "Lead distribution in corn seedlings (*Zea mays* L.) and its effect on growth and the concentrations of potassium and calcium." *Plant Growth Regulation* 37(1): 69-76.
- ◆ **Marc Verloo, 2003.** Les métaux lourds dans les denrées alimentaires :origine et évolution des teneurs. Symposium "Les oligo-éléments dans l'alimentation en Belgique - Données récentes" Institut Danone
- ◆ **Marschner, H., 1995.** Mineral Nutrition of Higher Plants, San Diego.
- ◆ **McFarland, M.L., Ueckert, D., Hons, F.M. et Hartmann, S. 1994.** Selective-placement burial of drilling fluids : effects on soil properties, buffalograss and fourwing salt-bush after 4years . *J.Range Managem.* 47,475-480.
- ◆ **Messaili, 1995.** Systématique des spermaphytes. Office des publications universitaire, 91 pp.
- ◆ **Mukesh, K. Raikwar, Puneet Kumar, Manoj Singh et Anand, 2008.** Singh Toxic effect of heavy metals in livestock health. Indian Veterinary Research Institute Izatnagar - 243 122, Bareilly (U.P.) *Veterinary World, Vol.1(1):28-30.*
- ◆ **Mulas , M. et Mulas, G. 2004.** Potentialités d'un stratégie des plantes des Genres *Atriplex* et *Opuntia* dans la lutte contre la désertification. Short and Medium- Term Environmental Action Programme (SMAP) février 2004. P 9-23; 38-54.
- ◆ **NAKIB LYDIA, 2006.** Mise au point d'une technique d'extraction des éléments traces métalliques dans les produits de la mer et leurs dosages par spectrophotométrie d'absorption atomique. Magister en médecine vétérinaire, Université Mentouri de Constantine.
- ◆ **Nefzaoui et Chermiti, 1991.** Place et rôle des arbustes fourragers dans les parcours des zones arides et semi-arides de la Tunisie.
- ◆ **Obroucheva, N.V., Bystrova, E.I., Ivanov, V.B., Antipova, O.V. and Seregin, I.V. 1998.** "Root growth responses to lead in young maize seedlings." *Plant and Soil* 200: 55-61.
- ◆ **Patra, M., Bhowmik, N., Bandopadhyay, B., Sharma, A.,** Comparison of mercury, lead and arsenic with respect to genotoxic effects on plant systems and the development of genetic tolerance. *Environ Exp Bot* 2004; 52: 199-223.
- ◆ **Pichard, A., 2002.** Plomb et ses dérivés. Fiche INERIS.

- ◆ **Picot, A ., 2003.** Intoxication de l'organisme par les métaux lourds et outre toxique le mercure, le plomb et le cadmium trois métaux traces toxiques Conférence ADNO 2003 Directeur Honoraire CNRS, Gif/Yvette Paris pp2-13
- ◆ **Pierre Dutuit, 1999.** Etude de la diversité biologique de l'*Atriplex halimus* par le repérage in vitro et in vivo d'individus résistants à des conditions extrêmes du milieu et constitution de clones. *Université de Paris –sud .CTA Contrat TS 3.CT94.264 :138-141.*
- ◆ **Pilon-Smits, E. 2005.** Phytoremediation. *Annual Review of Plant Biology* 56: 15-39
- ◆ **Potters, G., Pasternak, T.P., Guisez, Y., Palme, K.J., Jansen, M.A.K., 2007.** Stress-induced morphogenic responses: growing out of trouble? *Trends in Plant Science* 12: 98-105
- ◆ **Pourrat, Y. Dutuit, P. 1994.** Etude précoce des effets morphologiques et physiologiques du rapport sodium/calcium in vitro sur une population d'*Atriplex halimus*. Ed. AUPELF-UREF. John Libbey Eurotext. Paris 0 1994, pp. 2X3-295.
- ◆ **Pourrut Bertrand ,2008.** Implication du stress oxydatif dans la toxicité du plomb sur une plante modèle, *Vicia faba* . Thèse Doctorat *Institut National Polytechnique de Toulouse .Discipline ou spécialité : Ecotoxicologie.*
- ◆ **Prabha, K. Padmavathiamma and Loretta, Y. Li. 2007.** Phytoremediation Technology: Hyper-accumulation Metals in Plants. *Water Air Soil Pollut.* 184, 105–126.
- ◆ **Purvis, A.C., 1997.** Role of the alternative oxidase in limiting superoxide production by plant mitochondria. *Physiologia Plantarum* 100: 165-170
- ◆ **Rashid, A., Camm, E.L., Ekramoddoullah, K.M. 1994.** Molecular mechanism of action of Pb and Zn²⁺ on water oxidizing complex of photosystem II. *FEBS Letters* 350: 296-298
- ◆ **Reguig Yssaad. H A M. Belkhodja., 2008.** Effet de la bentonite sur l'azote assimilable d'un sol sableux cultivé en céréale et en légumineuse. *Sciences & technologies c – n°28* pp.53-58.
- ◆ **Rosas, M.R. 1989.** El genero *Atriplex (Chenopodiaceae)* en Chile. *Gayana Bot.*, 46 (1-2):3-82.
- ◆ **Rufus, L.C., Minnie, M., Yin, M.L., Sally, L.B., Eric P.B., Scott-Angle J., and Alan, J.M.B. 1997.** Phytoremediation of soil metals. *Current Opinion in Biotechnology* 8, 279-284.

- ◆ **Salt, D.E., Smith, R.D. et Raskin, I., 1998.** Les mécanismes de la phytoaccumulation cellulaire . La phytotolérance chez les plantes hyperaccumulatrice. *Annu. Rev. Plants physiol.* 643-668.
- ◆ **Seghairi N., 2004.** Possibilités de rétention des matières organiques par adsorption sur la bentonite, Thèse de Magister en Sciences Hydrauliques, Université de Biskra, 134 p.
- ◆ **Seregin, I.V., and Ivanov, V., 1997.** "Histochemical Investigation of Cadmium and Lead Distribution in Plants." *Russian Journal of Plant Physiology* 44(6): 791-796.
- ◆ **Seregin, I.V., Ivaniov, V.B.,2001.** Physiological aspects of cadmium and lead toxic effects on higher plants. *Russian Journal of Plant Physiology* 48: 606-630.
- ◆ **Sharma, P. and Dubey, R.S., 2005.** Lead toxicity in plants. *Braz. J. Plant Physiol.*, 17: 35-52
- ◆ **Sigg J., 1991.** Les produits de terre cuite. Editions Septima, Paris, France. 448p.
- ◆ **Somerville, C., Browse, J., Jaworski, J.G., Ohlrogge, J.B. 2000.** Lipids. In GW Buchanan BB, Jones RL, ed, *Biochemistry and molecular biology of plants.* American Society of Plant Physiologists, Rockville, p 456–527.
- ◆ **Sposito, G., Lund, L.J. and Chang, A.C. 1982.** "Trace Metal Chemistry in Arid-zone Field Soils Amended with Sewage Sludge: I. Fractionation of Ni, Cu, Zn, Cd, and Pb in Solid Phases." *Soil Science Society American Journal* 46(2): 260-264.
- ◆ **Stefanov, K., Seizova, K., Popova, I., Petkov, V.L., Kimenov. G., Popov, S. 1995.** Effects of lead ions on the phospholipid composition in leaves of *Zea mays* and *Phaseolus vulgaris*. *Journal of Plant Physiology* 147: 243-246.
- ◆ **Stiborova, M., Doubravova, M., Brezinova, A. and F A. 1986.** "Effect of heavy metal ions on growth and biochemical characteristics of photosynthesis of barley (*Hordeum vulgare* L.)." *Photosynthetica* 20(4): 418-425.
- ◆ **Tadros, T. F., 1996.** Correlation of viscoelastic properties of stable and flocculated suspensions with their antiparticle interactions" *Adv. Colloïde Interface Sci.* 68, 97-200.
- ◆ **Thi My Dung HUYNH,2009.** Impacts des métaux lourds sur l'interaction plante/ ver de terre/ microflore tellurique. Thèse de Doctorat. Université Paris Est.
- ◆ **Touret, C. et Vestier, D. (1990).** « Propriétés électrocinétiques des argiles Applications ». Dans *Propriétés des petites particules*, p. 205–209
- ◆ **Vallee, B.L., Ulmer, D.D., 1972.** Biochemical effects of mercury, cadmium and lead. *Annual Review of Biochemistry* 41(1): 91-128.

- ◆ **Van Assche, F., Clijsters, H., 1990** Effects of metal on enzyme activity in plants. *Plant, Cell & Environment* 13: 195-206
- ◆ **Vanobberghen, 2010**
- ◆ **Verma, S., Dubey, R.S., 2003.** Lead toxicity induces lipid peroxidation and alters the activities of antioxidant enzymes in growing rice plants. *Plant Science* 164, 645-655.
- ◆ **Vickerman, D.B. Shannon, M.C., Banuelos, G.S., Gerieve, C.M. et Trumble, J.T. 2002.** Evaluation of *Atriplex* lines for selenium accumulation, salt tolerance and suitability for a key agricultural insect pest. *Environ. Pollut.* 120:463-473
- ◆ **Vodnik, D., Jentschke, G., Fritz, E., Gogala, N. and Godbold, D.L., 1999.** "Root-applied cytokinin reduces lead uptake and affects its distribution in norway spruce seedlings." *Physiologia Plantarum* 106(1): 75-81.
- ◆ **Vogel-milkus, Damjana Drobne and Majana Regvar, (2005).** Zn, Cd and Pb accumulation and arbuscular mycorrhizal colonisation of pennycress *Thlaspi praecox* Wulf. (Brassicaceae) from the vicinity of a lead mine and Smelter in Slovenia.
- ◆ **Voorhees M.E, 1990.** Forage quality of rillscale (*Atriplex suckleyi*) grown on amended bentonite mine spoil. *Great Basin Naturalist* 50,57-62.
- ◆ **Voorhees, M.E., Uresk, D.W et Trlica, M.J 1991.** Substrate relations for rillscale (*Atriplex suckleyi*) on bentonite mine soil. *J. Range Manage.* 44:34-38.
- ◆ **Watson, M.C., G.S. Banuelos, and J.J Riley. 1994.** Trace element.
- ◆ **Vranova, E., Inze, D., Van Breusegem, F., 2002.** Signal transduction during oxidative stress. *Journal of Experimental Botany* 53: 1227-1236
- ◆ **Wang, L., Smac, D.A., Shapir, N., Wackett, L.P., Vance, C.P., Olszewski, N.F., et Sadowsky, M.J 2003.** Biodegradation of atrazine in transgenic plants expressing a modified bacterial atrazine chlorohydrolase (*atzA*) gene. *Plants Biotechnology Journal* 3,475-486.
- ◆ **Wierzbicka, M., 1989.** "Disturbances in cytokinesis caused by inorganic lead." *Environmental and Experimental Botany* 29(2): 123-133.
- ◆ **William, F. et Patricia, R., 1994.** Dépistage de l'exposition au plomb chez les enfants au Canada.
- ◆ **Wozny, A., Jereczynska, E., 1991.** The effects of lead on early stages of *Phaseolus vulgaris* L. growth in vitro conditions. *Biologica Plantarum* 33: 32-39.
- ◆ **Wozny, A., Schneider, J. and EA Gwozdz 1995.** "The effects of lead and kinetin on greening barley leaves." *Biologia Plantarum* 37(4): 541-552.

◆ **Youcef L., Achour S. ,2005.**Elimination des phosphates par des procédés physico-chimiques, Larhyss Journal, ISSN 1112-3680.

Annexe

Analyse de la variance à deux facteurs contrôlés (Stat Box 6.40).

Tableau 1 : Analyse de variance de l'effet combinée de la bentonite et du plomb sur la teneur en **chlorophylle a** d'*Atriplex halimus* L.

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	0,045	59	0,001			0,023	23,18 %
VAR.FACTEUR 1	0,015	2	0,008	14,439	0,00002		
VAR.FACTEUR 2	0,003	3	0,001	1,766	0,16472		
VAR.INTER F1*2	0,002	6	0	0,544	0,77347		
VAR.RESIDUELLE E 1	0,025	48	0,001				

Tableau 2 : Comparaisons de moyennes pour le paramètre teneur en **chlorophylle a** d'*Atriplex halimus* L. Newman-Keuls - seuil = 5%

NOMBRE DE MOYENNES		2	3
VALEURS DES PPAS		0,015	0,018
Bentonite	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES
3.0	0 %	0,114	A
2.0	7 %	0,106	A
1.0	10 %	0,077	B

Tableau 3 : Analyse de variance de l'effet combinée de la bentonite et du plomb sur la teneur en **chlorophylle b** d'*Atriplex halimus* L.

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	0,089	59	0,002			0,031	18,88%
VAR.FACTEUR 1	0,03	2	0,015	15,429	0,00001		
VAR.FACTEUR 2	0,007	3	0,002	2,412	0,07711		
VAR.INTER F1*2	0,005	6	0,001	0,91	0,4968		
VAR.RESIDUELLE 1	0,047	48	0,001				

Tableau 2 : Comparaisons de moyennes pour le paramètre teneur en **chlorophylle b** d'*Atriplex halimus* L. Newman-Keuls - seuil = 5%

NOMBRE DE MOYENNES		2	3
VALEURS DES PPAS		0,02	0,024
Bentonite	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES
1.0	0 %	0,185	A
2.0	7 %	0,178	A
3.0	10 %	0,134	B

Tableau 4 : Analyse de variance de l'effet combinée de la bentonite et du plomb sur la teneur en **chlorophylle totale** d'*Atriplex halimus* L.

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	0,244	59	0,004			0,051	19,34%
VAR.FACTEUR 1	0,088	2	0,044	16,789	0,00001		
VAR.FACTEUR 2	0,018	3	0,006	2,335	0,08441		
VAR.INTER F1*2	0,012	6	0,002	0,76	0,60631		
VAR.RESIDUELLE 1	0,126	48	0,003				

Tableau 5: Comparaisons de moyennes pour le paramètre teneur en **chlorophylle totale** d'*Atriplex halimus* L. Newman-Keuls - seuil = 5%

NOMBRE DE MOYENNES		2	3
VALEURS DES PPAS		0,015	0,018
Bentonite	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES
1.0	0 %	0,299	A
2.0	7 %	0,284	A
3.0	10 %	0,211	B

Tableau 6 Analyse de variance de l'effet combinée de la bentonite et du plomb sur la teneur en **chlorophylle a** d'*Atriplex canescens* L.

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	0,164	59	0,003			0,047	34,51%
VAR.FACTEUR 1	0,007	2	0,004	1,668	0,19756		
VAR.FACTEUR 2	0,012	3	0,004	1,842	0,15059		
VAR.INTER F1*2	0,038	6	0,006	2,811	0,01998		
VAR.RESIDUELLE 1	0,107	48	0,002				

Tableau 7 :: Comparaisons de moyennes pour le paramètre teneur en **chlorophylle a** d'*Atriplex canescens* L. Newman-Keuls - seuil = 5%

F1 F2	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES	
2.0 1.0	F1n2 F2n1	0,19	A	
2.0 3.0	F1n2 F2n3	0,18	A	
3.0 2.0	F1n3 F2n2	0,175	A	B
3.0 1.0	F1n3 F2n1	0,155	A	B
1.0 2.0	F1n1 F2n2	0,131	A	B
1.0 3.0	F1n1 F2n3	0,13	A	B
1.0 1.0	F1n1 F2n1	0,125	A	B
2.0 2.0	F1n2 F2n2	0,123	A	B
3.0 4.0	F1n3 F2n4	0,122	A	B
1.0 4.0	F1n1 F2n4	0,118	A	B
2.0 4.0	F1n2 F2n4	0,115	A	B
3.0 3.0	F1n3 F2n3	0,077		B

Tableau 8 : Analyse de variance de l'effet combinée de la bentonite et du plomb sur la teneur en **chlorophylle b** d'*Atriplex canescens* L.

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	0,419	59	0,007			0,076	38,37%
VAR.FACTEUR 1	0,021	2	0,01	1,801	0,1741		
VAR.FACTEUR 2	0,066	3	0,022	3,859	0,01488		
VAR.INTER F1*2	0,057	6	0,01	1,669	0,14848		
VAR.RESIDUELLE 1	0,275	48	0,006				

Tableau 9: Comparaisons de moyennes pour le paramètre teneur en **chlorophylle b** d'*Atriplex canescens* L. Newman-Keuls - seuil = 5%

NOMBRE DE MOYENNES		2	3	4
VALEURS DES PPAS		0,056	0,067	0,074
Bentonite	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES	
1.0	F2n1	0,244	A	
2.0	F2n2	0,213	A	B
3.0	F2n3	0,172		B
	F2n4	0,16		B

Tableau 10 : Analyse de variance de l'effet combinée de la bentonite et du plomb sur la teneur en **chlorophylle totale** d'*Atriplex canescens* L.

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	1,06	59	0,018			0,12	36,05%
VAR.FACTEUR 1	0,045	2	0,022	1,55	0,22126		
VAR.FACTEUR 2	0,135	3	0,045	3,106	0,03461		
VAR.INTER F1*2	0,184	6	0,031	2,12	0,06766		
VAR.RESIDUELLE 1	0,695	48	0,014				

Tableau 11: Comparaisons de moyennes pour le paramètre teneur en **chlorophylle totale** d'*Atriplex canescens* L. Newman-Keuls - seuil = 5%

Bentonite	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES	
1.0	F2n1	0,4	A	
2.0	F2n2	0,356	A	B
3.0	F2n3	0,302	A	B
4.0	F2n4	0,278		B

Tableau 12 Analyse de variance de l'effet combinée de la bentonite et du plomb sur la teneur en sucres solubles d'*Atriplex halimus* L.

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	197,752	59	3,352			1,768	49,72%
VAR.FACTEUR 1	2,866	2	1,433	0,458	0,64061		
VAR.FACTEUR 2	17,534	3	5,845	1,869	0,1459		
VAR.INTER F1*2	27,266	6	4,544	1,453	0,21371		
VAR.RESIDUELLE 1	150,086	48	3,127				

Tableau 13 Analyse de variance de l'effet combinée de la bentonite et du plomb sur la teneur en sucres solubles d'*Atriplex canescens* L.

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	13,746	59	0,233			0,5	17,70%
VAR.FACTEUR 1	0,508	2	0,254	1,016	0,37139		
VAR.FACTEUR 2	0,394	3	0,131	0,526	0,67074		
VAR.INTER F1*2	0,841	6	0,14	0,56	0,76122		
VAR.RESIDUELLE 1	12,003	48	0,25				

Tableau 14 : Analyse de variance de l'effet combinée de la bentonite et du plomb sur la teneur relative en eau d'*Atriplex halimus* L.

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	5264,106	59	89,222			9,638	12,20%
VAR.FACTEUR 1	167,59	2	83,795	0,902	0,41505		
VAR.FACTEUR 2	90,325	3	30,108	0,324	0,81016		
VAR.INTER F1*2	547,808	6	91,301	0,983	0,44788		
VAR.RESIDUELLE 1	4458,383	48	92,883				

Tableau 15 : Analyse de variance de l'effet combinée de la bentonite et du plomb sur la teneur relative en eau d'*Atriplex canescens* L.

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	1778,432	59	30,143			5,823	7,55 %
VAR.FACTEUR 1	14,015	2	7,007	0,207	0,81605		
VAR.FACTEUR 2	18,122	3	6,041	0,178	0,91044		
VAR.INTER F1*2	118,792	6	19,799	0,584	0,74306		
VAR.RESIDUELLE E 1	1627,503	48	33,906				

Tableau 16 : Analyse de variance de l'effet combinée de la bentonite et du plomb sur la biomasse fraîche de la partie aérienne d'*Atriplex halimus* L.

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	108,909	59	1,846			1,248	17,53%
VAR.FACTEUR 1	3,284	2	1,642	1,054	0,35787		
VAR.FACTEUR 2	11,496	3	3,832	2,459	0,07303		
VAR.INTER F1*2	19,32	6	3,22	2,066	0,07435		
VAR.RESIDUELLE 1	74,808	48	1,559				

Tableau 17 : Analyse de variance de l'effet combinée de la bentonite et du plomb sur la biomasse fraîche de la partie racinaire d'*Atriplex halimus* L.

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	29,4	59	0,498			0,56	47,26%
VAR.FACTEUR 1	8,646	2	4,323	13,804	0,00003		
VAR.FACTEUR 2	1,185	3	0,395	1,262	0,29783		
VAR.INTER F1*2	4,536	6	0,756	2,414	0,04026		
VAR.RESIDUELLE 1	15,033	48	0,313				

Tableau 18 : Comparaisons de moyennes pour le paramètre biomasse fraîche de la partie racinaire d'*Atriplex halimus* L. Newman-Keuls - seuil = 5%

NOMBRE DE MOYENNES		2	3
VALEURS DES PPAS		0,356	0,428
Bentonite	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES
1.0	F1n1	1,719	A
2.0	F1n2	0,957	B
3.0	F1n3	0,877	B

Tableau 19 : Analyse de variance de l'effet combinée de la bentonite et du plomb sur la biomasse fraîche de la partie aérienne d'*Atriplex canescens* L.

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	175,475	59	2,974			1,428	30,70%
VAR.FACTEUR 1	40,128	2	20,064	9,841	0,00031		
VAR.FACTEUR 2	3,308	3	1,103	0,541	0,66056		
VAR.INTER F1*2	34,175	6	5,696	2,794	0,0206		
VAR.RESIDUELLE 1	97,865	48	2,039				

Tableau 20 : Comparaisons de moyennes pour le paramètre biomasse fraîche de la partie aérienne d'*Atriplex canescens* L. Newman-Keuls - seuil = 5%

NOMBRE DE MOYENNES		2	3
VALEURS DES PPAS		0,908	1,092
Bentonite	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES
1.0	F1n1	5,805	A
2.0	F1n2	4,145	B
3.0	F1n3	4,004	B

Tableau 21 : Analyse de variance de l'effet combinée de la bentonite et du plomb sur la biomasse fraîche de la partie racinaire d'*Atriplex canescens* L.

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	6,891	59	0,117			0,31	64,15%
VAR.FACTEUR 1	0,449	2	0,224	2,329	0,10629		
VAR.FACTEUR 2	1,137	3	0,379	3,932	0,01372		
VAR.INTER F1*2	0,677	6	0,113	1,171	0,3376		
VAR.RESIDUELLE 1	4,627	48	0,096				

Tableau 22 : Comparaisons de moyennes pour le paramètre biomasse fraîche de la partie racinaire d'*Atriplex canescens* L. Newman-Keuls - seuil = 5%

NOMBRE DE MOYENNES		2	3	4
VALEURS DES PPAS		0,228	0,274	0,302
plomb	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES	
4.0	F2n4	0,679	A	
3.0	F2n3	0,487	A	B
2.0	F2n2	0,479	A	B
1.0	F2n1	0,29		B

Tableau 23 : Analyse de variance de l'effet combinée de la bentonite et du plomb sur la biomasse sèche de la partie aérienne d'*Atriplex halimus* L.

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	11,742	59	0,199			0,414	23,56 %
VAR.FACTEUR 1	0,578	2	0,289	1,684	0,19457		
VAR.FACTEUR 2	0,202	3	0,067	0,393	0,76173		
VAR.INTER F1*2	2,719	6	0,453	2,639	0,05703		
VAR.RESIDUELL E 1	8,242	48	0,172				

Tableau 24 : Analyse de variance de l'effet combinée de la bentonite et du plomb sur la biomasse sèche de la partie racinaire d'*Atriplex halimus* L.

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	1,468	59	0,025			0,15	53,33%
VAR.FACTEUR 1	0,097	2	0,048	2,149	0,12556		
VAR.FACTEUR 2	0,048	3	0,016	0,72	0,54847		
VAR.INTER F1*2	0,245	6	0,041	1,821	0,11411		
VAR.RESIDUELLE 1	1,078	48	0,022				

Tableau 25 : Analyse de variance de l'effet combinée de la bentonite et du plomb sur la biomasse sèche de la partie aérienne d'*Atriplex canescens* L.

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	14,616	59	0,248			0,394	36,00%
VAR.FACTEUR 1	3,044	2	1,522	9,802	0,00032		
VAR.FACTEUR 2	0,348	3	0,116	0,748	0,53215		
VAR.INTER F1*2	3,772	6	0,629	4,049	0,00238		
VAR.RESIDUELLE 1	7,452	48	0,155				

Tableau 26 : Comparaisons de moyennes pour le paramètre biomasse sèche de la partie aérienne d'*Atriplex canescens* L. Newman-Keuls - seuil = 5%

NOMBRE DE MOYENNES		2	3
VALEURS DES PPAS		0,251	0,301
Bentonite	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES
2.0	F1n2	1,406	A
3.0	F1n3	0,997	B
1.0	F1n1	0,88	B

Tableau 27 : Analyse de variance de l'effet combinée de la bentonite et du plomb sur la biomasse sèche de la partie racinaire d'*Atriplex canescens* L.

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	0,411	59	0,007			0,072	56,71%
VAR.FACTEUR 1	0,041	2	0,02	3,885	0,02676		
VAR.FACTEUR 2	0,055	3	0,018	3,498	0,02224		
VAR.INTER F1*2	0,065	6	0,011	2,058	0,07546		
VAR.RESIDUELLE 1	0,251	48	0,005				

Tableau 28 Comparaisons de moyennes pour le paramètre biomasse sèche de la partie racinaire d'*Atriplex canescens* L. Newman-Keuls - seuil = 5%

NOMBRE DE MOYENNES		2	3
VALEURS DES PPAS		0,046	0,055
Bentonite	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES
2.0	F1n2	0,164	A
3.0	F1n3	0,114	B
1.0	F1n1	0,105	B

Tableau 29 : Analyse de variance de l'effet combinée de la bentonite et du plomb sur l'accumulation du plomb dans la partie aérienne d'*Atriplex halimus* L.

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	19,294	59	0,327			0,475	83,23%
VAR.FACTEUR 1	0,132	2	0,066	0,292	0,75186		
VAR.FACTEUR 2	7,103	3	2,368	10,48	0,00003		
VAR.INTER F1*2	1,215	6	0,203	0,897	0,50619		
VAR.RESIDUELLE 1	10,844	48	0,226				

Tableau 30 : Comparaisons de moyennes pour l'accumulation du plomb dans la partie aérienne d'*Atriplex halimus* L. Newman-Keuls - seuil = 5%

NOMBRE DE MOYENNES		2	3	4
VALEURS DES PPAS		0,349	0,42	0,462
PLOMB	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES	
4.0	F2n3	0,867	A	
3.0	F2n4	0,814	A	
2.0	F2n2	0,604	A	
1.0	F2n1	0		B

Tableau 31 : Analyse de variance de l'effet combinée de la bentonite et du plomb sur l'accumulation du plomb dans la partie racinaire d'*Atriplex halimus* L.

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	95,229	59	1,614			1,042	89,13%
VAR.FACTEUR 1	7,099	2	3,549	3,27	0,04553		
VAR.FACTEUR 2	31,841	3	10,614	9,78	0,00005		
VAR.INTER F1*2	4,194	6	0,699	0,644	0,69624		
VAR.RESIDUELLE 1	52,095	48	1,085				

Tableau 32 : Comparaisons de moyennes pour l'accumulation du plomb dans la partie racinaire d'*Atriplex halimus* L. Newman-Keuls - seuil = 5%

NOMBRE DE MOYENNES		2	3	4
VALEURS DES PPAS		0,765	0,92	1,012
PLOMB	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES	
4.0	F2n4	1,965	A	
3.0	F2n3	1,518	A	
2.0	F2n2	1,192	A	
1.0	F2n1	0		B

Tableau 33 : Analyse de variance de l'effet combinée de la bentonite et du plomb sur l'accumulation du plomb dans la partie aérienne d'*Atriplex canescens* L.

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	16,258	59	0,276			0,466	88,76%
VAR.FACTEUR 1	0,144	2	0,072	0,332	0,72374		
VAR.FACTEUR 2	5,63	3	1,877	8,655	0,00013		
VAR.INTER F1*2	0,077	6	0,013	0,059	0,99		
VAR.RESIDUELLE 1	10,408	48	0,217				

Tableau 34 : Comparaisons de moyennes pour l'accumulation du plomb dans la partie aérienne d'*Atriplex canescens* L. Newman-Keuls - seuil = 5%

NOMBRE DE MOYENNES		2	3	4
VALEURS DES PPAS		0,342	0,411	0,453
PLOMB	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES	
2.0	F2n2	0,753	A	
4.0	F2n4	0,718	A	
3.0	F2n3	0,628	A	
1.0	F2n1	0		B

Tableau 35 : Analyse de variance de l'effet combinée de la bentonite et du plomb sur l'accumulation du plomb dans la partie racinaire d'*Atriplex canescens* L.

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	72,849	59	1,235			0,871	70,64%
VAR.FACTEUR 1	2,006	2	1,003	1,321	0,27582		
VAR.FACTEUR 2	31,006	3	10,335	13,614	0		
VAR.INTER F1*2	3,396	6	0,566	0,745	0,61753		
VAR.RESIDUELLE 1	36,441	48	0,759				

Tableau 36 : Comparaisons de moyennes pour l'accumulation du plomb dans la partie racinaire d'*Atriplex canescens* L. Newman-Keuls - seuil = 5%

NOMBRE DE MOYENNES		2	3	4
VALEURS DES PPAS		0,64	0,769	0,847
PLOMB	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES	
4.0	F2n4	1,799	A	
2.0	F2n2	1,604	A	
3.0	F2n3	1,53	A	
1.0	F2n1	0		B

Tableau 37 : le poids frais de la partie aérienne d'*Artriplex halimus* L. en (%) par rapport aux plantes non stressées cultivées dans les substrats 0 % de bentonite

	0%	7%	10%
0 ppm	100,0	89,4	95,0
2000 ppm	102,0	106,0	96,7
5000 ppm	92,5	103,4	124,0
10000 ppm	81,2	103,2	88,4

Tableau 38 : le poids frais de la partie racinaire d'*Artriplex halimus* L. en (%) par rapport aux plantes non stressées cultivées dans les substrats 0 % de bentonite

	0%	7%	10%
0 ppm	100,0	32,2	41,4
2000 ppm	82,2	33,1	41,3
5000 ppm	56,3	45,6	39,9
10000 ppm	50,6	50,1	24,9

Tableau 39: le poids sec de la partie aérienne d'*Artriplex halimus* L. en (%) par rapport aux plantes non stressées cultivées dans les substrats 0 % de bentonite

	0%	7%	10%
0 ppm	100,0	66,6	82,4
2000 ppm	103,5	80,0	65,3
5000 ppm	85,3	84,2	96,3
10000 ppm	72,6	86,2	85,1

Tableau 40: le poids sec de la partie racinaire d'*Artriplex halimus* L. en (%) par rapport aux plantes non stressées cultivées dans les substrats 0 % de bentonite

	0%	7%	10%
0 ppm	100,0	38,7	57,9
2000 ppm	79,5	43,7	51,5
5000 ppm	62,9	56,7	55,6
10000 ppm	55,8	69,9	96,1

Tableau 41 : le poids frais de la partie aérienne d'*Artriplex canescens* L. en (%) par rapport aux plantes non stressées cultivées dans les substrats 0 % de bentonite

	0%	7%	10%
0 ppm	100,0	119,8	148,6
2000 ppm	123,5	162,4	111,2
5000 ppm	90,7	196,4	99,3
10000 ppm	137,7	176,7	108,8

Tableau 42: le poids frais de la partie racinaire d'*Artriplex canescens* L. en (%) par rapport aux plantes non stressées cultivées dans les substrats 0 % de bentonite

	0%	7%	10%
0 ppm	100,0	81,8	147,7
2000 ppm	218,2	197,0	129,5
5000 ppm	177,3	262,9	113,6
10000 ppm	249,2	346,2	176,5

Tableau 43: le poids sec de la partie aérienne d'*Artriplex canescens* L. en (%) par rapport aux plantes non stressées cultivées dans les substrats 0 % de bentonite

	0%	7%	10%
0 ppm	100,0	122,7	190,6
2000 ppm	147,4	202,4	131,9
5000 ppm	95,9	261,1	139,1
10000 ppm	159,9	217,0	108,3

Tableau 44: le poids sec de la partie racinaire d'*Artriplex canescens* L. en (%) par rapport aux plantes non stressées cultivées dans les substrats 0 % de bentonite

	0%	7%	10%
0 ppm	100,0	111,9	213,6
2000 ppm	257,6	262,7	161,0
5000 ppm	162,7	315,3	154,2
10000 ppm	191,5	423,7	242,4

Résumé

L'objectif de notre travail est d'étudier l'effet combiné du plomb et de la bentonite sur les caractéristiques physiologiques et biochimiques de deux espèces d'Atriplex : *Atriplex halimus*.L et *Atriplex canescens* L.

Le semis a été effectué dans des pots en plastique de 600g avec un diamètre de 10 cm. Le gravier a été déposé sous le substrat sol de chaque pot afin d'assurer un bon drainage. Le substrat sableux a été traité à la bentonite à des doses de 0% ,7% et 10%. La plante a été stressée à des doses de plomb de 2000,5000 et 10000 ppm.

Les paramètres mesurés sont : la chlorophylle, les sucres solubles la teneur relative en eau, la biomasse fraîche et sèche des parties aérienne et racinaire et l'accumulation du plomb dans les plantes.

Les résultats obtenus ont montré que les deux espèces d'Atriplex étudiées sont résistantes au plomb à des concentrations très élevées qui peuvent aller jusqu'à 10000 ppm. Il a été enregistré également que le stress métallique a entraîné des perturbations physiologiques affectant la chlorophylle. Par ailleurs la réponse des plantes au plomb montre que les sucres solubles et la teneur relative en eau non pas été affectés par le stress au plomb.

L'enrichissement des sols sableux à des doses de 7 % de bentonite améliore considérablement l'adaptation et la résistante des plantes vis-à-vis cette contrainte abiotique. La croissance de la plante est très importante dans les sols sableux amendés à 7 % en bentonite. Ces deux espèces possèdent un important pouvoir d'accumulation du plomb dans les racines et une faible translocation vers les parties aériennes.

Mots clés: Atriplex, bentonite, plomb, chlorophylle, sucres solubles, biomasse végétale, phytoremédiation.

Abstract

The objective of our work is to study the combined effect of lead and bentonite on the physiological and biochemical characteristics of two species of Atriplex: *Atriplex halimus* L and *Atriplex canescens* L.

Sowing was carried out in plastic pots of 600g with a diameter of 10 cm. The gravel was deposited under the substrate ground of each pot in order to ensure a good drainage. The sandy substrate was treated with bentonite with amounts of 0%, 7% and 10%. The plant was stressed with lead amounts of 2000,5000 and 10000 ppm.

The measured parameters are: chlorophyll, soluble sugars, the relative content water, the wet and dry biomass of the roots and shoots parts and accumulation of lead in the plants.

The results obtained showed that the two studied species of Atriplex are resistant to lead with very high concentrations which can go up to 10000 ppm. It was also recorded that the metal stress involved physiological disturbances affecting chlorophyll. In addition the response of the plants to lead shows that soluble sugars and the relative water content not affected by the lead stress.

The enrichment of the sandy grounds to amounts of bentonite 7% improves considerably the adaptation and the plants resistance against this abiotic constraint. The growth of the plant is very considerable in the amended sandy grounds with 7% of bentonite. These two species have an important capacity of accumulation of lead in the roots and a weak translocation towards the air parts.

Key words: Atriplex, bentonite, lead, chlorophyll, soluble sugar, biomass of plants, phytoremediation.

الملخص

الهدف من عملنا هذا هو دراسة التأثير المشترك للرصاص والبتونيت على الخصائص الفيزيولوجية و البيوكيميائية لعملية الزرع تمت في أصص بلاستيكية بسعة 600 سم ، تم وضع الحصى في قاعدة كل أص تحت التربة الزرع لكي نضمن الصرف الجيد لماء السقي. المادة الرملية عولجت بالطين (البتونيت) 0 7 10 % ومعالجة النباتات بتراكيز 0 ppm 10000 5000 2000 .

المعايير المدروسة الكلوروفيل ، السكر المنحل ، المحتوى النسبي للماء في النبات ، المادة الحيوية الرطبة و الجافة للجزء الهوائي ، الجذري و أخيرا نسبة الرصاص المتراكم في النبات . النتائج المتحصل عليها تبين أن كلاً من نوعي القطف المستعملين مقاومين لنسبة عالية من تراكيز الرصاص يمكن أن تصل 10000 ppm. أيضا قد تم تسجيل أن الإجهاد بالمعدن الثقيل (Pb) ، يؤدي اضطرابات فيزيولوجية مؤثرة على الكلوروفيل ، في المقابل استجابة النبات للرصاص تبين أن السكر المنحل و المحتوى النسبي للماء في النبات لم يتأثرا بإجهاد معدن الرصاص (Pb). إثراء التربة الرملية بنسبة 7% من البتونيت تحسن بشكل معتبر تأقلم و مقاومة النبات أمام هذا العائق غير البيولوجي ، نمو النبات مهم جداً في التربة الرملية المدعمة بـ 7% من طين البتونيت . كبيرة على تجميع الرصاص في الجذور و بتحويل ضعيف لهذا المعدن الثقيل نحو الجزء الهوائي للنبات . الكلمات المفتاحية : القطف ، البتونيت ، الرصاص ، الكلوروفيل ، السكر المنحل ، المادة الحيوية ،