

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ ABDELHAMID BEN BADIS MOSTAGANEM
FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE



FILIERE : SCIENCES BIOLOGIQUES

Laboratoire de biodiversité et conservation des eaux et des sols

MÉMOIRE

Présenté par

M^{elle} **BAGHOUS Nadjat**

Pour l'obtention de diplôme du master

Spécialité : Biodiversité et environnement

THÈME

**Effet du plomb sur les paramètres anatomique
et biochimique du *Moringa oleifera* Lam.**

Membres de jury

Pr CHADLI. R	Président	Université de Mostaganem
M. MEDJAHED. M	Examineur	Université de Mostaganem
Pr. REGUIEG YSSAAD. H.A	Encadrant	Université de Mostaganem
Mme HAMAD. H	Co-encadrant	Université de Mostaganem

Année universitaire : 2020/2021

Remerciements

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

Je tiens à exprimer ma respectueuse gratitude et mes vifs remerciements au Professeur REGUIEG YSSAAD Houcine Abdelhakim, encadreur, qui m'a fait l'honneur d'assurer mon encadrement avec qui j'ai eu la chance de bénéficier de son profond savoir.

Je voudrais aussi remercier Mme HAMAD H, Co-encadrant, qu'elle m'a accordée au long de ce travail, les conseils qu'elle m'a procurés tout au long de la rédaction, me facilitant grandement la tâche et me permettant la finalisation de ce thème.

Mon vif remerciement au Professeur CHADLI R pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury.

A Monsieur MEDJAHED M d'avoir accepté d'examiner ce modeste travail

Je voudrais remercier toutes les personnes qui m'ont aidé pendant la réalisation de mon projet.

Dédicaces

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

Je dédisse ce modeste travail avec toutes mes
sentiments:

A mes très chers parents pour tous leurs
sacrifices, leur amour, leur soutien et leurs
prières tout au long de mes études.

A mon partenaire de vie

A toute ma famille

A tous mes amies

A tous mes enseignants

Merci d'être toujours là pour moi.

Résumé

Le plomb est l'un des métaux les plus toxiques et les plus utilisés par l'homme et qui n'a aucun avantage connu sur le plan biologique, sa présence à une forte dose provoque plusieurs perturbations au niveau de la plante. *Moringa oleifera* Lam. est une espèce végétale qui pousse en Asie et en Afrique, elle présente des potentialités importantes de purification des eaux et de résistance au stress salin.

Ce travail consiste à étudier l'effet du plomb sur les paramètres anatomique et biochimique du *Moringa oleifera* Lam., après 60 jours de la culture dans une serre en verre non contrôlée, Cinq doses du plomb sous forme nitrate du plomb ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$) (0, 3, 5, 7 et 10 mM) ont été appliquées pendant un mois.

Les analyses biochimiques montrent une diminution de la teneur en pigments chlorophylliens foliaires **a**, **b** et **total** avec une accumulation importante des sucres solubles, de proline en fonction de la concentration croissante de plomb aux niveaux des parties aériennes et racinaires du *Moringa oleifera* Lam. L'analyse anatomique des racines et des tiges du *Moringa oleifera* Lam. montre que le plomb n'induit aucune anomalie significative au niveau d'écorce et cylindre centrale de racine ou l'épiderme, parenchyme cortical et tissus conducteurs de tige par apport au témoin.

Mots-clés: Plomb, *Moringa oleifera* Lam., Phytoremédiation, paramètre anatomique et paramètre biochimique

الملخص

الرصاص أحد المعادن الشديدة السمية و الأكثر استعمالا من طرف الإنسان، محاسن الرصاص على الصعيد البيولوجي لم تعرف بعد لكن تواجده بتركيز كبيرة يؤدي إلى خلل على مستوى النبات. *Moringa oleifera* Lam. هي نوع نباتي ينمو في آسيا و إفريقيا، له قدرات مهمة في تطهير المياه و تحمل التوتّر الملحي.

هذا العمل يدرس تأثير الرصاص على المعايير البيوكيميائية و التشريحية لنبات *Moringa oleifera* Lam. بعد 60 يوما من الزراعة في دفيئة من الزجاج غير مراقبة، 5 تراكيز من الرصاص استعملت في شكل نيترات الرصاص (0، 3، 5، 7 و 10 ميلي مول) لمدة شهر.

أظهرت التحاليل المتحصل عليها أن للرصاص تأثير سلبي على النبات حيث تم ملاحظة انخفاض محتوى النبات من الصبغات الخضراء المتمثلة في الكلوروفيل أ و ب و الكلي، كما سجلت تراكم معتبر للسكريات القابلة للذوبان و البرولين نتيجة الزيادة التدريجية لتركيز الرصاص على مستوى الأوراق و الجذور. أما التحاليل التشريحية فلم تظهر أي تغييرات واضحة مقارنة بالشاهد.

الكلمات المفتاحية: الرصاص، *Moringa oleifera* Lam. ، Phytoremediation ، المعايير البيوكيميائية و المعايير التشريحية.

Abstract

Lead (Pb) is one of the most toxic metals used by humans and has no known biological benefits. Its presence in high doses causes several disturbances in the plant. *Moringa oleifera* Lam. is a plant species that grows in Asia and Africa, it has significant potential for water purification and resistance to salt stress.

This work consists in studying the effect of lead on the biochemical and anatomical parameters of *Moringa oleifera* Lam. after 60 days of culture in an uncontrolled glass greenhouse, five doses of lead in the form of lead nitrate ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$) (0 , 3 , 5 , 7 and 10 mM) were applied during one month.

Biochemical analysis showed a decrease in the content of leaf chlorophyll pigments a, b and total with a significant accumulation of soluble sugars, proline with increasing lead concentration at the aerial and root parts of *Moringa oleifera* Lam. Anatomical analysis of roots and stems of *Moringa oleifera* Lam. showed that lead did not induce any significant abnormality at the level of bark and root cylinder or epidermis, cortical parenchyma and conductive tissues of stem compared to the control.

Keywords: lead, *Moringa oleifera* Lam., Phytoremediation, anatomical parameters and biochemical parameters.

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Différentes techniques de phytoremédiation	19
Figure 2: Processus de phytoextraction	20
Figure 3: Arbre du <i>Moringa oleifera</i> Lam.....	24
Figure 4: Feuilles du <i>Moringa oleifera</i> Lam.	25
Figure 5: Fleurs du <i>Moringa oleifera</i> Lam.	25
Figure 6: Gousses du <i>Moringa oleifera</i> Lam.	26
Figure 7: Graines du <i>Moringa oleifera</i> Lam.	30
Figure 8: Lavage des graines avec hypochlorite de sodium	31
Figure 9: Rinçage des graines avec l'eau distillée	31
Figure 10: Trempage des graines dans de l'eau distillée tiède	31
Figure 11: Tamisage du sable.....	32
Figure 12: Lavage du sable avec l'eau de robinet	32
Figure 13: Lavage du sable avec l'acide chlorhydrique	32
Figure 14: Séchage du sable à l'air libre	32
Figure 15: Substrat de culture (90% de sable +10% de terreau).....	32
Figure 16: Germination des graines du <i>Moringa oleifera</i> Lam. dans les alvéoles.....	33
Figure 17: Repiquage des plantules dans les cylindres.....	33
Figure 18: Plante de <i>Moringa oleifera</i> Lam. récoltée	35
Figure 19: Rinçage des racines	35
Figure 20: Tube à essai contenant l'acétone et fragments avant 48h.....	36
Figure 21: L'ensemble des tubes à essai pour le dosage de chlorophylle après 48h.....	36
Figure 22: L'ensemble des tubes à essai pour le dosage de sucres solubles.....	37
Figure 23: L'ensemble des tubes à essai pour le dosage de la proline.....	38
Figure 24: Matériel utilisé pour la réalisation des coupes histologiques.....	39
Figure 25: Coupes de la racine et de la tige du <i>Moringa oleifera</i> Lam. dans le vert de méthyle et rouge congo.....	39
Figure 26: Teneur en chlorophylle a , b et totale (mg. g ⁻¹ de poids frais) des feuilles de <i>Moringa oleifera</i> Lam. stressée au plomb.....	40
Figure 27: Teneur en sucres solubles (mg. g ⁻¹ de poids frais) des parties aériennes et racinaires de <i>Moringa oleifera</i> Lam. stressée au plomb.....	42
Figure 28: Teneur en proline (mg. g ⁻¹ de poids frais) des parties aériennes et racinaires de <i>Moringa oleifera</i> Lam. stressée au plomb	43
Figure 29 : Observation microscopique de coupes transversales des racines de <i>Moringa oleifera</i> Lam. à différentes concentrations de plomb Gr : X40.....	44
Figure 31 : Observation microscopique de coupes transversales des racines de <i>Moringa oleifera</i> Lam. à différentes concentrations de plomb Gr : X40.....	44

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Classification périodique des éléments	3
Tableau 2: Activités représentant les principales sources de contamination des sols agricoles par des métaux	6
Tableau 3: Principales propriétés physico-chimique du plomb.....	7
Tableau 4: Classification de systématique du <i>Moringa</i>	23
Tableau 5: Exigences environnementales du <i>Moringa</i>	26
Tableau 6: Caractéristiques du terreau	31
Tableau 7: Composition de la solution nutritive de ‘Activeg puissance 20’	34
Tableau 8: Dispositif expérimental	35
Tableau 9: Analyse statistique de la teneur en chlorophylle a , b et totale (mg. g ⁻¹ de PF) des feuilles de <i>Moringa oleifera</i> Lam. stressée au plomb	41
Tableau 10: Analyse statistique de la teneur en sucres solubles de de <i>Moringa oleifera</i> Lam. (mg. g ⁻¹ de PF) stressée au plomb	42
Tableau 11: Analyse statistique de la teneur en proline de <i>Moringa oleifera</i> Lam. (mg. g ⁻¹ de PF) stressée au plomb	43

LISTE DES ABRÉVIATIONS

ADN : Acide désoxyribonucléique
Al : Aluminium
ALAD : Aminolevulinat Dehydratase
As : Arsenic
ATP: Adénosine-5-triphosphate
B : Bore
Cd : Cadmium
Chlo a : Chlorophylle a
Chlo b : Chlorophylle b
Chlo totale : Chlorophylle totale
Cm : Centimètre
cm³ : Centimètre cube
Co: Cobalt
CO₂: Dioxyde de carbone
Cr : Chrome
Cu : Cuivre
DO: Densité Optique
EDTA : Acide Ethylène Diamine Tétracétique
ETM : Élément trace métallique
Fe : Fer
h : Heure
HCl : Acide chlorhydrique
Hg : Mercure
g : gramme
Kg : Kilogramme
K₂O : Oxyde de potassium
MF : Matière fraîche
mg : milligramme
ML : Métal lourd
Mn : Manganèse
MO : Matière organique
Mo : Molybdène

MS : Masse sèche

N : Azote

Na : Sodium

NaClO : Hypochlorite de sodium

Ni : Nickel

NO: Nobelium

O: Oxygène

Pb₂O₅ : Pentoxyde de phosphore

Pb : Plomb

Pb(NO₃)₂ : Nitrate de plomb

pH : Potentiel d'hydrogène

ROS : Reactive Oxygen Species = Formes réactives de l'oxygène

RUBISCO : Ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase oxydase

S : Sulfur

Se : Sélénium

SO₃ : Trioxyde de soufre

Zn : Zinc

TABLE DE MATIÈRES

Remerciement	
Résumé	
المخلص	
Abstract	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des abréviations	
Table de matières	
Introduction.....	1
PREMIERE PARTIE : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	
CHAPITRE I : Métaux lourds	
I.1. Généralités sur les métaux lourds.....	3
I.1.1. Définition des métaux lourds.....	3
I.1.2. Classification des métaux lourds	4
I.1.3. Origine des métaux lourds	4
I.1.4. Problème de la toxicité des métaux lourds	6
I.2. Le Plomb.....	7
I.2.1. Propriétés physico-chimiques du plomb	7
I.2.2. Origines du plomb.....	8
I.2.3. Le plomb dans le sol	8
I.2.4. Mobilité du plomb.....	8
I.2.5. Le plomb dans la plante	9
I.2.5.1. Phytodisponibilité	9
I.2.5.2. Absorption du plomb par les plantes	10
I.2.5.3. Translocation du plomb	11
I.2.6. Effet du plomb sur la plante	11
I.2.6.1. Effets sur la Croissance et morphogénèse	12
I.2.6.2. Effets sur la photosynthèse	12
I.2.6.3. Effets sur les activités enzymatiques	13
I.2.6.4. Effets sur la nutrition minérale	13

I.2.6.5. Stress oxydatif	13
I.2.7. Mécanismes de résistance et tolérance de la plante au plomb	14

CHAPITRE II: Phytoremédiation

II. Phytoremédiation des sols pollués aux métaux lourds	17
II.1. Définition de la phytoremediation.....	17
II.2. Histoire de la phytoremédiation.....	17
II.3. Plantes utilisées en phytoremédiation.....	18
II.4. Différentes techniques de phytoremédiation	19
II.4.1. Phytoextraction	19
II.4.2. Rhizofiltration	20
II.4.3. Phytostabilisation	20
II.4.4. Phytodégradation	20
II.4.5. Rhizodégradation	20
II.4.6. Phytovolatilisation	21
II.5. Avantages de la phytoremédiation	21
II.6. Limites de la phytormédiation	22

CHAPITRE III :*Moringa oleifera* Lam.

III.1. Origine de la plante	23
III.2. Systématique et nomenclature	23
III.3. Description botanique des différentes parties de la plante.....	24
III.3.1. Arbre du <i>Moringa oleifera</i> Lam.	24
III.3.2. Racine du <i>Moringa oleifera</i> Lam.	24
III.3.3. Tige du <i>Moringa oleifera</i> Lam.	24
III.3.4. Feuilles du <i>Moringa oleifera</i> Lam.	25
III.3.5. Fleurs du <i>Moringa oleifera</i> Lam.	25
III.3.6. Fruits du <i>Moringa oleifera</i> Lam.	26
III.4. Ecologie.....	26
III.5. Biologie.....	27
III.6. Itinéraire technique de production	27
III.6.1. Préparation du sol	27
III.6.2. Fertilisation.....	27

III.6.3. Mise en place culture.....	27
III.6.4. Irrigation.....	28
III.6.5. Ravageurs et maladies.....	28
III.6.6. Récolte et rendement.....	28
III.7. Utilisation du <i>Moringa oleifera</i> Lam.....	28
III.7.1. Fertilisation des cultures et bio-stimulant.....	29
III.7.2. Alimentation et nutrition humaine.....	29
III.7.3. Médicaments et traitements	29
III.7.4. Alimentation animale	29
III.7.5. Purification de l'eau	29
 DEUXIEME PARTIE : Matériel et méthodes	
I. Site d'étude.....	30
II. Matériels.....	30
II.1. Matériel végétal	30
II.1.1. Préparation des graines du <i>Moringa oleifera</i> Lam.....	30
II.2. Matériel du sol	31
II.2.1. Préparation du substrat.....	31
II.2.2. Préparation des cylindres et remplissage du substrat.....	32
II.3. Germination des graines du <i>Moringa oleifera</i> Lam.....	32
II.4. Repiquage des plantules du <i>Moringa oleifera</i> Lam.....	33
II.5. Capacité de rétention de l'eau	33
II.6. Arrosage des plantules du <i>Moringa oleifera</i> Lam.....	34
2.7. Application du stress.....	34
III. Méthodes	35
III.1. Prélèvement et préparation du matériel végétal pour les analyses.....	35
III.2. Paramètres étudiés.....	36
III.2.1. Paramètres biochimiques.....	36
III.2.1.1. Dosage de la chlorophylle.....	36
III.2.1.2. Dosage des sucres solubles.....	36
III.2.1.3. Dosage de la proline	37
III.2.2. Paramètre anatomique.....	38

IV. Analyse statistique.....	39
------------------------------	----

TROISIEME PARTIE: RESULTATS ET DISCUSSION

I. Résultats.....	40
I.1. Paramètres biochimiques.....	40
I.1.1. Effet du plomb sur la teneur en chlorophylle a, b et totale des feuilles de <i>Moringa oleifera</i> Lam. stressée au Plomb.....	40
I.1.2. Effet du plomb sur la teneur en sucres solubles de partie aérienne et racinaire de <i>Moringa oleifera</i> Lam. stressée au Plomb.....	41
I.1.3. Effet du plomb sur la teneur en proline de partie aérienne et racinaire de <i>Moringa oleifera</i> Lam. stressée au Plomb.....	42
I.2. Paramètres anatomiques	43
I.2.1.Effet du plomb sur la structure anatomique des racines et tiges du <i>Moringa oleifera</i> Lam.	43
II. Discussion	45
II.1. Paramètres biochimiques.....	45
II.1.1. Effet du plomb sur la teneur en chlorophylle a, b et totale des feuilles de <i>Moringa oleifera</i> Lam. stressée au Plomb.....	47
II.1.2. Effet du plomb sur la teneur en sucres solubles de partie aérienne et racinaire de <i>Moringa oleifera</i> Lam. stressée au Plomb.....	46
II.1.3. Effet du plomb sur la teneur en proline de partie aérienne et racinaire de <i>Moringa oleifera</i> Lam. stressée au Plomb.....	47
II.2. Paramètre anatomique	47
II.2.1.Effet du plomb sur la structure anatomique des racines et tiges du <i>Moringa oleifera</i> Lam.	47
Conclusion	49
Références bibliographiques	50
Annexe	

Introduction

Le problème des sols contaminés par les métaux lourds est aujourd'hui très préoccupant pour les pays émergents, un métal lourd tels que le plomb ne peut pas être biodégradés et donc persiste dans l'environnement pendant de longues périodes. De plus il est continuellement rajouté dans les sols par diverses activités humaines. Avec l'industrialisation croissante, de plus en plus, des métaux lourds entrent dans l'environnement. Les métaux lourds sont des éléments métalliques traces très toxiques et persistants dans l'environnement (Aduayi-akue et Gnandi, 2015). Durant cette révolution industrielle, la production et l'utilisation du Pb sont considérablement accentuées par sa libération et son accumulation notable dans l'environnement et en particulier dans les sols (jarupe, 2003). Quand il a réussi de pénétrer dans la plante, il peut affecter de nombreux processus physiologiques de celle-ci (cecchi, 2008) et provoquer la mort cellulaire à plus fortes doses (Seregin et Ivanov, 2001).

Les sols pollués aux métaux lourds dus de la nécessité de les gérer (Diallo, 2019), contaminés afin d'en retirer les éléments métalliques ou, au moins, de ramener leur concentration à des niveaux acceptables pour la viabilité de l'écosystème. Il existe certes des méthodes physico-chimiques permettant la décomposition des polluants. Les plus utilisées sont l'incinération et les méthodes de décomposition chimique, mais elles présentent des inconvénients d'être lourdes et onéreuses et laissent en général un sol stérile (Abdelly, 2006).

Les sols pollués peuvent être traités par des procédés biologiques, adaptés à la remédiation (Braud, 2007), La bioremédiation est une option avantageuse pour diminuer la pression exercée sur l'environnement. La bioremédiation consiste à utiliser des systèmes biologiques pour réduire le niveau de pollution, si ce système biologique est une plante donc cette technique connue sous le nom de la phytoremédiation, cette technique est basée sur la capacité de certaines plantes à prélever des métaux du sol, et à les transporter et concentrer dans leurs parties aériennes, qui seront ensuite récoltées et traitées (Abdelly, 2006).cette technique de remédiation s'avère être prometteuse car elle est peu couteuse et plus respectueuse de l'environnement contrairement a des méthodes classiques, physico-chimiques (Chaney *et al*, 1997, Kupper *et al*, 1999).

Moringa oleifera L. encore appelé « arbre de vie » (Besse, 1996; fuglie, 2001) est une plante de la famille Moringacea, à croissance rapide, originaire de l'inde mais très répandue à travers le monde et notamment dans les pays tropicaux et subtropicaux (Louni, 2009). Son introduction en Afrique de l'est a eu lieu au début du 20ème siècle par le biais du commerce et des échanges maritimes (Foidl *et al.*, 2001). *M. oleifera* jouit d'une grande importance en

raison de ses multiples usages et de sa bonne adaptabilité aux climats humides et secs (Gandji *et al.*, 2018). Il a montré une efficacité dans le traitement des eaux, il est utilisé comme coagulant (Ndabigengesere *et al.*, 1995).

L'objectif de ce travail est l'évaluation de l'effet du plomb sur les paramètres anatomique et biochimique de la plante miracle *Moringa oleifera* Lam. A cet effet ce travail est organisé comme suit :

❖ **Première partie** : Synthèse bibliographique incluant trois chapitres :

- Premier chapitre est focalisé sur quelques notions générales des métaux lourds (cas du plomb).
- Deuxième chapitre présente la phytoremédiation comme une méthode de dépollution des sols contaminés par les métaux lourds.
- Troisième chapitre donne un aperçu général sur le *Moringa oleifera* Lam.

❖ **Deuxième partie** : Matériel et méthodes

- Cette partie décrit le matériel végétal utilisé, le protocole expérimental et les différentes techniques d'analyse.

❖ **Troisième partie** : Résultats et discussion

- Cette partie présente les résultats obtenus et la discussion de ces derniers.

❖ **Dernière partie** du manuscrit est la conclusion.

PREMIERE PARTIE
SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. Généralités sur les métaux lourds

Les sols pollués aux métaux lourds ou éléments traces métalliques (ETM) toxiques constituent un problème environnemental et économique dû de la nécessité de les gérer (Diallo, 2019). La contamination des sols agricoles par les métaux lourds tels que le plomb (Pb), le cadmium (Cd), le cuivre (Cu) et le zinc (Zn) est de nos jours une question de santé publique et de conservation de l'environnement. Ces métaux sont présents dans les sols à la suite des activités géogéniques (Baize, 1997) ou anthropiques telles que le raffinage, la combustion de combustibles fossiles, l'application d'engrais phosphatés, et des boues d'épuration aux sols (Kabata-Pendias, 2001).

I.1.1. Définition des métaux lourds

Dans la littérature, les « métaux lourds » sont parfois désignés par les appellations suivantes : métaux ou éléments traces, métaux de transition, micro-nutriments et métaux toxiques. Rigoureusement, un métal dit « lourd » se définit comme un métal dont la masse volumique est supérieure à 5 g/cm^3 (Cloutier et Lefrançois, 2005). Les métaux lourds sont des éléments ayant des propriétés métalliques naturelles (densité, ductilité, stabilité des cations, spécifiés de ligand, conductivité) et qui possèdent un numéro atomique > 20 (Loué, 1993) (Tableau 1).

Sous cette appellation figurent des éléments qui , pour certains , sont effectivement des métaux tels que Ni ,Cu , Zn, Pb, Hg ,Al... mais aussi des métalloïdes tels que chrome, zinc, cuivre, nickel ,plomb , arsenic ,cadmium, mercure (Koller, 2004).

Tableau 1 : Classification périodique des éléments (Bensaha, 2010).

Bloc s												Bloc p										
H		<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: #cccccc; margin-right: 5px;"></div> Métaux lourds de densité > 5 </div>																				He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne					
Na	Mg	Bloc d										Al	Si	P	S	Cl	Ar					
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr					
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Te	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe					
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn					
Fr	Ra	Ac	Bloc f																			
Lanthanides			Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu						
Transuraniens			Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Cf	Bk	Es	Fm	Md	No	Lr						

I.1.2. Classification des métaux lourds

- **Métaux essentiels ou oligo-éléments**

Sont des éléments indispensables, à l'état de trace, pour de nombreux processus cellulaires et qui se trouvent en proportion très faible dans les tissus biologiques (Kabata-Pendias and Pendias, 2001). Certaines peuvent devenir toxiques lorsque la concentration dépasse un certain seuil, c'est le cas du cuivre (Cu), du nickel (Ni), du zinc (Zn), du fer (Fe). Par exemple le zinc (Zn), à la concentration du milli-molaire, est un oligo-élément qui intervient dans de nombreuses réactions enzymatiques (déshydrogénases, protéinase, peptidase) et joue un rôle important dans le métabolisme des protéines, des glucides et les lipides (Adriano, 2001).

- **Métaux non essentiels**

Ont un caractère polluant avec des effets toxiques pour les organismes vivants même à faible concentration, ils n'ont aucuns effets bénéfiques connus pour la cellule (Baker and Walker, 1989). Ces éléments qui ne présentent pas une fonction métabolique, sont connus comme « non essentiels » et généralement ont un seuil de concentration beaucoup plus bas pour devenir toxiques (Aranguren, 2008). Leur toxicité se développe par bioaccumulation le long de la chaîne alimentaire. C'est le cas du plomb (Pb), du mercure (Hg) et du cadmium (Cd) (Nies, 1990).

Les principaux ML impliqués dans les cas de contamination des sols sont le plomb (Pb), le cadmium (Cd), le cuivre (Cu), le zinc (Zn), le nickel (Ni), le chrome (Cr) et la mercure (Hg) (Cloutier et Lefrançois, 2005).

I.1.3. Origine des métaux lourds

Les métaux lourds sont présents naturellement dans les sols selon des concentrations qui sont directement influencées par la nature du socle rocheux local ainsi que les divers processus d'altération auxquels ont été et sont exposées les formations géologiques. Cette concentration naturelle, aussi dite « bruit de fond » a reconnu comme étant le critère générique, pour chaque ML un bruit de fond distinct à chacune des principales provinces géologiques (Cloutier et Lefrançois, 2005).

Il faut différencier la part qui résulte de la contamination d'origine humaine (anthropogène) et la part naturelle (géogène). Les métaux lourds se trouvent dans

l'atmosphère l'hydrosphère, lithosphère. Leur distribution dans l'environnement procède de deux origines (Mckenzie, 1997)

➤ **Origine naturelle**

Sont présent de façon naturelle qui est le résultat de processus géogénique comme l'érosion, les précipitations géochimiques de roches et de l'eau de source, l'activité volcanique et bactérienne, l'altération des continents et les incendies de forêts (Mckenzie, 1997), sont désignés sous le terme de différenciation des sols. Ainsi, une roche-mère riche en arsenic, donnera un sol riche en arsenic, bien que cette corrélation soit plus marquée pour certains métaux (Cr, Zn) que pour d'autres (Co, Mo, Pb, Se) dont l'abondance dans le sol peut être plus fortement liée au cycle biogéochimique (Marc et Gautheyrou, 2003).

➤ **Origine anthropique**

Relève des activités industrielles et aussi agricoles qu'elles ont provoqué un accroissement considérable de la teneur en métaux lourds dans l'environnement (Mckenzie, 1997) La contamination métallique des sols agricoles est principalement due aux dépôts atmosphériques, à l'utilisation de produits phytosanitaires, d'engrais et/ou à l'épandage de déchets organiques (Braud, 2007) (Tableau 2).

Dans les cas de contamination attribuables aux activités de l'homme il s'agit d'une association entre différentes industries et les espèces de ML leur étant communément associées. À titre d'exemple, mentionnons la métallurgie (Fe, Mn, Pb, Zn, Cd, Cr et Ni), l'incinération de déchets (Cd, Cu, Cr et Pb) et l'agriculture (fertilisants) (As, Cd, Mn, Cu, Pb et Zn) (Cloutier et Lefrançois, 2005).

Les entrées de contaminants métalliques peuvent être classées en deux catégories :

➤ **Les entrées indépendantes de l'activité agricole** : il s'agit d'une part des retombées atmosphériques d'origine naturelle telles que l'érosion des sols et les éruptions volcaniques. D'autre part, diverses activités humaines (usines d'incinération, hauts fourneaux, combustion de charbon et de pétrole, circulation automobile).

➤ **Les entrées liées à l'activité agricole** concernent l'utilisation de produits phytosanitaires, Certains pesticides à base d'arséniate de plomb ou de composés organomercuriques, ont aussi conduit à la pollution des sols en As, Hg et Pb. Les apports de matières fertilisantes et les amendements, qu'ils soient organiques ou minéraux (Braud, 2007).

Tableau 2 : Activités représentant les principales sources de contamination des sols agricoles par des métaux (Braud, 2007).

Elément	Cd	Cu	Pb	Zn
Quantité totale émise (t/an)	68	5300	8300	3200
Déchets urbains	7%	5%	3%	28%
Déchets agricoles	—	19%	—	70%
Engrais et phytosanitaires	89%	76%	—	—
Retombées atmosphériques	4%	—	97%	2%

I.1.4. Problème de la toxicité des métaux lourds

Les métaux lourds ont tous un potentiel toxique qui dépend principalement de leur concentration dans le milieu considéré et de leur biodisponibilité et de leur fonction soluble et accessible par les organismes. De trop fortes concentrations en métaux lourds même essentiels sont toxiques pour les organismes vivants. La biodisponibilité en métaux lourds définit leur aptitude à être transférés d'un compartiment vers un autre, ce qui augmente le risque de toxicité sur les organismes vivants (Maynaud, 2012). La toxicité des métaux lourds est due essentiellement à :

- Leur non-dégradable.
- Leur toxicité à faible concentration.
- Leur tendance à s'accumuler dans les organismes vivants et à se concentrer le long des chaînes trophiques (Crine, 1993).

L'une des caractéristiques de la toxicité des métaux est leur pouvoir de former des complexes (Morgan et Stumm, 1991), leur toxicité varie aussi selon la dose et la durée d'exposition. Une exposition de courte durée à des concentrations élevées cause des syndromes aigus, alors que l'exposition de longues durées à de faibles concentrations provoque des troubles chroniques (Kakkar *et al.*, 2005). Les métaux lourds sont classés par ordre de la toxicité (Sposito, 1982).



I.2. Le Plomb

Le plomb est un métal gris bleuâtre et malléable sa densité est élevée et son point de fusion est bas (Nduwayezu, 2010) La teneur moyenne en Pb de la croûte terrestre est estimée à environ 15 mg/kg, avec des différences importantes selon l'origine des sols (Kabata-Pendias, 2011), Dans la nature, on distingue deux types de Pb : le Pb primaire et le Pb secondaire. Le Pb primaire est d'origine géogénique et a été incorporé dans les minéraux au moment de leur formation (Pauget, 2015) tandis que le Pb secondaire est issu de la désintégration de l'uranium et du thorium (Consoglobe, 2016). Les principaux minerais sont la galène (sulfure), la cérusite (carbonate) et l'anglésite (sulfate). Le plomb élémentaire a une faible conductivité électrique et sa masse élevée lui confère un important pouvoir d'absorption des rayonnements X, et électromagnétiques (Garnier, 2005).

I.2.1. Propriétés physico-chimiques du plomb

Le plomb, du latin *plombum* est un métal mou, gris, habituellement trouvé en petite quantité dans la croûte terrestre. Il n'a ni goût ni odeur caractéristique. Il appartient au group IV b de la classification périodique des éléments. Ses principales propriétés physico-chimiques sont présentées dans le. De configuration électronique [Xe] 4f¹⁴ 5d¹⁰ 6s² 6p², il possède 2 électrons non appariés sur la dernière couche. Cette configuration électronique autorise les degrés d'oxydation (+2) et (+4), en plus de la forme métal (0) (Cecchi, 2008) (Tableau 3), mais sa forme plus dominante dans la nature est le Pb²⁺ (Belatik, 2014).

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. Mais c'est également une espèce chargée susceptible d'interactions électrostatiques avec des ions de signes contraires, pour former une liaison ionique (Cecchi, 2008).

Tableau 3 : Principales propriétés physico-chimiques du plomb (Cecchi, 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	
Pb²⁺	0,94 à 1,49 Å
Pb⁺	0,78 à 0,94 Å

I.2.2. Origines du plomb

➤ Origine naturelle

Le plomb est naturellement présent en moyenne à 0,002% dans la croûte terrestre (36^{ème} élément de la croûte terrestre), généralement sous forme peu soluble. Des dérivés inorganiques sont présents dans les eaux, les sédiments, les sols, l'atmosphère et éventuellement en micro-traces chez les organismes vivants. Les sols non contaminés contiendraient de 10 à 30 mg.kg⁻¹ (Nriagu, 1978 ; Baize, 2002).

Les principaux minéraux porteurs de plomb sont les sulfates, les carbonates, les oxydes et hydroxydes, les sulfures ou les phosphates (Cecchi, 2008). Il s'agit d'une part des retombées atmosphériques d'origine naturelle telles que l'érosion des sols et les éruptions volcaniques (Braud, 2007).

➤ Origine anthropique

Le plomb est principalement utilisé dans les batteries et les piles (64%), les pigments et les stabilisants (10%), les canalisations (7%), les gaines (6%), les plombs de chasse et de pêche (3%), l'essence (3%), les alliages (3%) et la verrerie et autres (4%) (Laperche *et al.*, 2004).

I.2.3. Le plomb dans le sol

Parmi la variété de polluants en métaux lourds qui affectent en particulier le sol figure le pb en ce sens qu'il n'est pas biodégradable et s'accumule dans le sol tant que la source de contamination perdure (Sirven, 2006), et que généralement le Pb est accumulé près de la surface du sol, principalement en raison de sa sorption par la MO. Celle-ci présente une forte affinité à l'égard du Pb. Le cycle biogéochimique du Pb dépend des caractéristiques physico-chimiques du sol. Le plomb tend à former des complexes particulièrement stables. En conséquence, il va être stocké en grande partie dans le sol. Toutefois, une fraction mobile peut être absorbée par les organismes vivants (micro- et mésoorganismes du sol, végétaux...) et rentrer ainsi dans la chaîne alimentaire (Kabata-Pendias, 2011).

I.2.4. Mobilité du plomb

De nombreux facteurs de sols tels que le pH, la teneur en phyllosilicates et matières organiques ayant une forte affinité pour le métal lourd et la présence d'autres éléments minéraux carbonates, phosphates, oxydes et hydroxydes influencent la disponibilité des

métaux lourds tel le Pb, pour les plantes (Kabata-Pendias, 2011). Le plomb est un élément réputé peu mobile par rapport à d'autres métaux en traces tel que le cadmium (Bourrelier et Berthelin, 1998). La mobilisation de Pb est généralement lente, mais certains paramètres du sol, comme l'augmentation de l'acidité peut augmenter sa solubilité et par conséquent constituer une importante source de pollution des sols au Pb (Diallo, 2019), mais l'adsorption du Pb par la matière organique du sol augmente avec l'augmentation du Ph (Kabata-Pendias, 2011). Le fractionnement du métal est un paramètre important à prendre en compte pour connaître la mobilité des métaux dans le milieu naturel (Sobanska, 1999).

En règle générale l'horizon de surface humifère est l'horizon le plus riche en Pb. (Pais et Benton, 2000). Le plomb est essentiellement concentré dans les 30 premiers centimètres (Sterckeman, 2000). La mobilité du plomb est principalement contrôlée par sa spéciation en phase aqueuse et par des processus d'adsorption/désorption ainsi que de dissolution/précipitation (Cecchi, 2008).

L'exsudation des racines permet de mobiliser les métaux lourds adsorbés à la surface des particules d'argile ou de la matière organique (Gagné, 2000). Seulement environ 0,005 à 0,13% de Pb dans la solution du sol est disponible pour les plantes (Kabata-Pendias, 2011).

I.2.5. Le plomb dans la plante

I.2.5.1. Phytodisponibilité

La biodisponibilité comme étant «l'aptitude d'un élément à être transféré d'un compartiment du sol vers un organisme vivant (bactérie, végétal, animal, homme). Si l'organisme vivant est une plante on parle alors de phytodisponibilité (Cecchi, 2008). Bien que la quantité d'éléments traces prélevées par les plantes varie selon l'espèce considérée, la variété, l'organe considéré, une des meilleures façons d'évaluer la phytodisponibilité des métaux est la culture d'une plante sur le sol pollué (Baize, 1997). Dans le passé, l'utilisation intensive et non contrôlée du Pb ont provoqué son accumulation dans tous les compartiments des écosystèmes (Belatik, 2014)

La spéciation des éléments chimiques dans les phases solide et liquide du sol représente un critère déterminant de leur mise en disponibilité pour les plantes (Remon, 2006; Philippe *et al.*, 2012). La biodisponibilité fait référence au potentiel d'un élément à être absorbé par un organisme et pouvant réagir à l'intérieur de son métabolisme (Gagné, 2000).

I.2.5.2. Absorption du plomb par les plantes

Les plantes peuvent absorber du plomb à partir des racines, mais également à partir des organes aériens, ou bien par l'intermédiaire des deux. La quantité de plomb présente dans les divers organes d'une plante dépend du transport de l'extérieur des racines vers l'intérieur, puis de sa translocation des racines vers les feuilles (Patra *et al.*, 2004).

➤ **Absorption par voie aérienne**

La contamination par voie aérienne est généralement faible, sauf lorsque les retombées atmosphériques sont importantes, comme à proximité des industries métallurgiques ou à proximité d'axes routiers (résidus de combustion des carburants) par exemple (Greger, 2004).

Les ETM peuvent alors être prélevés par le système foliaire et peuvent pénétrer dans la plante à travers les stomates ou la cuticule des feuilles (Greger, 2004).

➤ **Absorption par voie racinaire**

Le transfert des éléments de la solution vers la rhizosphère se fait par deux processus, la diffusion et le flux de masse.

➤ **La diffusion**

La plante, en prélevant un élément, conduit à une diminution de la concentration de cet élément dans la solution du sol proche de la racine, donc à la création d'une différence de concentration entre la rhizosphère et le sol plus lointain. L'élément va se déplacer spontanément vers la racine, c'est-à-dire vers la zone où la concentration est plus faible. Ce transport s'exerce sur de petites distances (0,1-15 mm) (Barber, 1984 ; Morel, 1985).

➤ **Le flux de masse**

La plante a de gros besoins en eau et absorbe les solutés en même temps que l'eau. Le prélèvement de l'eau produit une différence de potentiel hydrique entre la rhizosphère et le sol plus lointain, conduisant à des mouvements d'eau, accompagnés des éléments solubles, du sol vers la racine. Ce transport des éléments s'effectue sur de plus longues distances que la diffusion (quelques cm) (Barber, 1984 ; Morel, 1985).

I.2.5.3. Translocation du plomb

Les métaux qui ne sont pas séquestrés dans la vacuole ou adsorbés sur la paroi cellulaire des racines peuvent être transportés vers les parties aériennes via les vaisseaux du xylème, c'est la translocation. (Tester et Leigh, 2001).

Les métaux qui ne sont pas séquestrés dans la vacuole ou adsorbés sur la paroi cellulaire des racines peuvent être transportés vers les parties aériennes via les vaisseaux du xylème, c'est la translocation. (Tester et Leigh, 2001).

Le transport des ions dans le xylème est un processus très contrôlé, grâce à des protéines membranaires de transport (Prasad et Hagemeyer, 1999). La translocation des éléments dans le xylème de la plante et en direction des parties aériennes peut nécessiter ou non la prise en charge des éléments par des agents complexant ou chélateurs, généralement des ligands organiques de faible taille comme des acides organiques, des acides aminés, des peptides, des sucres ou encore des composés phénoliques (Briat et Lebrun, 1999 ; Tresmel-Schaub et Feix, 2005).

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

I.2.6. Effet du plomb sur la plante

Si certains éléments métalliques présents à l'état de traces (Mn, Zn, Cu, Ni, Co) dans la majorité des sols agricoles sont essentiels pour la plante, d'autres tels le Pb et le Cd n'ont pas d'activités physiologiques reconnues et peuvent devenir toxiques (Lasat, 2002). La toxicité du plomb dépend de sa concentration dans le milieu, de sa spéciation, des propriétés du sol, et de l'espèce végétale concernée (Cecchi, 2008), ainsi de l'âge de la plante (Päivöke, 2002).

Le plomb peut affecter de nombreux processus physiologiques de la plante. Les premiers effets ne provoquent pas de symptômes visibles, ceux-ci ne se manifestant qu'en cas de toxicité avancée (Cecchi, 2008).

L'excès de plomb dans les plantes induit des troubles physiologiques et biochimiques diminuant la photosynthèse et la transpiration induisant ainsi un retard de croissance (Allowy, 1995).

I.2.6.1. Effets sur la Croissance et la morphogénèse

Une forte concentration en plomb peut aboutir à une ankylose qui est une diminution de la mobilité conduisant à des plantes naines (Pelikan et Lescourret, 2008). Parmi les symptômes visibles, le Pb induit une inhibition de la croissance des différentes parties de la plante, ce qui diminue le rendement et la production de biomasse aérienne (Pourrut *et al.*, 2011). Selon l'importance du stress, les feuilles peuvent présenter une chlorose due à la fois à une perte de chlorophylle, à une relative augmentation des caroténoïdes et à une déficience en fer (Romanowska *et al.*, 2002). Dans les cas les plus sévères, une apparition de tâches nécrotiques est observée (Fodor, 2002).

Le plomb inhibe fortement la germination et affecte considérablement la morphologie des racines, en diminuant la taille des racines primaires ainsi qu'en réduisant le nombre de racines secondaires et l'inhibition de la division et de l'élongation cellulaire (Patra *et al.*, 2004 ; Kopittke *et al.*, 2007).

I.2.6.2. Effets sur la photosynthèse

La photosynthèse reste de ce fait un des mécanismes les plus affectés par la présence du plomb (Cecchi, 2008), l'exposition au Pb conduit à une forte inhibition de la photosynthèse, du rendement photosynthétique, et à une limitation du taux d'assimilation de CO₂. Le rendement photosynthétique, très sensible, peut chuter de plus de 50% (Bazzaz *et al.*, 1975 ; Poskuta *et al.*, 1987). Ceci entraîne une réduction de la teneur en chlorophylle ainsi que celle de tous les pigments photosynthétiques. Une concentration plus élevée en plomb provoque une substitution de l'atome de magnésium au centre de la molécule de chlorophylle par un atome de plomb, provoquant un arrêt de la photosynthèse (Kupper *et al.*, 1996).

La chlorophylle b semble plus sensible que la chlorophylle a (Wozny *et al.*, 1995 ; Vodnik *et al.*, 1999). Toutefois, ces effets varient en fonction des espèces végétales. Les mécanismes de réduction de la teneur pigmentaire sont, en partie, élucidés. Le plomb induit l'activité chlorophyllase dans les feuilles (Drazkiewicz, 1994), mais le mécanisme principal semble être l'inactivation de la synthèse de ces pigments. Le plomb interagit à ce niveau de deux façons :

➤ D'une façon directe, en se substituant aux ions divalents liés aux métalloenzymes.

C'est notamment le cas avec l'-aminolevulinate déshydratase ou ALAD qui est

à la bases de la synthèse des chlorophylles et dont l'ion zinc (Zn^{2+}) est remplacé par plomb (Pb^{2+}) (Foy *et al.*, 1978) .

- D'une façon indirecte, en induisant une carence en ces ions divalents (Foy *et al.*, 1978).

I.2.6.3. Effets sur les activités enzymatiques

Le plomb peut inhiber l'action de certaines enzymes, notamment celles qui possèdent un groupement –SH, ce dernier présentant une forte affinité pour le plomb. Dans la plupart des cas, l'inhibition se fait par interaction du plomb avec ce groupement qui est indispensable pour l'activité et le bon fonctionnement des enzymes. Le plomb affecte donc la conformation de nombreuses enzymes, les empêchant de fonctionner convenablement (Seregin et Ivanov, 2001).

Parmi les enzymes fondamentales qui peuvent être inhibées par le plomb, se trouvent des enzymes impliquées dans la biosynthèse de la chlorophylle ou bien la RUBISCO qui permet la fixation du CO_2 (Seregin et Ivanov, 2001 ; Patra *et al.*, 2004). L'inhibition de ce type d'enzyme entraîne une forte perturbation de la photosynthèse. (Kupper *et al.*, 1996).

I.2.6.4. Effets sur la nutrition minérale

Le plomb affecte également la nutrition minérale, en perturbant le prélèvement et le transport des nutriments par la plante, tels que Ca, Fe, Mg, Mn, P et Zn en bloquant leur entrée ou en se liant à eux, les rendant indisponibles pour les plantes (Xiong, 1997).

La présence de plomb entraîne une diminution du contenu en potassium dans ainsi qu'une diminution du calcium dans les cotylédons et l'hypocotyle, mais aussi du fer dans les racines (Burzynski, 1987). Le plomb affecte aussi le métabolisme azoté en diminuant le prélèvement de nitrate et en perturbant le fonctionnement du nitrate réductase (Seregin et Ivanov, 2001).

I.2.6.5. Stress oxydatif

Un des effets très importants provoqué par le plomb dans les cellules est la génération de stress oxydant, qui est défini comme un déséquilibre entre les systèmes prooxydants et antioxydants, en faveur des premiers et source d'effets toxiques potentiels (Sies, 1991).

Les Espèces Réactives de l'Oxygène (ROS), normalement produites dans les cellules se retrouvent en excès. Ces espèces réactives de l'oxygène incluent l'anion superoxyde (O_2^-), le radical hydroxyle (OH^\cdot) ou encore le peroxyde d'hydrogène. Le stress oxydant entraîne un ralentissement de la croissance végétale, mais également des dommages moléculaires en interagissant avec des substrats biologiques (dénaturation de protéines, inactivation d'enzymes, des cassures au niveau de l'ADN...) (Cecchi, 2008).

Le stress oxydant peut être généré par l'inactivation de certaines enzymes, par fixation sur leur groupement $-SH$ ou par déplacement d'ions métalliques essentiels à l'enzyme (Polle et Schützendübel, 2003).

I.2.7. Mécanismes de résistance et de tolérance de la plante au plomb

Les plantes mettent en place diverses barrières physiques pour se protéger. Tout d'abord le mucilage sécrété au niveau de la coiffe, qui a la capacité de lier le plomb et donc de gêner son adsorption aux parois cellulaires. Mais pour pouvoir pénétrer dans la racine jusqu'au cylindre central, il doit également passer à travers la paroi cellulaire et la membrane plasmique qui possèdent de nombreux sites de fixation pour le plomb. Quand le plomb a réussi à passer à travers ces barrières de protection, les plantes développent des mécanismes de tolérance peuvent survivre à un environnement contaminé (Cecchi, 2008 ; Seregin et Ivanov, 2001).

Le mécanisme le plus répandu est l'évitement du stress métallique par exclusion, qui se fait par fixation du métal sur la paroi cellulaire ou bien par sécrétion de chélates. Ceci a pour but de limiter au maximum le prélèvement par les racines (Seregin et Ivanov, 2001). D'autres facteurs entrent en jeu, notamment une immobilisation du plomb dans la paroi cellulaire, par fixation sur les pectines, chargées négativement. Une partie de ce plomb peut alors se déplacer à travers la membrane et atteindre le symplaste. Une deuxième stratégie est donc mise en place par les plantes, qui consiste à détoxiquer le plomb qui a pénétré. La tolérance au stress métallique dépendra donc de l'efficacité des mécanismes internes qu'elles mettent en place. Ces mécanismes peuvent être (Patra *et al.*, 2004 ; Do Nascimento et Xing, 2006):

- la séquestration des métaux grâce à des composés organiques spécialement synthétisés.
- la compartimentation dans certains compartiments cellulaires (tels que les vacuoles).

- la détoxification grâce à des chélates.

La chélation du plomb dans le cytoplasme et la séquestration dans les vacuoles seraient des mécanismes prépondérants. La vacuole est en effet considérée comme le lieu principal de stockage du plomb (Tong *et al.*, 2004), ces vacuoles peuvent en effet contenir plus de 96% du métal. Ceci permet de diminuer considérablement la quantité de métal dans le cytoplasme, compartiment cellulaire à forte activité métabolique. Des ligands spécialement synthétisés en cas de stress métalliques sont capables de se lier au plomb une fois dans le cytoplasme, pour former des complexes stables, qui peuvent ensuite être séquestrés dans les vacuoles. Les plus connus sont des protéines telles que les métallothionéines ou les phytochélatines, ainsi que des acides organiques de faible poids moléculaires (Wierzbicka et Antosiewicz, 1993).

- Métallothionéines Ce sont des petites molécules qui séquestrent certains ions métalliques en excès (Rausser, 1999).

- Phytochélatines Chez de nombreuses espèces, l'entrée de métaux toxiques dans le cytoplasme induit la synthèse de composés appelés phytochélatines. Ce sont des composés de cystéine (Rausser, 1990; Seregin *et al.*, 2001).

Ceci confirmerait le rôle d'inactivation joué par les phytochélatines. Ce sont des composés pourvus d'un groupement –SH et d'un groupement –COOH qui sont capables de complexer les métaux présents, puis de les transférer dans les vacuoles, puits très importants pour la séquestration des éléments toxiques dans les cellules racinaires, ou bien transportés vers les parties aériennes (Gisbert *et al.*, 2003).

Des acides organiques sont également des ligands potentiels pour la chélation du plomb, grâce à la capacité du plomb à réagir avec N, S et O. Il a été montré que le citrate, le malate et l'oxalate étaient impliqués dans différents processus métaboliques, pouvant inclure la tolérance aux métaux, le transport dans le xylème ou la séquestration dans les vacuoles (Rausser, 1995 ; Shah et Nongkynrih, 2007).

Il a été également mis en évidence l'implication du calcium dans la tolérance au plomb, des fortes teneurs en calcium dans un sol diminuaient la toxicité de certains métaux et notamment du plomb (Karataglis, 1981).

Globalement l'effet de toxicité du plomb sur le métabolisme cellulaire des plantes dépend de la concentration en Pb^{2+} . Cette concentration quand à elle, dépend à la fois de la concentration externe en métal et de l'efficacité des systèmes de protection de la plante.

Quand les systèmes de protections sont dépassés les mécanismes du stress oxydatif sont déclenchés (Cecchi, 2008).

II. Phytoremédiation des sols pollués par les métaux lourds

Les procédures d'assainissement des sols sont subdivisées en trois composantes: physique, chimique et biologique (Hakeem *et al.*, 2014). Les technologies d'assainissement conventionnelles (physiques et chimiques) ont tendance à être maladroites, coûteuses et perturbent le milieu environnant, elles sont aussi lourdes à mettre en place et laissent un sol stérilisé peu utile par la suite (Abdelly, 2007; Wao, *et al.*, 2011; Morel, 2012 ; Vassilev *et al.*, 2007). À l'inverse, La phytoremédiation est donc apparue ces dernières années comme étant une alternative de dépollution, plus lente, mais aussi beaucoup plus économique et plus respectueuse de la microflore, composante essentielle de la bonne qualité des sols (Vassilev *et al.*, 2007).

II.1. Définition de la phytoremediation

Le terme 'phytoremédiation' est dérivé du mot grec *phyto* (qui signifie 'plante') et du mot latin *remedium* qui signifie « guérir du mal » (Hakeem *et al.*, 2014).

La phytoremédiation est une technologie qui utilise la capacité naturelle des plantes à absorber et à stocker dans ses parties aériennes, à dégrader ou à éliminer l'élément cible toxique (Fulekar, 2010; Bhargava *et al.*, 2012) dans les sols, les sédiments, les eaux souterraines ou de surface et même l'atmosphère (Susarla *et al.*, 2002).

À l'heure actuelle, la phytoremédiation est utilisée pour le traitement de plusieurs classes de polluants tels que les hydrocarbures, les solvants chlorés, les pesticides, les composés explosifs ou encore les ETM (Vassilev *et al.*, 2007). L'efficacité de la phytoremédiation dépend de plusieurs facteurs, dont les principaux sont en lien avec :

- la disponibilité ou la mobilité du métal dans le sol (Fulekar, 2010; Bhargava *et al.*, 2012).
- le taux de croissance des plantes utilisées incluant la capacité de la plante à transporter le métal à ses parties aériennes (Arshad, 2009; Bhargava *et al.*, 2012).
- le génotype de la plante et la capacité des plantes à mobiliser le Pb (Arshad, 2009).

II.2. Histoire de la phytoremédiation

Au 16^{ème} siècle, un botaniste de Florence, Andréa Cesalpino, découvre une plante poussant sur des roches naturellement riches en métaux (du nickel notamment). En 1885, Baumann a identifié pour la première fois deux espèces végétales, *Thlaspi caerulescens* et *Viola calaminaria*, comme étant capables d'accumuler de fortes quantités de zinc dans

leurs feuilles. Ensuite, en 1935, Byers étudia l'accumulation du sélénium chez *Astragalus* spp. Dix ans plus tard, Braude (2007) identifia des plantes capables d'accumuler jusqu'à 1 % de Ni dans leurs parties aériennes. Aujourd'hui plus de 400 plantes sont connues pour leur capacité d'accumulation des métaux (Baker *et al.*, 2000).

II.3. Plantes utilisées en phytoremédiation

Parmi les différentes méthodes de phytoremédiation, la plus utilisée est la phytoextraction (Abdelly, 2006). Un certain nombre de caractéristiques sont souhaitables chez les plantes destinées à la phytoextraction ont été rapportés: une croissance rapide, un bon facteur de translocation, une biomasse élevée, un bon taux d'assimilation, une tolérance élevée à de grandes quantités de métaux, un vaste système racinaire, une facile gestion de récolte (Hakeem *et al.*, 2014; Ahmad, 2015). Finalement, les plantes récoltées peuvent subir des traitements pour en extraire les métaux. La récupération des métaux peut se faire par traitements thermiques (incinération, pyrolyse) (Lu *et al.*, 2012).

Il existe deux catégories de plantes susceptibles d'intervenir dans les processus de phytoremédiation :

- **Les métalloytes** strictes, que l'on retrouve uniquement sur des terrains contaminés dans une région donnée comme par exemple *Viola calaminaria* (Ging.) *Minuartia verna* (L.)
- **Les pseudométallophytes**, qui regroupent les espèces présentes à la fois sur les sols contaminés et non contaminés de la même région comme par exemple *Agrostis capillaris* L., *Thymus pulegioides* L. ou *Rumex acetosa* L.

En revanche, il existe des plantes dites « hyperaccumulatrices » (Brooks, 1998) qui sont capables de stocker dans les tiges et les feuilles de 10 à 500 fois plus d'éléments métalliques que les autres espèces végétales (Fulekar, 2010). En utilisant des plantes hyperaccumulatrices pour obtenir une réduction allant jusqu'à plus de 20% de la fraction métallique disponible dans les sols (Morel, 2012). Toutefois, les plantes hyperaccumulatrices ont une croissance lente, un système racinaire superficiel et une faible biomasse aérienne (Hakeem *et al.*, 2014).

Plus de 400 espèces de plantes ont été répertoriées comme plantes accumulant de fortes quantités de métaux (Fulekar, 2010), dont 300 accumulent préférentiellement le Ni. La plupart des espèces utilisées sont des plantes de la famille des *Brassicaceae* (Ebbs et Kochian, 1997). Les plus connues sont *Brassica jimcea*, très utilisée pour la

décontamination du plomb et du cadmium, *Thlaspi caerulescens* capable d'accumuler le zinc (Schen *et al.*, 1997 ; Tolra *et al.*,1996), le cadmium (Brown *et al.*, 1995).

II.4. Différentes techniques de phytoremédiation

La phytoremédiation regroupe cinq techniques: la phytoextraction, la rhizofiltration, la phytostabilisation, la phytovolatilisation et la phytodégradation. (Abdelly, 2006).

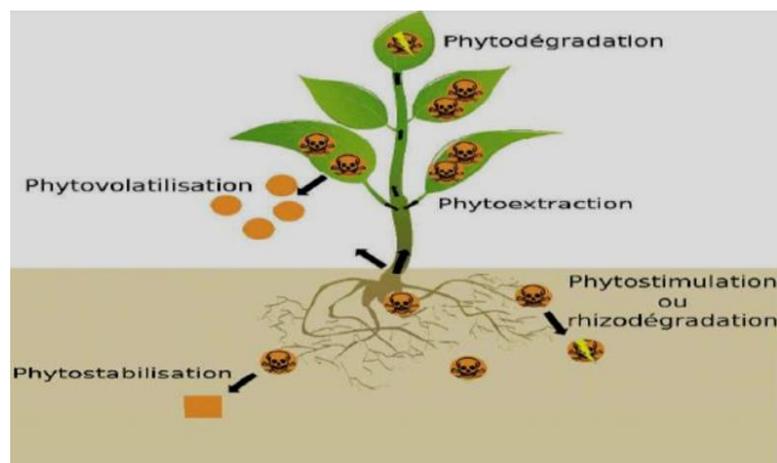


Figure 01 : Différentes techniques de phytoremédiation (Pilon-Smits, 2005)

II.4.1. Phytoextraction

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 (Jemal et Ghorbal, 2002). Cette technique représente une alternative ou un complément aux traitements physicochimiques des sols contaminés par les métaux lourds (Figure 02). Le procédé est répété jusqu'à ce que l'abaissement du niveau de pollution du sol soit significatif (Salt *et al.*, 1998 ;Cooper *et al.*, 1999 ; ADEME, 2010). Il existe deux stratégies de phytoextraction, la phytoextraction assistée (induite) et la phytoextraction continue, la phytoextraction est dite induite lorsqu'elle est assistée par des chélateurs de métaux qui sont appliqués au moment où la production de biomasse est optimale. S'il n'y a pas d'utilisation de chélateurs, il s'agit de phytoextraction continue (Zaier *et al.*, 2010 ; Brooks *et al.*, 1977).

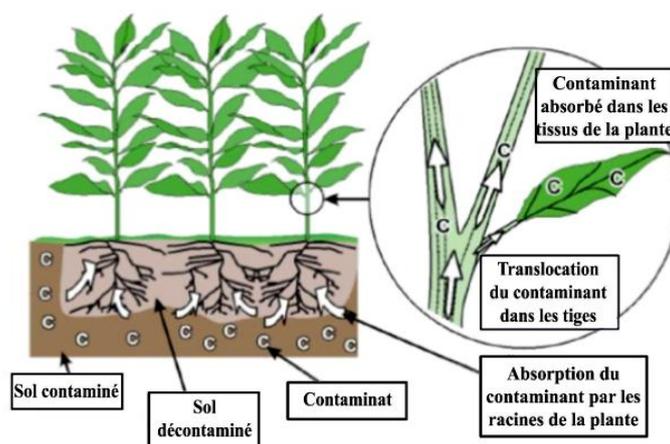


Figure 02 : Processus de phytoextraction (ITRC, 2001)

II.4.2. Rhizofiltration

La rhizofiltration est une technique qui met en jeu les systèmes racinaires de certaines espèces terrestres ou aquatiques qui absorbent, concentrent et stockent les contaminants des eaux polluées (Ghosh et Singh, 2005 ; Pilon-Smits, 2005). Cette technique est généralement utilisée afin de traiter les sites contaminés aux métaux et radionucléides comme le plomb, le cuivre, le zinc, le nickel, l'uranium, le césium et le strontium (EPA, 2000).

II.4.3. Phytostabilisation

Dans la phytostabilisation, les plantes réduisent la mobilité et la biodisponibilité des contaminants dans le sol ou la rhizosphère, par immobilisation chimique (précipitation, stabilisation, absorption ou piégeage) ou prévention des mouvements latéraux ou en profondeur via l'érosion ou le lessivage. La phytostabilisation empêche ainsi la dispersion des contaminants dans les eaux de surface et souterraines (McGrath, 1998).

II.4.4. Phytodégradation

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

II.4.5. Rhizodégradation

La rhizodégradation, aussi appelée phytostimulation, dans laquelle la décontamination s'opère dans le sol. Dans la rhizodégradation, la décontamination est

effectuée dans la rhizosphère par les micro-organismes dont la croissance et l'activité sont stimulées par les plantes (Pilon-Smits, 2005).

II.4.6. 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)

II.5. Avantages de la phytoremédiation

La technique de phytoremédiation présente de nombreux intérêts, d'ordre environnemental et économique. En effet, l'activité biologique et la structure des sols sont maintenues après le traitement. En plus, le coût de la technique est bien moindre que celui des procédés physicochimiques.

D'autre part, les plantes permettent de conserver un paysage agréable (reverdissement et floraison), et aussi d'installer une communauté de microflore et de microfaune métallo-résistantes pouvant agir en synergie avec ces plantes afin d'accélérer le processus de décontamination. Les plantes peuvent être facilement surveillées et récoltées à des fins de traitement et la biomasse végétale réutilisée (Bourguignon, 2016). En outre, les métaux lourds peuvent aussi être récupérés et réutilisés. Enfin, cette technique biologique est facilement acceptée par le public dans le contexte de la préservation de l'environnement, du développement durable, et dans l'aspect esthétiquement plaisant de son application (Senou, 2014). Le nettoyage des sols contaminés par les métaux au moyen de méthodes d'ingénierie conventionnelles peut être prohibitif. Les coûts estimés pour l'assainissement des sites contaminés par des métaux lourds et des métaux lourds mélangés à des composés organiques sont du coût élevé, il est nécessaire de mettre en place des technologies de nettoyage moins coûteuses.

La phytoremédiation est en train d'émerger comme une alternative rentable. Plusieurs analyses ont démontré que le coût de la phytoextraction des métaux n'est qu'une fraction de celui associé aux technologies d'ingénierie conventionnelles. De plus, parce

qu'elle assainir le sol in situ, la phytomédiation évite les perturbations dramatiques du paysage et préserve l'écosystème (Lasat, 1999).

II.6. Limites de la phytormédiation

Comme toute technologie de décontamination des sols, la phytoremédiation comporte certaines limites avec lesquelles il faut composer. Malheureusement, la majorité des plantes hyperaccumulatrices présentent une faible production de biomasse et une vitesse de croissance lente demandant un investissement en temps assez important, et/ou en argent avec l'adjonction de chélateurs (Senou, 2014).

Le paramètre biologique qui limite le potentiel de phytoremédiation des métaux est la production de biomasse. Avec des espèces très productives, le potentiel de production de biomasse est d'environ 100 tonnes de poids frais/hectare. Les valeurs de ces limitent le potentiel d'enlèvement annuel à un maximum de 400 kg de métal/ha/an. Il devrait être mentionné, cependant, que la plupart des hyperaccumulateurs métalliques sont à croissance lente et produisent peu de Biomasse. Ces caractéristiques limitent considérablement l'utilisation de plantes hyperaccumulateurs pour le nettoyage de l'environnement (Lasat, 1999). En outre, l'efficacité de cette approche est conditionnelle au type de sol et de contaminants, à la concentration des contaminants, de leur distribution et à leur biodisponibilité. La concentration et le type de métaux lourds influencent la phytotoxicité, et dans certains cas, la croissance des plantes peut être réduite. De plus, le traitement s'étend généralement sur une longue période et nécessite un suivi (Senou, 2014).

III.1. Origine de la plante

Moringa oleifera Lam est une espèce originaire des régions d'Agra et d'Oudh, au nord-est de l'Inde, au sud de la chaîne de montagne de l'Himalaya, mais elle est cultivée aujourd'hui dans toutes les régions tropicales et subtropicales du monde (Rajangam *et al.*, 2001). Son introduction en Afrique de l'Est a eu lieu au début du 20ème siècle par le biais du commerce et des échanges maritimes durant cette période (Foidl *et al.*, 2001).

III.2. Systématique et nomenclature

La classification de systématique de *Moringa* est la suivante (Tableau 4) (Rajangam *et al.*, 2001):

Règne	Végétal
Embranchement	Spermaphyte
Sous embranchement	Angiosperme
Classe	Dicotylédones
Sous classe	Dillenidae
Ordre	Capparidales
Famille	Moringaceae
Genre	<i>Moringa</i>
Espèce	<i>Moringa oleifera</i> lamarck

Moringa oleifera Lam. Appartient à la famille monogénérique des arbustes et arbres des Moringaceae qui comprend environ 13 espèces, Les espèces les plus courantes sont: *Moringa oleifera*, *Moringa stenopetala*, *Moringa conxanensis*, *Moringa Drouhardii*, *Moringa Longituba* et *Moringa Peregrina* (Laleye *et al.*, 2015).

« Moringa » vient de mot murunga en malayalam une langue indienne, La plupart des langues s'utilisent un dérivé phonétique de ce mot pour désigner la plante (Pousset, 1999).

Moringa oleifera Lam est un arbre qui est connu sous diverses appellations. En Afrique francophone, le nom le plus général est nébéday, nom vraisemblablement dérivé de l'anglais "Never die" (immortel), en référence à sa capacité de résistance à la sécheresse, à son aptitude à se propager rapidement à partir de boutures et à se régénérer

même après des coupes très sévères (Fuglie, 2001). En Inde, il est appelé Dumstick pour rappeler la forme du fruit qui ressemble à une baguette (Pousset, 1999).

III.3. Description botanique des différentes parties de la plante

III.3.1. Arbre du *Moringa oleifera* Lam.

Selon Rajangam *et al.* (2001), *Moringa oleifera* est une plante qui a l'aspect d'un arbuste dont la hauteur peut atteindre 4 à 5 m (Figure 03). Le diamètre du tronc varie entre 20 et 40 cm selon, Le tronc est généralement droit, mais il est parfois très peu développé. En général, il se ramifie lorsque la hauteur atteint 1 à 2 m. Les branches poussent de manière désorganisée et la canopée est en forme de parasol (Foidl *et al.*, 2001).



Figure 03 : Arbre du *Moringa oleifera* Lam. (Atakpama, 2014).

III.3.2. Racine du *Moringa oleifera* Lam.

Le système racinaire est de structure tubulaire, il est formé d'un pivot central qui peut s'enfoncer dans le sol jusqu'à 1,30 m de profondeur lui offrant ainsi une grande résistance à la sécheresse. Des racines secondaires issues du pivot central se ramifient ensuite latéralement jusqu'à constituer une chevelure dense (Rosa, 1993).

III.3.3. Tige du *Moringa oleifera* Lam.

la tige à une écorce de couleur brun-pâle et lisse, parfois tachetée de marron et son bois tendre et mou ne lui permet pas de résister aux vents agressifs (Foidl *et al.*, 2001).

III.3.4. Feuilles du *Moringa oleifera* Lam.

Les feuilles sont alternes, tripennées à la base et bipennées au sommet. Elles mesurent 20 à 70 cm de long avec un long pétiole et 8 à 10 paires de pennes composées chacune de deux paires de folioles opposées, les folioles (Figure 04) sont ovales et longues de 1 à 2 cm (Morton, 1991).



Figure 04 : Feuille du *Moringa oleifera* Lam (Belkebir, 2018)

III.3.5. Fleurs du *Moringa oleifera* Lam.

Les fleurs de 2,5 cm de large se développent en panicules axillaires et tombantes de 10 à 25 cm. Elles sont odorantes, de couleur blanche ou crémeuse, avec des points jaunes à la base (Figure 05). Les sépales, au nombre de cinq, sont symétriques et lancéolés. Ils sont minces et spatulés, symétriques à l'exception du pétale inférieur (Foidl et al., 2001).



Figure 05 : Fleurs du *Moringa oleifera* Lam. (Roloff et al., 2009).

III.3.6. Fruits du *Moringa oleifera* Lam.

Les fruits sont en forme de gousses allongées à trois valves, déhiscentes et mesurant 20 à 60 cm de long. Les gousses sont situées au sommet des branches (Figure 07) et chacune renferme environ 12 à 35 graines (Foidl et *al.*, 2001).

Les graines sont arrondies, ailées, avec une coque marron semi-perméable (Figure 06). Le poids moyen d'une graine est de 0,3g dont 25% sont représentés par la coque. La production annuelle par arbre est de 15 000 à 25 000 graines (Makkar et Becker, 1997). Selon FAO en 1982; Les graines contiennent de gros cotylédons charnus huileux, elles dosent jusqu'à 42% d'une huile comestible ne rancissant pratiquement pas.



Figure 06 : Gousses de Moringa (photo Eugénie DRABUSI, CONGO RDC, 2013)

III.4. Ecologie

Les exigences environnementales du *Moringa oleifera* Lam. sont indiquées dans le tableau 05 suivant.

Tableau 05 : Exigences environnementales du *Moringa oleifera* Lam. (www.Moringanews.org).

Paramètre	Valeur/fourchette
Climat	Tropical ou sub-tropical
Altitude	0- 2000 mètres
Température	25- 35°C
Pluviométrie	Irrigation nécessaire pour la production de feuilles si pluviométrie < 800 mm
Type de sol	Limoneux, sableux ou sablo-limoneux
pH du sol	Légèrement acide à légèrement alcalin (pH: 5 à 9)

Le *Moringa oleifera Lam* se plaît en milieu aride ou semi-aride mais il peut se trouver aussi dans les zones très arides comme le Sahara et peut s'adapter aux différents types de sols (Saint Sauveur et Broin, 2010).

III.5. Biologie

Le *Moringa oleifera Lam* peut se planter par semis, en repiquage ou en plein champ ou encore par boutures. Le semis se fait à mi-ombre, en situation pas trop chaude après un trempage des graines dans l'eau pendant 24 heures. Le taux moyen de germination est de 70% avec une durée de germination comprise entre 4 à 10 jours (Abasse et Oni, 2001). La durée de vie d'un arbre de *Moringa oleifera Lam*. est de 20 ans environ (Hubert et *al.*, 2008).

III.6. Itinéraire technique de production du *Moringa oleifera Lam*.

La production de feuilles de *Moringa oleifera Lam* passe par les étapes suivantes: la préparation du sol, la fertilisation, la mise en place de la culture, l'entretien, Irrigation, le contrôle des ravageurs et la récolte.

III.6.1. Préparation du sol

Le *Moringa oleifera Lam*. demande ainsi un sol bien drainé, limoneux ou sableux, pour avoir une croissance optimale. Pour la production à grande échelle, il est recommandé d'effectuer des analyses de terre et des tests de germination pour s'assurer un bon retour sur investissement. (Moringa Association of Ghana, 2006)

III.6.2. Fertilisation

Selon De Saint Sauveur et Broin (2010), le *Moringa oleifera Lam* peut produire des quantités importantes de feuilles lorsqu'il reçoit des apports organiques suffisants. De plus, l'application de la fumure organique comme fumure de fond est conseillée pour une production biologique.

III.6.3. Mise en place culture

Moringa oleifera Lam. se multiplie soit par semis des graines à 2 cm de profondeur (Kokou et *al.*, 2001). Soit par bouturage. Le semis direct est conseillé pour la monoculture à haute densité (10 x 10 cm), tandis qu'en culture associée, la transplantation peut être préférée dans certains cas (2 à 5 m entre les plants et les rangées). La saison des pluies et la saison sèche fraîche sont les périodes favorables au semis des graines (Jahn, 2003).

La production par bouturage permet d'avoir des plantes à croissance rapide mais développant un système racinaire superficiel qui les rend sensibles au stress hydrique et au vent et elles sont aussi plus sensibles aux attaques de termites (Armelle et *al.*, 2006).

III.6.4. Irrigation

L'irrigation est indispensable pour une production de feuilles continue en saison sèche. Une étude menée au Niger par Gamatie et De Saint Sauveur (2005) a montré que la combinaison de l'irrigation et de la fertilisation permet de faire 18 récoltes par an. Cependant, en saison pluvieuse, la culture de *Moringa* ne nécessite pas d'irrigation (De Saint Sauveur et Broin, 2010).

III.6.5. Ravageurs et maladies

Les sauterelles, criquets, chenilles et les termites constituent les principaux ravageurs. Ces insectes mordent et mangent des parties de la plante entraînant de ce fait la destruction de feuilles, bourgeons, fleurs, pousses, fruits ou graines, Parmi les maladies, les maladies fongiques sont de loin les plus sérieuses dans la culture du *Moringa*. Des taches sombres peuvent apparaître sur les feuilles et finir par les couvrir entièrement, ce qui cause le jaunissement de la feuille et sa mort. Ceci est provoqué par les champignons *Cercospora* spp et *Septoria lycopersic*. L'alternariose serait également courante, elle se présente sous forme de taches angulaires brunes noires avec des cercles concentriques, soit par des lésions noires ou brunes sur les branches (De Saint Sauveur et Broin, 2010).

III.6.6. Récolte et rendement

La récolte peut être manuelle ou mécanique, les fruits doivent être récoltés lorsqu'ils deviennent bruns et secs. Les graines sont extraites, mises en sacs et stockées dans un endroit sec. Les branches de *Moringa* étant fragiles, il est déconseillé de grimper dans l'arbre pour récolter des fruits (De Saint Sauveur et Broin, 2010). Le rendement est fortement influencé par la densité de semis, l'irrigation, la fertilisation, le traitement phytosanitaire et l'entretien de la culture (Foidl et *al.*, 2001).

III.7. Utilisation du *Moringa oleifera* Lam.

Toutes les parties du *Moringa* ont une utilisation tant pour les humains que les animaux, ceci dans différents domaines : médicinales, nutritionnelles, cosmétiques, de purification de l'eau, et fertilisation.

III.7.1. Fertilisation des cultures et bio-stimulant

Les feuilles de *Moringa oleifera* Lam. contient des facteurs de croissance (hormones du type cytokinine) peut assurer une croissance plus vigoureuse sur un cycle de vie plus long; racines, tiges et feuilles plus robustes, fruits plus gros (Foidl et al., 2001).

III.7.2. Alimentation et nutrition humaine

Le Moringa fournit des aliments nutritifs, il est riche en composés contenant un sucre simple. Les fleurs renferment neuf acides aminés, le saccharose, le D-glucose, des traces d'alcaloïdes, de cire et de quercétine (Laleye et al. 2015).

La teneur en calcium de *Moringa oleifera* Lam..est plus que cela dans le lait et a également plus de potassium que la banane, plus de fer que les épinards et la qualité protéique de feuilles de *Moringa oleifera* Lam. rivalise avec celle du lait et des œufs (Moyo et al. 2011).

III.7.3. Médicaments et traitements

En plus d'être comestible, toutes les parties de la *Moringa oleifera* Lam. ont été déployées pour soigner d'innombrables maladies, c'est pour cette raison, qu'elle fut appelée "Miracle Tree" (Mbikay, 2012). Il a des propriétés antioxydantes, antimicrobiennes, anti-inflammatoires (Kumar Gupta et al., 2013) En phytothérapie, la poudre de feuilles du *Moringa oleifera* Lam. est indiquée pour stimuler le système immunitaire, réduire la fatigue, abaisser la pression artérielle, améliorer la digestion et le transit; renforcer les capacités cognitives (Messaoud, 2015).

III.7.4. Alimentation animale

Selon Foidl et al. (2001), les feuilles du *Moringa oleifera* Lam. Constituent un fourrage de qualité supérieure permettant un gain de poids considérable sur le bovin ceci est du d'une part à sa forte teneur en matière azotée apparemment digestible, s'élevant à plus de 95% et sa bonne qualité de fibres également.

III.7.5. Purification de l'eau

Les graines du *Moringa oleifera* Lam. contiennent des polyélectrolytes cationiques qui ont montré leur efficacité dans le traitement des eaux en remplacements du sulfate d'alumine et des autres flocculant (Ralezo Maevaland, 2006).

DEUXIEME PARTIE
MATERIEL ET METHODES

I. Site d'étude

Cette expérimentation a été réalisée au niveau d'une serre en verre non contrôlée de l'atelier agricole de Mazagran, situé à environ 5 km de la ville de la wilaya de Mostaganem entre 35°35'35" de l'altitude et 0°,4',44" de longitude. Les analyses biochimique et anatomique ont été effectuées au laboratoire de biodiversité et conservation des eaux et des sols de l'université Abdelhamid ibn Badis, Mostaganem.

II. Matériels

II.1. Matériel végétal

Les graines du *Moringa oleifera* Lam. utilisées dans ce travail proviennent de la wilaya de Blida, Algérie. La plante a été choisie à raison de ces capacités de résistance et d'adaptation aux stress abiotiques, de plus son utilisation comme coagulant naturel dans la décontamination des eaux polluées par les métaux lourds (Figure 07).



Figure 07 : Graines de *Moringa oleifera* Lam.

II.1.1. Préparation des graines du *Moringa oleifera* Lam.

Les graines sont désinfectées à hypochlorite de sodium (NaClO) pendant 5 minutes pour éliminer toute contamination fongique, puis rincées abondamment à l'eau distillée pour éliminer toute trace de chlore, ensuite les graines sont trempées dans de l'eau distillée tiède pendant 24 h pour une germination facile (Figure 08,09,10).



Figure 08 : Lavage des graines avec hypochlorite de sodium



Figure 09 : Rinçage des graines avec l'eau distillée



Figure 10 : trempage des graines dans de l'eau distillée tiède

II.2. Matériel sol

II.2.1. Préparation du substrat

Le substrat utilisé pour la culture des plantes de *Moringa* est constitué d'un mélange de 90% de sable des dunes, ramené du littoral de Sablette- Mostagnem et 10% du terreau commercial (Tableau 06).

Tableau 06 : Caractéristique du terreau

Caractéristique	Valeur
N	100-300 mg/l
P □ O □	100-300 mg/l
K □ O	100-400 mg/l
Ph	5,4 – 5,9

Le sable a subi plusieurs opérations de préparation avant de son utilisation pour la plantation des plantes de *Moringa oleifera* Lam. En commençant par un tamisage avec un tamis à maille de 2 mm pour éliminer les débris végétaux, animaux et toutes les pierres (Figure 11), ensuite, un lavage avec l'eau ordinaire (3 fois) (Figure 12), puis un traitement avec l'acide chlorhydrique pour éliminer les sels, les carbonates, les chlorures...etc (Figure 13). Après le sable est rincé successivement à l'eau ordinaire (3 fois) puis à l'eau distillée (1 fois) afin de supprimer toute trace de chlore. A la fin, le sable est séché à l'air libre (Figure 14).



Figure 11 : Tamisage du sable



Figure 12 : Lavage du sable avec l'eau de robinet



Figure 13 : traitement du sable avec l'acide chlorhydrique



Figure 14 : Séchage du sable lavé à l'air libre

II.2.2. Préparation des cylindres et remplissage du substrat

Le substrat est mis dans des cylindres de 50 cm de hauteur et 20 cm de diamètre, ces cylindres sont tapissés au fond par du gravier pour assurer un bon drainage. Chaque cylindre a une contenance de 10 kg du mélange sable et terreau (Figure 15).



Figure 15 : Substrat de culture (90 % de sable + 10 % de terreau)

II.3. Germination des graines du *Moringa oleifera* Lam.

La germination des graines a été réalisée au niveau du laboratoire de biodiversité et conservation des eaux et sols, dans des alvéoles contenant du terreau pour la production des plantules (Figure 16). Les graines ont été arrosées avec de l'eau distillée trois fois par semaine jusqu'à l'obtention des plantules de quatre feuilles.



Figure 16 : Germination des graines du *Moringa oleifera* Lam. dans les alvéoles

II.4. Repiquage des plantules du *Moringa oleifera* Lam.

Après un mois de germination, les plantules du *Moringa* ont été déplacées à la serre de l'atelier agricole de Mazargan afin de les repiquer dans les cylindres (Figure 17), à raison d'une plantule par cylindre.



Figure 17 : Repiquage des plantules du *Moringa oleifera* Lam. dans les cylindres

II.5. Capacité de rétention de l'eau

La capacité de rétention est déterminé par la différence entre la quantité d'eau apportées avant l'arrosage et celle récupéré après 24h de décantation. La capacité de rétention est de avec de 1300 ml.

II.6. Arrosage des plantules du *Moringa oleifera* Lam.

L'arrosage est effectué trois fois par semaine par l'eau distillée; substituée une fois sur trois par une solution nutritive d'Activeg à raison 1g/l.

Tableau 07 : Composition de la solution nutritive de 'Activeg puissance 20'

Eléments majeurs (g/l)	
Azote (N)	200
Phosphore (P₂O₅)	200
Potassium (K₂O)	200
Oligoéléments (g/l)	
Magnésium (MgO)	4
Fer EDTA (Fe)	0.65
Manganèse (Mn)	0.65
Molybdène (Mo)	0.05
Souffre (SO₃)	8
Cuivre (Cu)	0.06
Zinc (Zn)	0.3
Bore (B)	0.3

II.7. Application du stress

Les plantes du *Moringa oleifera* Lam. âgées de deux mois ont été traitées avec cinq doses du plomb sous forme de nitrate de plomb (Pb(NO₃)₂) (0, 3,5, 7 et 10 mmol) avec 5 répétitions. Le stress métallique au plomb a été appliqué à raison une fois par semaine pendant deux semaines. La première application du stress c'était le 27/04/2021 et la 2ème le 04/05/2021.

➤ Dispositif expérimental

Les cylindres ont été installés à la serre aléatoirement en 5 blocs, dont chaque bloc contient les cinq doses (0, 3, 5, 7 et 10 mM) (Tableau 08).

Tableau 08: Dispositif expérimental

Bloc 1	Bloc 2	Bloc 3	Bloc 4	Bloc 5
0 mM Répétition 1	5 mM Répétition 3	3 mM Répétition 2	10 mM Répétition 5	7 mM Répétition 4
7 mM Répétition 4	3 mM Répétition 2	10 mM Répétition 5	3 mM Répétition 2	0 mM Répétition 1
3 mM Répétition 2	10 mM Répétition 5	0 mM Répétition 1	7 mM Répétition 4	10 mM Répétition 5
10 mM Répétition 5	0 mM Répétition 1	5 mM Répétition 3	5 mM Répétition 3	5 mM Répétition 3
5 mM Répétition 3	7 mM Répétition 4	7 mM Répétition 4	0 mM Répétition 1	3 mM Répétition 2

III. Méthodes

III.1. Prélèvement et préparation du matériel végétal pour les analyses

Après deux semaines de l'application du stress, les plantes du *Moringa oleifera* Lam. ont été prélevées le 20/05/2021 (Figure 18). La partie aérienne et la souterraine sont séparées. Les feuilles sont prélevées en prenant le soin de les mettre dans des sachets de papier kraft de manière à les protéger de la lumière. Les racines ont été rincées soigneusement à l'eau du robinet pour éliminer toute trace du substrat (Figure 19).



Figure 18 : Récolte des Plantes du *Moringa oleifera* Lam.



Figure 19 : Rinçage des racines de la plante du *Moringa oleifera* Lam.

III.2. Paramètres étudiés

III.2.1. Paramètres biochimiques

III.2.1.1. Dosage de la chlorophylle

L'extraction de la chlorophylle a et b est réalisée selon la méthode de **Lichtenthaler, (1987)** et **Shabala et al., (1998)**.

100 mg de matériel végétal frais (feuille) issu de chaque concentration, coupé en petit fragments, est mis dans un tube à essai contenant 10 ml d'acétone à 95% (Figure 20,21). L'ensemble est conservé à l'obscurité durant 48 heures à 04 °C.

La lecture de la densité optique de la solution à l'aide d'un spectrophotomètre UV réglé aux longueurs d'onde suivantes : 663 nm (chl a) et 645 nm (chl b).

L'appareil est étalonné avec la solution témoin à base d'acétone à 95%.

La détermination des teneurs réalisée selon les formules (**Wang et al., 2010**):

- $\text{Chl a (mg/g MF)} = 12,7 \times \text{DO}(663) - 2,59 \times \text{DO}(645)$
- $\text{Chl b (mg/g MF)} = 22,9 \times \text{DO}(645) - 4,68 \times \text{DO}(663)$
- $\text{Chl(a+b) (mg/g MF)} = \text{Chl a} + \text{Chl b}$



Figure 20 : Tube à essai contenant l'acétone et fragments avant 48h

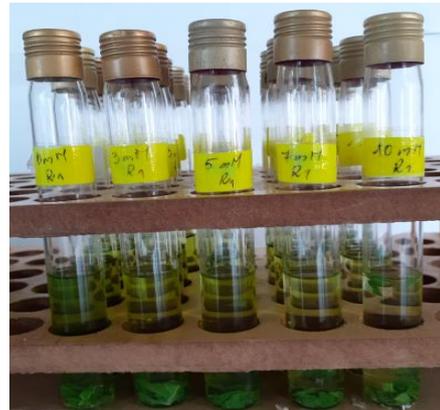


Figure 21 : L'ensemble des tubes à essai pour le dosage de chlorophylle après 48h

III.2.1.2. Dosage des sucres solubles

Les sucres solubles au niveau des parties aériennes et souterraines du *Moringa* ont été dosés selon la méthode de **Dubois, (1956)**.

Cette méthode consiste à prendre 100 mg de matière fraîche végétale de chaque partie de la plante et la mettre dans des tubes à essai puis ajouter 2 ml d'éthanol à 80% et laisser les tubes fermés au repos pendant 48h.

Faire évaporer l'alcool en mettant les tubes à essai dans un bain Marie à 70°C, après refroidissement, on ajoute 20 ml d'eau distillée dans chaque tube à essai.

Prendre 1 ml de la solution et ajouter 1 ml de phénol à 5 % et bien agiter, ajouté 2 ml d'acide sulfurique concentré, dans chaque tube à essai puis les passer au vortex, dans un bain de glace; les laisser reposer durant 25 min (Figure 22).

L'appareil est étalonné avec une solution témoin à base de 02 ml d'éthanol à 80%, 01 ml de phénol 5% et 02 ml d'acide sulfurique concentré, Procéder à la lecture au spectrophotomètre à la longueur d'onde de 490 nm. $Y = 1,7807 X - 0,0409$



Figure 22 : L'ensemble des tubes à essai pour le dosage des sucres solubles

III.2.1.3. Dosage de la proline

La proline est dosée selon la technique utilisée par **Troll et Lindesly (1955)** simplifiée et mise au point par **Dreier et Goring (1974)** et modifiée par **Monneveux et Nemmar (1986)**.

On prend 100 mg de matière fraîche végétale de chaque partie de la plante, et on la met dans des tubes à essai et on ajoute 2 ml de Méthanol à 40%, Les tubes couverts (pour éviter la volatilisation de l'alcool) sont portés à l'ébullition au bain-marie à 85 °C pendant 60 min.

Après refroidissement, 1 ml de la solution est prélevé de chaque tube et mis dans de nouveaux tubes auxquels, on ajoute 1 ml d'acide acétique et 25 mg de ninhydrine.

Ensuite, on ajoute, dans chaque tube, 1 ml d'un mélange contenant; 120 ml d'eau distillée, 300 ml d'acide acétique, 80 ml d'acide orthophosphorique et on porte les tubes à essai à ébullition 100°C au bain Marie durant 30 min.

Après refroidissement des solutions, on ajoute 5 ml de toluène dans chaque tube, après agitation au vortex deux phases apparaissent, on prélève la phase supérieure à la qu'elle on ajoute 5 mg du sulfate de sodium Na₂SO₄.

L'appareil est étalonné avec une solution témoin à base de 01 ml de méthanol à 40%, 01 ml d'acide acétique et 01 ml de réactif préparé de ninhydrine, On procède à la lecture de la densité optique des échantillons avec le spectrophotomètre à la longueur d'onde de 528 nm.

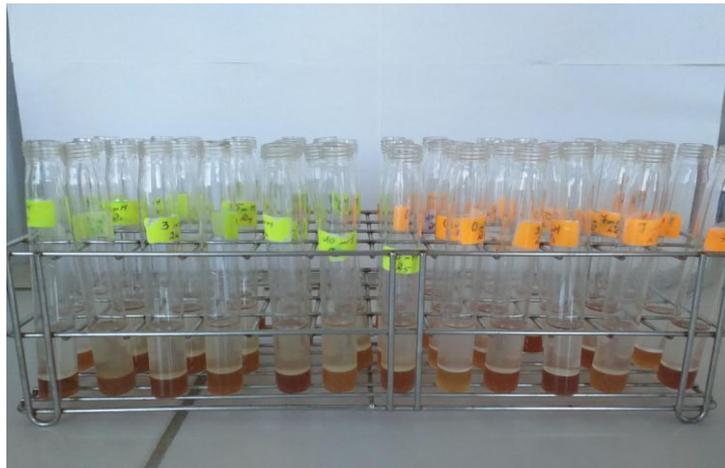


Figure 23 : L'ensemble des tubes à essai pour le dosage de la proline

III.2.2. Paramètre anatomique

Pour réaliser des coupes histologiques des tiges et des racines de *Moringa oleifera* Lam., on a effectué des coupes longitudinales a l'aide d'une lame tranchante, puis on a suivi le Protocol suivant (**Langeron , 1934**)

- * Les coupes dans hypochlorite de sodium pendant 15 minutes.
- * Rinçage avec l'eau distillé 3 fois.
- * Les coupes dans l'acide acétique pendant 5 minutes.
- * Rinçage avec l'eau distillé 3 fois.

- * Les coupes dans du vert de méthyle pendant 5 minutes..
- * Rinçage avec l'eau distillé 3 fois.
- * Les coupes dans le rouge Congo pendant 15 minutes.
- * Rinçage avec l'eau distillé 3 fois.
- * Observations microscopique couplé à une tablette.



Figure 24 : Matériel utilisé pour la réalisation des coupes histologiques

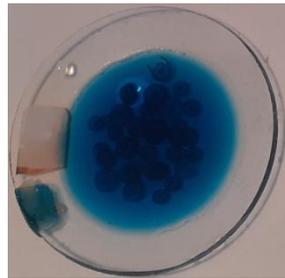


Figure 25 : Coupes de la racine et de la tige du *Moringa oleifera* Lam. dans le vert de méthyle et rouge congo

IV. Analyses statistiques.

Les analyses statistiques a été effectué à l'aide d'un logiciel STAT-BOX 6.4. La variance à un seuil de 5% , dont la probabilité $P \leq 0$ (hautement significatif), $P \leq 0,01$ (très significatif), $P \leq 0,05$ (significatif), et $P > 0,05$ (non significatif), selon le test de Newman-Keuls.

TROISIEME PARTIE
RESULTATS ET DISCUSSION

I. Résultats
I.1. Paramètres biochimiques
I.1.1. Effet du plomb sur la teneur en chlorophylle a, b et totale des feuilles de *Moringaoleifera* Lam.

Les résultats obtenus montrent une diminution de la teneur en chlorophylle **a**, **b** et **totale** dans les feuilles des plantes du *Moringaoleifera* Lam. soumise à un stress au plomb par rapport aux plantes témoins (Figure 27). Les valeurs les plus basses sont enregistrées au niveau des feuilles de plantes stressées avec 7 mM du Pb. La teneur en chlorophylle **b** est 50% que celle enregistrée dans la chlorophylle **a**.

L'application d'un stress au plomb aux doses 3, 5, 7 et 10 mM entraîne une diminution de la teneur en chlorophylle **a**, où on a enregistré des valeurs de 10,01 ; 9,344 ; 6,8 et 8,352 mg. g⁻¹ de poids frais respectivement avec les doses : 3, 5, 7 et mM, alors que la valeur la plus élevée (13,645 mg. g⁻¹ de poids frais) est enregistré chez les plantes témoins (Tableau 09).

La teneur en chlorophylle **b** chez les plantes témoins est de 6,594 mg. g⁻¹ de poids frais, cette teneur est diminuée progressivement avec l'application des doses croissantes en plomb (4,489; 5,173; 4,415 et 6,334 mg. g⁻¹ de poids frais respectivement avec les doses : 3, 5, 7 et 10 mM).

La teneur en chlorophylle **totale** enregistré chez les plantes témoins est beaucoup plus importante, elle est de 20,239 mg. g⁻¹ de poids frais. L'enrichissement des solutions à 3, 5, 7 et 10 mM du Pb provoque une diminution de la teneur en chlorophylle totale (14,499, 14,516, 11,216 et 14,686 mg. g⁻¹ de poids frais respectivement avec les doses appliquées).

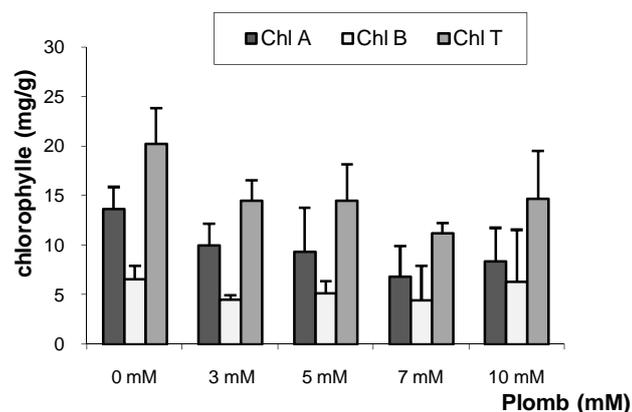


Figure 26 : Teneur en chlorophylle **a**, **b** et **totale** (mg. g⁻¹PF) des feuilles de *Moringaoleifera* Lam stressée au plomb.

Tableau 09 : Analyse statistique de la teneur en chlorophylle **a**, **b** et **totale** (mg. g⁻¹ de PF) desfeuilles de *Moringaoleifera*Lam sous l'effet de plomb.

Doses	Chl a	Chl b	Chl t
0 mM	13,645 ± 2,287	6,594 ±1,371	20,239 ±3,636
3 mM	10,01 ±2,198	4,489 ±0,515	14,499 ± 2,092
5 mM	9,344 ±4,477	5,173±1,237	14,516 ±3,727
7 mM	6,8 ±3,154	4,415 ±3,575	11,216 ±1,048
10 mM	8,352 ±3,449	6,334 ±5,271	14,686 ±4,886

L'analyse de la variance montre que l'effet du plomb est significative sur la teneur en chlorophylle aet non significative sur la teneur en chlorophylle b. alors que la teneur en chlorophylle totale diminue d'une façon hautement significative sous l'effet du plomb.

I.1.2. Effet du plomb sur la teneur en sucres solubles departie aérienne et racinaire de *Moringaoleifera*Lam.stressée au Plomb

Les résultats obtenus montrent la teneur en sucres solubles dans la partie aérienne et racinaire des plantes du *Moringaoleifera*Lam. augmente au fur et à mesure que les doses du plomb appliquées augmentent (Figure 28).

La teneur en sucre solubles de partie aérienne chez les plantes témoins est de 0,116 mg.g⁻¹PF, cette teneur augmente progressivement avec l'application des doses croissantes en plomb, dont on a enregistré les valeurs : 0,139; 0,145; 0,145 et 0,192 mg.g⁻¹de PFrespectivement avec les doses : 3, 5, 7 et 10 mM.

La valeur la plus basse de la teneur en sucres solubles est enregistré au niveau des racines des plantes témoins (0,044 mg.g⁻¹), tandis que l'application des doses croissantes en plomb provoque l'accumulation de la teneur en sucres solubles au niveau des racines des plantes, dont la valeur la plus élevée est enregistré chez les plantes traitées avec 10 mM de Pb (,165mg.g⁻¹)(Tableau 10).

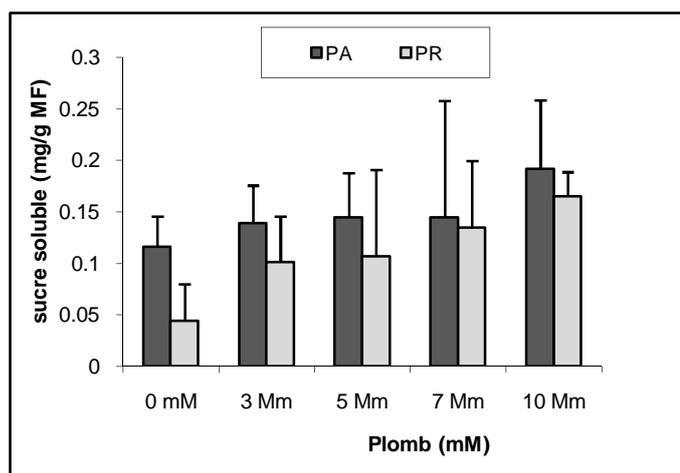


Figure 27 : Teneur en sucres solubles (mg. g⁻¹ de poids frais) de partie aérienne et racinaire de *Moringaoleifera* Lam. stressée au plomb.

Tableau 10 : Analyse statistique de la teneur en sucres solubles (mg. g⁻¹ de PF) de partie aérienne et racinaire de *Moringaoleifera* Lam stressée au plomb.

Doses	PA	PR
0 mM	0,116 ±0,03	0,044 ±0,036
3 mM	0,139 ±0,037	0,101 ±0,045
5 mM	0,145 ±0,043	0,107 ±0,084
7 mM	0,145 ±0,113	0,135 ±0,065
10 mM	0,192 ±0,067	0,165 ±0,024

L'analyse de la variance révèle que l'accumulation de sucres solubles sous l'effet de plomb est non significative dans la partie aérienne des plantes du *Moringaoleifera* Lam., alors qu'elle est significative au niveau des racines.

I.1.3. Effet du plomb sur la teneur en proline de partie aérienne et racinaire de *Moringaoleifera* Lam. stressée par le plomb

L'application du stress au plomb entraîne une diminution en teneur en proline dans la partie aérienne et racinaire de la plante du *Moringaoleifera* Lam. par rapport au plante témoin (Figure 29).

Dans la partie aérienne de *Moringaoleifera* Lam., la valeur de la teneur en proline la plus élevée (1,101 mg.g⁻¹ PF) est obtenue chez la plante témoin, tandis que les teneurs en proline chez les plantes traitées avec 3, 5, 7 et 10 mM du Pb diminuent, dont on a remarqué les valeurs suivant: 0,667 ; 0,648 ; 0,584 et 0,525 mg. g⁻¹ PF respectivement avec les doses du Pb appliquées.

Au niveau des racines, la teneur en proline la plus élevée est enregistrée en absence du plomb chez la plante témoin (0,944 mg.g⁻¹PF). On note une diminution de la proline progressivement avec des doses croissantes de plomb (19.83 ; 0,398 ; 0,874 ; 0,49 et 0,362 mg. g⁻¹PF) (Tableau 11).

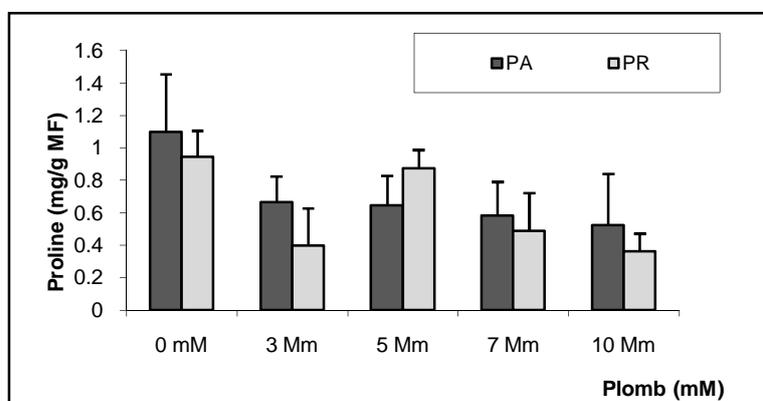


Figure 28 : Teneur en proline (mg.g⁻¹ PF) des parties aériennes et racinaires de *Moringaoleifera* Lam. stressée au plomb

Tableau 11 : Analyse statistique de la teneur en proline (mg. g⁻¹ de PF) de partie aérienne et racinaire de *Moringaoleifera* Lam stressée au plomb

Doses	PA	PR
0 mM	1,101±0,356	0,944±0,163
3 mM	0,667±0,157	0,398±0,232
5 mM	0,648±0,183	0,874±0,115
7 mM	0,584±0,208	0,49±0,234
10 mM	0,525±0,317	0,362±0,111

L'analyse de la variance montre que le plomb n'a aucun effet significatif sur la teneur en proline de la plante du *Moringaoleifera* Lam.

1.2. Paramètres anatomiques

1.2.1. Effet du plomb sur la structure histologique des racines et tiges de *Moringaoleifera* L

Les résultats de l'observation microscopique des coupes transversales montrent la structure tissulaire suivante de la tige et la racine du *Moringaoleifera* Lam (présentée dans les photos ci-dessous).

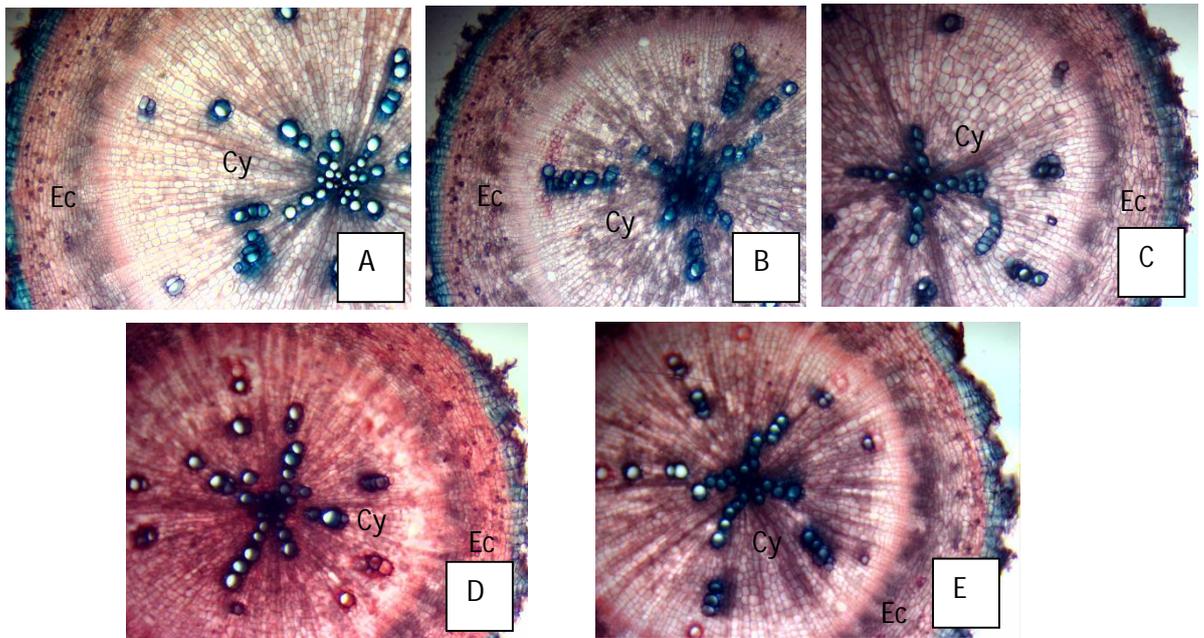


Figure 29 : Observation microscopique de coupes transversales des racines du *Moringaoleifira*Lam. à différentes concentrations du plomb Gr : X40.

NB : A : 0 mM du Pb; B: 3mM du Pb; C : 5mM du Pb; D: 7mM du Pb; E:10mM du Pb

Ec: Ecorce

Cy:Cylindre central

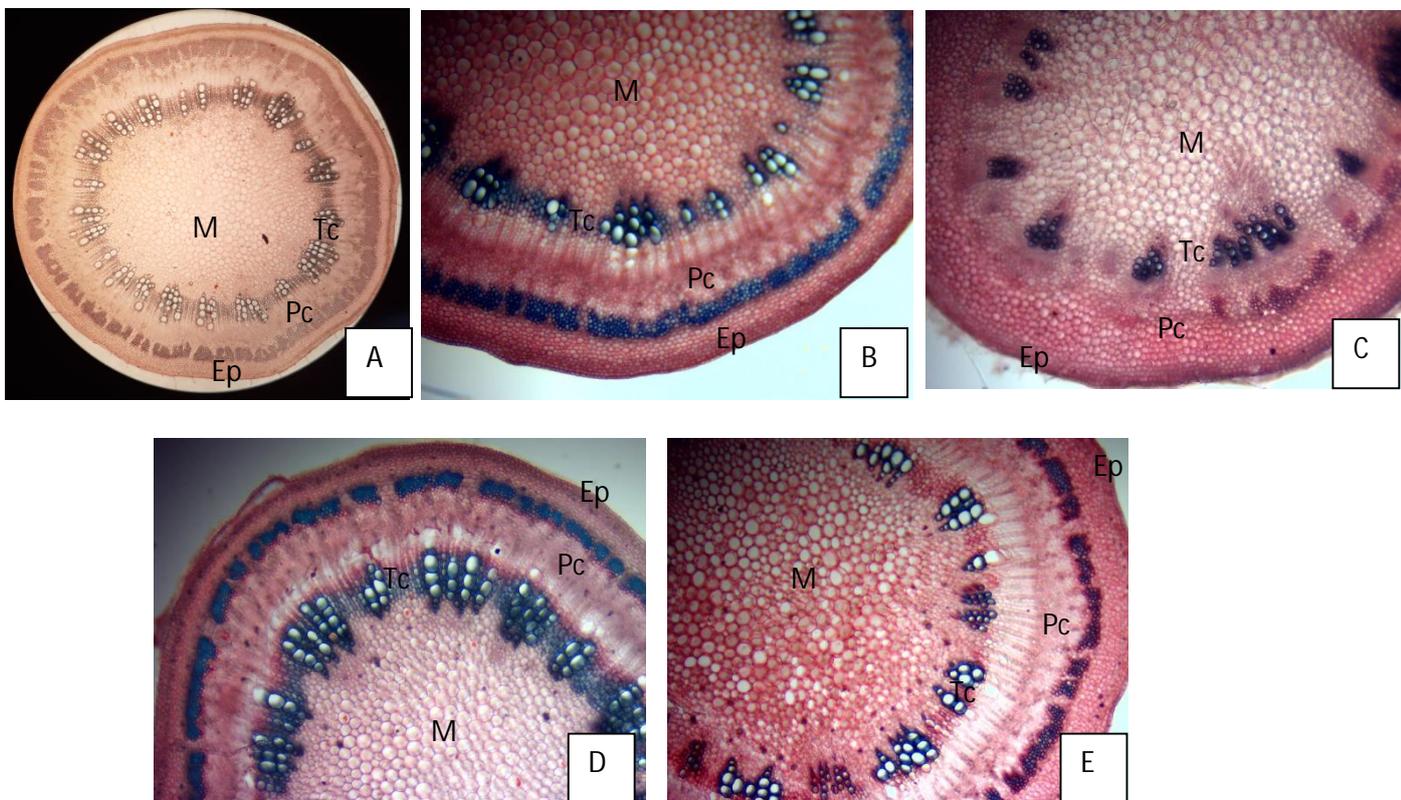


Figure 30 : Observation microscopique de coupes transversales des tiges du *Moringaoleifira*Lam. à différentes concentrations du plomb Gr : X40.

NB : A : 0: mM du Pb; **B:** 3mM du Pb; **C :** 5mM du Pb; **D:** 7mM du Pb; **E:**10mM du Pb

Ep: Epiderme **Pc:** Parenchyme cortical **Tc:** Tissus conducteurs **M:** Moelle

➤ **La structure anatomique d'une racine**

La racine présente une symétrie axiale et nous permet de distinguer deux zones essentielles :

• **Ecorce :** composé de rhizoderme (rh) et parenchyme cortical (Pc)

• **Cylindre central :** composé de l'endoderme (En), péricycle (Pe), tissu conducteur (Xy, Ph) et parenchyme médullaire (Pm).

□ **La structure anatomique d'une tige**

La coupe transversale d'une tige présente plusieurs zones :

• **L'épiderme :** constitué d'une couche de cellules juxtaposées ne contiennent pas de chloroplaste. On peut rencontrer des cellules de collenchyme avant le parenchyme cortical.

• **Le parenchyme cortical :** composé de grandes cellules polyédriques. Les cellules de la périphérie renferment des chloroplastes, mais leur nombre diminue au fur et à mesure qu'on s'enfonce vers l'intérieur.

• **Les tissus conducteurs :** rassemblés xylème et de phloème superposés. Le xylème, vers le centre de la tige et le phloème vers l'extérieur. La différenciation du xylème est centrifuge dans la tige.

- On observe une **moelle** remplie par **parenchyme** formé de cellules très large.

II. Discussion

II.1. Effet du plomb sur la teneur en chlorophylle a, b et totale des feuilles de *Moringaoleifera* Lam.

Les résultats obtenus montrent une diminution de la teneur chlorophylle **a**, **b** et **total** en fonction des doses du plomb appliquées. La teneur en chlorophylle **b** est environ la moitié de celle de la chlorophylle **a** ce qui représente une diminution de 50% de teneur en chlorophylle b que celle enregistrée dans la chlorophylle a, Woznyet al (1995) ; Vodnik et al(1999) ont montré que La chlorophylle b est plus sensible que la chlorophylle a.

Nos résultats montrent que l'excès du plomb diminue la chlorophylle a, b et totale chez *Moringaoleifera* Lam. Ces résultats concordent avec ceux de Khdim (2019), dont elle est remarquée une diminution des teneurs en chlorophylles a, b et total chez l'*Atriplex canescens* soumises au stress par le plomb par rapport à la plante témoin, les résultats de Xionget al. (2006) sur *Brassicapekinensis* ; Hsu et al. (2007) sur *Potamogeton crispus*; Liu et al. (2008) sur *Thlapsicaerulescens* confirment plus que le plomb diminue la teneur en chlorophylle et inhibe la photosynthèse.

La réduction enregistrée de la Chl a et Chl b a été probablement causée par inhibition des enzymes impliquées dans la biosynthèse de la chlorophylle et la RUBISCO qui permet la fixation du CO₂ (Cenkci et al., 2010).

Bazzaz et al., 1975 ; Poskuta et al., 1987 ont montré que l'exposition au Pb conduit à une forte inhibition de la photosynthèse, du rendement photosynthétique, et à une limitation du taux d'assimilation de CO₂, par une fermeture des stomates (Parys et al., 1998). Le mécanisme principal semble être l'inactivation de la synthèse de ces pigments car le plomb se substituant aux ions divalents liés aux métalloenzymes. C'est notamment le cas avec l'-aminolevulinate déshydratase ou ALAD qui est à la base de la synthèse des chlorophylles et dont l'ion zinc (Zn²⁺) est remplacé par plomb (Pb²⁺), ou bien en induisant une carence en ces ions divalents (Foy et al., 1978).

II.2. Effet du plomb sur la teneur en sucres solubles de partie aérienne et racinaire de *Moringaoleifera* Lam.

Les teneurs en sucres solubles sont plus importantes dans la partie aérienne et racinaire chez les plantes du *Moringaoleifera* Lam. traitées avec le plomb comparativement aux plantes témoins. Cette augmentation est plus importante dans la partie aérienne que racinaire des plantes. Ces résultats sont concordants avec ceux qui ont été obtenus par Khdim (2019), où l'accumulation des sucres solubles de l'*Atriplex canescens* augmente dans la partie aérienne et racinaire des plantes soumises au stress par plomb par rapport à la plante témoin. Ces résultats sont concordants aussi avec ceux de Hajjhashemiet al. (2006), dont il est remarquée une augmentation des teneurs en sucre soluble chez *Triticumaestivum* soumises au stress salin par rapport à la plante témoin et même Belarbi (2018) rapporte que l'apport de plomb induit une augmentation importante en sucres solubles chez l'*Atriplex halimus*.

L'accumulation importante des sucres solubles dans la plante stressée au plomb est une réponse au stress métallique contrairement à la plante non stressée où le taux des sucres solubles est faible, car selon Bouzoubaa *et al.* (2001), L'accumulation des sucres solubles pourrait avoir un rôle osmotique empêchant la déshydratation des cellules et le maintien de la balance de la force osmotique pour garder la turgescence et le volume cytosolique aussi élevés que possible. Les sucres solubles participeraient au phénomène d'ajustement osmotique (Arbona *et al.*, 2005).

II.3. Effet du plomb sur la teneur en proline de partie aérienne et racinaire de *Moringaoleifera* Lam.

Les résultats obtenus montrent une diminution des teneurs en proline dans les parties aériennes et souterraines chez les plantes du *Moringaoleifera* Lam. en fonction des doses du plomb appliquées. Les teneurs en proline enregistrées au niveau de la partie aérienne du *Moringaoleifera* Lam. sont faibles que celle enregistrées au niveau des racines. Ces résultats sont semblables à ceux obtenus par Mouriet *et al.* sur *Ammophila arenaria* (L.), elles ont montré que le stress n'est pas homogène pour tous les organes, les réponses physiologiques de ces derniers sont différentes, la quantité de proline est très diminuée depuis les feuilles âgées jusqu'aux jeunes. Tandis que, le traitement de l'*Atriplex canescens* par le plomb entraîne une augmentation de teneur en proline dans les différentes parties de la plante (Khdim, 2019).

L'accumulation de la proline est un résultat de l'inhibition de son oxydation (Flagella *et al.*, 2006), l'augmentation du catabolisme des protéines et/ou une synthèse de nouveau de cet acide aminé (Ben khaled *et al.*, 2003 ; Djeddi, 2006). Selon Hassani *et al.* (2008), cette accumulation permet la protection de la membrane cellulaire et participe à l'ajustement osmotique, chélation et détoxification des métaux, protection des enzymes, régulation de l'acidité cytosolique, stabilisation de la machinerie de la synthèse protéique et piégeage des espèces réactives de l'oxygène (Sharmila et PardhaSaradhi, 2002).

II.3. Effet du plomb sur la structure histologique des racines et tiges de *Moringaoleifera* L

Les résultats des coupes histologiques des racines et des tiges du *Moringaoleifera* Lam. traités par le plomb révèlent qu'il n'y a pas de changements remarquables dans la structure histologique, cela pourrait être à cause des concentrations de

plomb qui ont une toxicité assez faible, car les premiers effets ne provoquent pas de symptômes visibles ceci ne se manifestant qu'en cas de toxicité avancée (Cecchi, 2008).

Le plomb en air peuvent alors être prélevés par le système foliaire et peuvent pénétrer dans la plante à travers la cuticule des feuilles (Greger, 2004). Elle fonctionne comme un faible échangeur de cations. La pénétration des ions à travers la cuticule s'en trouvant favorisée le long de ce gradient (Prasad et Hagemeyer, 1999). La majeure partie du Cd ou du Pb ainsi prélevée par la plante est stockée dans la cuticule et les parois cellulaires, sous forme insoluble et ne migre pas dans le végétal (OFEFP, 1996).

Le plomb en solution est transféré vers la rhizosphère par deux processus, la voie apoplastique emprunte l'apoplasme c'est à dire le continuum extra-cellulaire formé par les parois cellulaires et les espaces vides entre les cellules jusqu'aux vaisseaux de xylème. La seconde, appelé voie symplastique, emprunte le symplasme, c'est-à-dire le continuum intracellulaire formé par les cellules végétales liées entre elles par les plasmodesmes, le plomb se transfère de les cellules racinaires vers les vaisseaux conducteurs.

La paroi cellulaire des racines peut être transportée le plomb vers les parties aériennes via les vaisseaux du xylème, c'est la translocation, mais le plomb n'est pas facilement transportés car il est fortement liés aux cellules racinaires (Kabata-Pendias, 2000). Le transport des ions dans le xylème est un processus très contrôlé, grâce à des protéines membranaires de transport (Prasad et Hagemeyer, 1999). La translocation des éléments dans le xylème peut nécessiter ou non la prise en charge des éléments par des agents complexant ou chélateurs, généralement des ligands organiques de faible taille comme des acides organiques, des acides aminés, des peptides, des sucres ou encore des composés phénoliques (Briat et Lebrun, 1999 ; Tresmel-Schaub et Feix, 2005) Les parois du xylème contiennent également des groupes chargés négativement qui peuvent lier les cations métalliques libres de la sève brute et ainsi freiner voire bloquer leur progression (Senden et Wolterbeek, 1990).

les racines ont tendance à accumuler le plomb, les parties reproductrices (fleurs, fruits, graines) à les exclure et les parties végétatives (tiges et feuilles) sont considérées comme étant intermédiaires (Lasat *et al.*, 2000).

Conclusion

Le problème des sols contaminés par les métaux lourds est aujourd'hui très préoccupant pour les pays émergents, un métal lourd tel que le plomb ne peut pas être biodégradé et donc persiste dans l'environnement pendant de longues périodes. De plus, il est continuellement rajouté dans les sols par diverses activités humaines. Le plomb est l'un des contaminants les plus répandus dans l'environnement toxique, même à faible concentration. Leur accumulation dans l'environnement peut se répercuter sur la santé des êtres humains et des animaux.

Cette étude a fait l'objet d'une évaluation de l'effet de cinq doses du plomb (0, 3, 5, 7, 10 mM) sur les paramètres biochimique et anatomique du *Moringa oleifera* Lam. Les résultats obtenus de notre expérience au laboratoire ont montré que le plomb agit négativement sur les pigments chlorophylliens et la proline du *Moringa oleifera* Lam. entraînant une diminution de la teneur en chlorophylle **a**, **b** et **totale** dans les feuilles des plantes soumises au stress par le plomb, et de la teneur en proline dans la partie aérienne et racinaire des plantes. Tandis que, on a enregistré une accumulation importante des sucres solubles dans la partie aérienne et racinaire des plantes traitées au plomb.

Les résultats des coupes histologiques des racines et des tiges du *Moringa oleifera* Lam. montrent que le plomb n'a aucun effet sur la structure membranaire des différentes parties de la plante, dont aucun changement est enregistré dans la structure des racines et tiges entre les plantes traitées au plomb et les plantes témoins.

Les résultats obtenus sur l'accumulation importante de la proline et de sucres solubles dans la plante stressée qui pourrait présenter les caractéristiques d'une plante modèle pour expliquer les stratégies biochimiques et moléculaires impliquées dans le phénomène de tolérance aux stress et dans la phytoremédiation.

Ces expérimentations peuvent être répétées en ajoutant des chélatants, tels que le DTPA ou bien de l'EDTA pour augmenter la mobilité du plomb, comme une nouvelle méthode qui peut affecter la phytoremédiation des sols contaminés par le plomb.

Références bibliographiques

❖ A

- **Abasse A.T et Oni O. 2001.** Etude de quelques aspects de la biologie, Reproductive de *Moringa oleifera* Lam. Dans le Sud-Niger, 2p.
- **Aduayi-akue A.A et Gnandi k. 2015.** Evaluation de la pollution par les métaux lourds des sols et de la variété locale du maïs *Zea mays* dans la zone de traitement des phosphates de Kpémé (Sud du Togo).
- **Abdelly C. 2006.** Bioremédiation /Phytoremédiation, Institut supérieur de l'éducation et de la formation continue, UNIVERSITE DE TUNIS.
- **Ademe. 2010.** Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie ; <http://www2.ademe.fr/servi et/KB ase Show ? Sort = 1 & ci d=96& m=3 & cati d= 10157>.
- **Adriano D.C. 2001.** Trace elements in terrestrial environments : biogeochemistry, bioavailability and risks of metals. *2nd Edition Springer-Verlag*, New York, Berlin, Heidelberg, p 867.
- **Ahmad P. 2015.** Plant metal interaction: emerging remediation techniques. Elsevier, p. 652
- **Alloway B. 1995.** Heavy metals in soils, Blackie Academic and Professional. 2nd Ed
- **Ann Peer W, Baxter I.R, Richards E.L, Freeman J.L, Murphy A.S. 2005.** Phytoremediation and hyperaccumulator plants. *Topics Current Genetic*.**14**, 299-340.
- **Atakpama W, Kponor E. G. E, Kanda M, Dourma M, M'tékounm N, Batawila K and Akpagana K. 2014.**"*Moringa oleifera* Lamarck (Moringaceae): une ressource phylogénétique à usage multiple."Sciences de la vie, dela terre et agronomie, 2(1).
- **Aranguren M. 2008.** Contamination en métaux lourds des eaux de surface et des sédiments du val de Milluni(Andes Boliviennes) par des déchets miniers Approches géochimique, minéralogie et hydrochimique .Planète et Univers. Université Paul Sabatier-Toulouse III.
- **Arbona V, Marco A.J, Iglesias D.J, Lopez-Climent M.F, Talon M, Gomez-Cadenas A. 2005.** Carbohydrate depletion in roots and leaves of salt-stressed potted *Citrus clementina* L.*Plant Growth Regulation*. **46**, 153-160.
- **Braud A, Equel K.J, Vieille E, Tritter A and Lebeau T. 2006.** Changes in extractability of Cr and Cr in a polycontaminated soil after bioaugmentation with microbial producers of biosurfactants, oraganic acids and siderophores. Laboratoire Gestion des Risques et Environnement (EA 2334), Universite de Haute-Alsace, Antenne de Colmar, France.
- **Arshad M. 2009.** Phytoextraction du plomb par les Pélargoniums odorants : Interactions sol-plante et mise en place d'outils pour en comprendre l'hyperaccumulation. Laboratoire Écologie fonctionnelle et Environnement - EcoLab (Toulouse, France).

-
- **Azzouz F. 2011.** Effect of the interaction lead-salinity on the physiological responses and biochemical evidence of a halophyte (*Atriplex halimus* L.) and a glycophyte (*Vicia faba* L.). Memory of Magisterium. p 65.

❖ B

- **Baize D. 1997.** Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols. Références et stratégies d'interprétation. Editions INRA. Paris. France, p 408.
- **Baize D, Tercé M. 2002.** Les éléments traces métalliques dans les sols. Approches fonctionnelles et spatiales. INRA Editions, Paris, p 565.
- **Baker A.J.M, Walker P.L. 1989.** Physiological responses of plants to heavymetals and the quantification of tolerance and toxicity. *Chemical Speciation and Bioavailability*. **1**, 717.
- **Baker A.J.M, Morel J.L, Schwartz C. 1997.** Des plantes pour dépolluer les friches industrielles. *Biofutur*. **169**, 30-33.
- **Baker A.J.M, McGrath S.P, Reeves R.D, Smith J.A.C. 2000.** Métal hyper- accumulator plants:164 a review of the ecology and physiology of a biological resource for phytoremediation of metalpolluted soils. In N Terry, G Banuelos, eds, Phytoremediation of contaminated soil and water. Lewis Publishers CRC, Boca Raton. 85-107.
- **Barber S.A.1984.** Soil Nutrient Bioavailability: a mechanistic approach. John Wiley and Sons, New York, Etats-Unis.
- **Barber S.A. 1995.** Soil Nutrient Bioavailability: A Mechanistic Approach. 2nd Ed. John Wiley, New York
- **Bazzaz F.A, Carlson R.W, Rolfe G.L. 1975.** "Inhibition of Corn and Sunflower Photosynthesis by Lead." *Physiologia Plantarum* **34** : 326-329.
- **Belarbi A. 2018.** Physiological and phytochemical study of tolerance to heavy metals Pb, Cr (III) and Cr (II) by *Atriplex halimus* L. Mostaganem University, Algeria 179-189.
- **Belatik A. 2014.** Étude de l'effet toxique du plomb sur l'activité photo synthétique des plantes. Université du Québec, Trois-Rivières.
- **Belkebir S. 2018.** Évaluation de l'effet insecticide, sur les pucerons, de l'extrait aqueux de feuille et fleur de *Moringa oleifera* Lam. Mémoire de Master en chimie. Université Tlemcen, Algérie.
- **Ben Khaled L, Morte Gomez A, Honrubia M, Oihaba A. 2003.** Effet du stress salin en milieu hydroponique sur le trèfle inoculé par le Rhizobium. *Agronomie*. **23 (7)**, 553- 560.
- **Bensaha S. 2010.** La décontaminationdes eaux usées sur un suppoort naturel. Mémoire de Magister en chimie. Université Tlemcen, Algérie.
- **Bert V, Deram A. 1999.** Guide des phytotechnologies : utilisation des plantes dans la dépollution et la réhabilitation des sites contaminés par les métaux lourds, France, Environnement et Développement alternatif.

-
- **Bhargava A, Carmona F.F, Bhargava M, Srivastava S. 2012.** Approaches for enhanced phytoextraction of heavy metals. *Journal of Environmental Management* p 103-120.
 - **Bourguignon J. 2016.** La phytoremédiation. Les défis du CEA numéro 208.
 - **Bourrelier P et Berthelin J. 1998.** Contamination des sols par les éléments traces : les risques et leur gestion. Rapport de l'Académie des sciences Ed. Lavoisier, Paris.p 42.
 - **Bouzoubaa Z, El Mourid M, Karrou M, El Gharous M.R. 2001.** Manual of chemical and biochemical analysis of the plants. The Deroua Experimental Station of Institut National de Recherche Agronomique Morocco.
 - **Braud A. 2007.** Procédé de phytoextraction couplé à la bioaugmentation d'un sol agricole polycontaminé par du chrome, du mercure et du plomb. Université de Haute AlsaceMulhouse.
 - **Briat J.F, Lebrum M. 1999.** Plant responses to metal toxicity. *Plant Biology Pathology*.322, 43–54.
 - **Brooks R.R, Lee J, Reeves R.D, Jaffré T. 1977.** Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium specimens of indicator plants. *Journal of Geochemical Exploration*. 7, 49-57.
 - **Brooks R.R, Chambers M.F, Nicks L.J, Robinson B.H. 1998.** « Phytomining », *Trends in Plant Science*. 3(9), 359-362.
 - **Brown S.L, Chaney R.L, Angle J.S, Baker A.J.M. 1995.** Zinc and cadmium uptake by hyperaccumulator *Thiaspia caerulescens* grown in nutrient solution. *Soil Science Society of America Journal* .59 (1), 125-133.
 - **Brugnoli E, Lauteri M.R. 1991.** Effects of salinity on stomatal conductance, photosynthetic capacity and carbon isotope discrimination of salt tolerant (*Gossypium hirsutum* L.) and salt sensitive (*Phaseolus vulgaris* L.) C3 non halophytes. *Plant Physiology*. 95, 628-635.
 - **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.

❖ C

- **Cecchi M, Dumat C, Alric A, Felix-Faure B, Pradere P, Guisresse M. 2008.** Multi-metal contamination of a calcic cambisol by fallout from a lead-recycling plant. *Geoderma*. 144(1– 2), 287–298.
- **Cenkci S, Cigerci I.H, Yildiz M, Özay C, Bozdog A, Terzi H. 2010.** Pb contamination reduces chlorophyll biosynthesis and genomic template stability in *Brassica rapa* L. *Environmental and Experimental Botany*. 67(3), 467-473.

-
- **Chaudhry T.M, Hayes W.J, Khan A.G, Khoo C.S. 1998.** Phytoremediation - focusing on accumulator plants that remediate metalcontaminated soils. *Australian Journal of Ecotoxicology*. 4, 37-51
 - **Chaney R.L, Malik M, Li Y.M, Brown S.L, Brewer E.P, Angle J.S, Baker A.J.M. 1997.** Phytoremediation of soil metals. *Curr. Opin. Biotechnol.* 8 : 279-284.
 - **Clemens S, Palmgren MG, Krämer U. 2002.** A long way ahead: understanding and engineering plant metal accumulation. *Trends Plant Science*. 7, 309-315.
 - **Cloutier G, Lefrançois P.J. 2005.** Les sols contaminés par des métaux lourds : Distribution géochimique et techniques de restauration. *Vecteur environnement*. Volume 38. Numéro 3.
 - **Cooper E.M, Sims J.T, Cunnigham S.D, Huang J.W, Berti W.R. 1999.** Chelate assisted phytoextraction of lead from contaminated soil. *Journal of Environmental Quality*. 28, 1709-1719.
 - **Consoglobe . 2016.** Statistiques mondiales en temps réel, Production et consommation mondiale de plomb. <https://www.planetoscope.com>
 - **Crine M. 1993.** Le traitement des eaux industrielles chargées en métaux lourds. *Turbune de l'eau*, numéro 561.

❖ D

- **Dechamp C, Meerts P. 2003.** La phytoremediation : Panacee pour l'environnement ou menace pour la biodiversite . *Les Naturalistes belges* .82, 135-148.
- **Dabouineau L, Lamy Y et Collas P. 2005.** phytoremédiation et phytorestauration ou l'utilisation des plantes pour la dépollution et l'épuration des eaux usées. *Dossier environnement*. P2.
- **Diallo B.A. 2019.** Fractions chimiques du plomb dans le sol et phytoextraction du plomb par le saule (*Salix miyabeana*) cultivé dans un sol calcaire riche en éléments traces métalliques traité avec des amendements acides. Doctorat en sols et environnement. Québec, Canada.
- **Djeddi H. 2006.** Use of the waters of a wastewater treatment plant for the irrigation of forest tree species in urban areas. *Memory of Magisterium*. Université Mentouri Constantine. p 92.
- **Do Nascimento C.W.A et Xing B. 2006.** Phytoextraction : A review on enhanced metal availability and plant accumulation. *Sci Agric (Piracicaba, Braz)*. 63: 299-311.
- **Drazkiewicz M. 1994.** "Chlorophyll-occurrence, functions, mechanism of action, effects of internal and external factors." *Photosynthetica*. 30: 321-331.

❖ E

- **Ebbs S, Uchil S. 2008.** Cadmium and zinc induced chlorosis in Indian mustard [*Brassica juncea* (L.) Czern] involves preferential loss of chlorophyll b. *Photosynthetica*. **46**, 49-55.
- **EPA. 2000.** Introduction to phytoremediation. Washington: U.S. Environmental Protection Agency. EPA/600/R-99/107.

❖ F

- **F.A.O. 2008.** Annuaire statistique de la FAO.
- **Flagella Z, Trono D, Pompa M, Di Fonzo N, Pastore D. 2006.** Seawater stress applied at germination affects mitochondrial function in durum wheat (*Triticum durum*) early seedlings. *Funct. Plant Biology*. **33**, 357-366.
- **Fodor F, Cseh E, Varga A, Zárny G.Y. 1998.** Lead uptake, distribution, and remobilization in cucumber. *Journal of Plant Nutrition*. **21**, 1363-1373.
- **Foidl N, Makkar H.P.S, Becker K. 2001.** Potentiel de *Moringa oleifera* en agriculture et dans l'industrie, 39p. Disponible sur <http://www.moringanews.org>.
- **Foy C.D, Chaney R.L et White M.C. 1978.** "The Physiology of Metal Toxicity in Plants. " *Annual Review of Plant Physiology* **29** :511-566.
- **Fuglie L.J. 2001.** Introduction to the multiple uses of *Moringa* (7-10) In: Fuglie L J (editor). *The miracle tree: the multiple attributes of Moringa*.-Wageningen : CTA; Dakar: CWS.-177p.

❖ G

- **Gagné N. 2000.** Effet de la distribution géochimique du Pb, du Zn et du Cr sur le *Taraxacum officinale*, le *trifolium repens* et le pâturin du Canada. Université Laval, Québec.
- **Gamatie M, De saint sauveur A. 2005.** Fiche technico-économique sur les conditions de production et commercialisation de feuilles fraîches de *Moringa* au NIGER, 7p. Disponible sur <http://www.moringanews.org>.
- **Gandji K, Chadare F.J, Idohou R, Salako V.K, Assogbadjo A.E and Glèlè Kakai R.L. 2018.** STATUS AND UTILISATION OF *Moringa oleifera* Lam: A REVIEW. Université d'Abomey-Calavi, République du Bénin.
- **Garnier R. 2005.** Toxicité du plomb et de ses dérivés, EMC (Elsevier Masson SAS) Pathologie Professionnelle et de l'Environnement; p. 67-88.
- **Ghosh, M., Singh, S. 2005.** A review on phytoremediation of heavy metals and utilization of it's by products. *Asian J Energy Environ*, **6**, (4), 18
- **Gisbert C, Ros R, De Haro A, Walker D.J, Bernal M.P, Serrano R, Navarro-Aviño J. 2003.** A plant genetically modified that accumulates Pb is especially promising for phytoremediation. *Biochemical and Biophysical Research communication* **303**: 440-445.

- **Greger M. 2004.** Métal availability and bioconcentration on plants. In Prasad, M N V & Hagemayer, J (Eds) Heavy métal stress in plants: from molécules to ecosystems, Second Edition Springer-Verlag, Berlin, 231-251.

❖ H

- **Hakeem K., Sabir M., Ozturk M., Mermut A.R. 2014.** Soil remediation and plants: prospects and challenges. Academic Press.
- **Hassani A, Dellal A, Belkhodja M, Kaid M. 2008.** Effet de la Salinité sur l'eau et certains osmolytes chez l'orge (*Hordeum vulgare* L.). *European Journal of scientific Research.*, **23** (1), 61-69. **Hsu YT, Kao CH. 2007.** Cadmium-induced oxidative damage in riceleaves is reduced by polyamines. *Plant Soil.* 291, 27-37.
- **Hubert M, Fakeye. 2008.** « ÉTUDE DE FAISABILITÉ DU DÉVELOPPEMENT DE LA FILIÈRE MORINGA OLEIFERA ». Document d'origine la direction de la Coopération Suisse au Bénin.

❖ J

- **Jahn. 2003.** L'arbre qui purifie l'eau: Culture de *Moringa* spp au Soudan [en ligne]. La génétique et les forêts d'avenir, n°152, Unasylva, 6 p. Cité sur <http://www.fao.org>
- **Jarup L. 2003.** Hazards of heavy metal contamination .Br Med Bull. 68(1) :167-182.
- **Jemal F, Ghorbal M.H. 2002.** Phytoremediation. Revue H. T. E. N° 122.

❖ K

- **Kabata-Pendias A, Pendias K. 2001.** Trace elements in soils and plants. Third Edition. CRC Press. Boca Raton, USA.
- **Kabata-Pendias A, Pendias H. 2000.** Trace elements in soils and plants, Etats Unis, CRC Press (3^e édition).
- **Kabata-Pendias A. 2011.** Trace Elements in Soils and Plants. 4th edition. Boca Raton, Florida.
- **Karataglis S.S. 1981.** Influence of the soil Ca on the tolerance of *Festuca rubra* population against toxic metals. *Phyton* 21: 103-113.
- **Khdim I. 2019.** Phytoremédiation par l'Atriplex planté dans des sols enrichis en cuivre, zinc, plomb et cadmium. Université de Mostaganem. Algérie
- **Kokou K, Broin M et Joet T. 2001.** Recherches agronomiques et agroforestières sur *Moringa oleifera* Lam. Au Togo. Laboratoire de Botanique et D'Ecologie Végétale, Faculté des sciences, Université du Bénin, 6p. Disponible sur [http : //www.john-libbey-eurotest.fr/fr/revues/agro-biotech](http://www.john-libbey-eurotest.fr/fr/revues/agro-biotech).
- **Koller E. 2004.** Traitement des pollutions industrielles, Ed. Dunod, Paris.
- **Kopittke P.M, Colin J.A, Kopittke R.A, Menzies N.W. 2007.** Toxic effects of Pb²⁺ on growth of cowpea (*Vigna unguiculata*). Environmental Pollution, in press.

-
- **Kumar Gupta S, Kumar B, Srinivasan B.P, Nag TC, Srivastava S, Saxena R. 2013.** Retinoprotective effects of *Moringa oleifera* via antioxidant, anti-inflammatory, and antiangiogenic mechanisms in streptozotocin-induced diabetic rats. *J. Ocul. Pharmacol. Ther.* 29, 419–426. doi:10.1089/jop.2012.0089

- **Kupper H, Kupper F, Spiller M. 1996.** Environmental relevance of heavy metal substituted chlorophylls using the example of water plants. *Journal of Experimental Botany* 47: 259-266.

❖ L

- **Laleye O.A.F, Ahissou H, Olounlade A.P, Azando E.V.B, Laleye A. 2015.** Etude bibliographique de trois plantes antidiabétiques de la flore béninoise: *Khaya senegalensis* (Desr) A. Juss (Meliaceae), *Momordica charantia* Linn (Cucurbitaceae) et *Moringa oleifera* Lam (Moringaceae). *International Journal of Biological and Chemical Sciences.* 9(5): 2682- 2700.

- **Laperche V, Dictor M.C, Clozel-Leloup B et Baranger P. 2004.** Guide méthodologique. du plomb, appliqué à la gestion des sites et sols pollués. BRGM/RP- 52881-FR.

- **Lasat M.M. 2002.** Phytoextraction of toxic metals: a review of biological mechanisms. *Journal of Environmental Quality*, 31: 109-120.

- **Liu M.Q, Yanai J, Jiang R.F, Zhang F, McGrath S.P, Zhao F.J. 2008.** Does cadmium play a physiological role in the hyperaccumulator *thlaspi caerulescens* ? *Chemosphere*, 71(7), 1276-1283.

- **Louni S. 2009.** Extraction et caractérisation physicochimique de l'huile de graines de *Moringa oleifera*. Mémoire de Magister, Ecole Nationale Supérieure Agronomique El-Harrach, Algérie 13, 14p

- **Loué A. 1993.** Oligo-éléments en agriculture. Ed Nathan, p45-177.

- **Lu S., Du Y, Zhong D, Zhao B, Li X, Xu M, Li Z, Luo Y, Yan J, Wu L. 2012.** Comparison of Trace Element Emissions from Thermal Treatments of Heavy Metal Hyperaccumulators. *Environmental Science & Technology*, 46: 5025-5031.

❖ M

- **Makkar H.P.S et Becker K. 1997.** Nutrients and antiquality factors in different morphological parts of the *Moringa oleifera* tree. *Journal of Agricultural Science, Cambridge* 128, 311-322, disponible sur <http://www.moringanews.org>.

- **Marc P and Gautheyrou J. 2003.** L'analyse du sol. Minéralogique, organique et minérale. Springer, 998 p.

- **Martinez J.P, Silva H, Ledent J.F, Pinto M. 2007.** Effect of drought stress on the osmotic adjustment, cell wall elasticity and cell volume of six cultivars of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *European journal of agronomy.* 26 (1), 30-38.

-
- **Maynaud. 2012.** Adaptation aux métaux lourds de populations de rhizobia impliquées dans la phytostabilisation de déblais miniers : Identification des mécanismes d'adaptation au Zn et au Cd, et structuration des populations de rhizobia adaptées au site miniers, thèse doctorat Université de Montpellier.
 - **Mbikay M. 2012.** Therapeutic potential of moringa oleifera leaves in chronic hyperglycemia and dyslipidemia : a review. *Front. Pharmacol* 3 :24.
 - **McGrath S. 1998.** Phytoextraction for soil remediation. In *Plants that hyperaccumulate heavy metals: their role in phytoremediation, microbiology, archaeology, mineral exploration and phytomining*, Brooks, R., Ed. CAB International: New York, 261-288.
 - **Mckenzie A.B. 1997.** Isotope evidence of the relative retention and mobility of lead, and radiocesium in swedish ombrotrophic peats. *The science of the total environment*, **203(2)**, 115-127.
 - **Messaoud A. 2015.** Culture de la Moringa à Bechar : réussite des essais à Tabelbala, Le quotidien le courrier d'Algérie, édition 10/11/2015, consulté le 02/05/2021
 - **Morel J.R. 1985.** Contribution à l'étude des transferts de métaux lourds dans le système sol-plante. Thèse de doctorat Institut National Polytechnique de Lorraine.
 - **Morel J.L. 2012.** Phytoremédiation des sols contaminés : des plantes pour guérir les sols. *La chimie et la nature*, Édition Diffusion Presse Sciences, pp.157-184
 - **Morgan J.J, Stumm W. 1991.** Chemical process in the environment. Edit Merian, VCH, Weinheim, Germany.
 - **Morton J.F. 1991.** The horseradish tree, *Moringa pterygosperma* (Moringaceae) a boon to arid lands? *Economic botany*, 45(3), 318-333.
 - **Mouri C, Benhassaini H, Bendimered F.Z, Belkhodja M. 2012.** Variation saisonnière de la teneur en proline et en sucre soluble chez l'oyat (*Ammophila arenaria* (L.) Link) provenant du milieu naturel de la cote ouest de l'Algérie, *Acta Botanica Gallica*, 159:1,127-135
 - **Moyo B, Masika P J, Hugo A, Muchenje V. 2011.** Nutritional characterization of *Moringa* (*moringa oleifera* Lam) leaves. *African journal of biotechnology*. Vol 10(60).

❖ N

- **Ndabigengesere A, Narasiah K.S, Talbot B.G. 1995.** Active agents and mechanism of coagulation of turbid waters using *Moringa oleifera*. *Wat. Res.* 29:703-710.
- **Nduwayezu I. 2010.** Adsorption et désorption du plomb dans un sol sablonneux traité par divers amendements. Université du Québec. CANADA.
- **Nies D.H. 1999.** Microbial heavy-metal resistance. *Applied Microbiology and Biotechnology* **51**: 730- 750.
- **Nriagu J, Becker C. 2003.** Volcanic emissions of mercury to the atmosphere: global and regional inventories. *The Science of The Total Environment* **304**: 3-12.

❖ O

- **OFEFP. 1996.** Sols pollués-métaux lourds et plantes bioindicatrices. Documents Environnement n° 58, Sol, Berne, Suisse.

❖ P

- **Pais I and J Benton Jones. 2000.** “The handbook of Trace Elements”. Boca Raton, FL, St. Lucie Press 223 p.
- **Päivöke A.E.A. 2002 .** Soil lead alters phytase activity and mineral nutrient balance of *Pisum sativum*. *Environmental and Experimental Botany* 48: 61-73.
- **Parys E, Romanowska E, Siedlecka M, Poskuta J.W. 1998.** The effects of lead on photosynthesis and respiration in detached leaves and mesophyll protoplasts of *Pisum sativum*. *Acta Physiologiae Plantarum* 20: 313-322.
- **Patra M, Bhowmick N, Bandopadhyay B, Sharma A. 2004.** Comparison of mercury, lead and arsenic with respect to genotoxic effects on plant systems and the development of genetic tolerance. *Environmental and Experimental Botany*, 52: 199-223.
- **Pauget B. 2015.** Détermination des facteurs du sol modulant la biodisponibilité et l’accumulation des métaux pour l’escargot (*Cantareus aspersus*). Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, France, p. 173
- **Pelikan W, Lescourret L. 2008.** Sept métaux: de l’action des métaux dans le cosmos, la terre et l’homme. Huningue: IFEMA, Institut de formation et d’édition pour la médecine anthroposophique. ISBN 978-2-9511467-5-4
- **Pichard A. 2002.** Plomb et ses dérivés, fiche INERIS.
- **Philippe G, Vallerie L, Dominique G. 2012.** Plomb et santé: importance de la spéciation. *Physiologia Plantarum*, 116: 148-154.
- **Pilon-Smits E. 2005.** Phytoremediation, *in: Annual Review of Plant Biology*. 15-39.
- **Poskuta J.W, Parys E et Romanowska E. 1987.** The effects of lead on the gaseous exchange and photosynthetic carbon metabolism of pea seedlings. *Acta Soc. Bot. Pol* 56 : 127-137.
- **Pourrut B, Perchet G, Silvestre J, Cecchi M, Guiresse M, Pinelli E. 2007.** Potential role of NADPH-oxidase in early steps of lead-induced oxidative burst in *Vicia faba* roots. *Journal of Plant Physiology*, in press.
- **Pousset J. 1999.** le *Moringa oleifera* est une plante miracle. Disponible sur <http://www.Essentialdrugs.org>
- **Prasad M.N.V, Hagemeyer F. 1999.** Heavy Métal Stress in Plants: From Molécules to Ecosystems. Berlin, Springer-Verlag.

❖ R

- **Rajangam J, Azahakia M.R.S, Thangaraj T, Vijayakumar A , Muthukrishna N. 2001.** Production et utilisation du Moringa en Inde: la situation actuelle, 9p. Disponible sur <http://www.moringanews.org>.
- **Ralezo Maevalandy A. 2006 -** Moringa oleifera, Antanario Madagacar
- **Rathinasabapathi B, Sigua C, Ho I, Gage D.A. 2000.** Osmoprotectant B-alanine betaine synthesis in the plumbaginaceae : S-adenosyl-L-methionine dependent N-methylation of b-alanine to its betaine is via N-methyl and N,N-dimethyl b-alanines. *Physiologia Plantarum*. **109**, 225-231.
- **Rauser W.E. 1995.** Phytochelatins and related peptides (structure, biosynthesis, and function). *Plant Physiology* **109**: 1141-1149.
- **Rauser W.E. 1999.** Structure and function of metal chelators produced by plants: the case for organic acids, amino acids, phytin and metallothioneins. *Cell Biochemistry and Biophysics*, 31: 19-48.
- **Roloff A, Weisgerber H, Lang U, Stimm B. 2009.** Moringa oleifera Lam., 1785 : Enzyklopädie der Holzgewächse – 40. Erg.Lfg. 6/05 . WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim ISBN: 978-3-527-32141-4 .
- **Remon E. 2006.** Tolérance et accumulation des métaux lourds par la végétation spontanée des friches métallurgiques : vers de nouvelles méthodes de bio-dépollution - document. Université Jean Monnet -Saint-Étienne, Saint-Étienne. **Romanowska et al., 2002**
- **Rosa. 1993.** Moringa oleifera : un arbre parfait pour les jardins à la maison .Forest service ,Dept of Agriculture ,U.S.A. cité le 12/11/2013 sur WWW.winrock.org.

❖ S

- **Saint sauveur A. Broin M. 2010.** Produire et transformer les feuilles de Moringa, imprimerie Horizon à Gémenos, 69p. Disponible sur <http://www.moringanews.org>.
- **Salt D.E, Smith R.D and Raskin I. 1998.** Phytoremediation. *Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 49, 643–68.
- **Schen Z.G, Zhao F.J, McGrath S.P. 1997.** Uptake and transport of zinc in the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* and the non-hyperaccumulator *Thlaspi ochroleucum*. *Plant Cell Environment*. **20**, 898-906.
- **Schützendübel A, Polle A. 2003.** Heavy metal signalling in plants: linking cellular and organismic responses. In H Hirt, K Shinozaki, eds. *Plant Responses to Abiotic Stress*, Springer-Verlag, Berlin. **4**, 187-215.
- **Senden M.H.M, Wolterbeek H.A.T. 1990.** Effect of citric acid on the transport of cadmium through xylem vessels of excised tomato stem-leaf system. *Acta Botanica Neerlandica*. **39**, 297-303.

-
- **Senou I. 2014.** Phytoextraction du cadmium, du cuivre, du plomb et du zinc par cinq espèces végétales (*Vetiveria nigriflora* (Benth.), *Oxytenanthera abyssinica* (A. Rich.) Munro, *Barleria repens* (Ness), *Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf et *Lantana camara* Linn. Cultivées sur des sols ferrugineux tropicaux et vertiques, UNIVERSITE OLYTECHNIQUE DE BOBO-DIOULASSO (UPB).
 - **Seregin I.V, Ivaniov V.B. 1997.** Histochemical investigation of cadmium and lead distribution in plants. *Fiziol. Rast.* **44**, 915-921.
 - **Seregin I.V, Ivaniov V.B. 2001.** Physiological Aspects of Cadmium and Lead Toxic Effect on Higher plants. Russian journal of plant physiology, Vol.48, No. 4, 2001, pp. 523-544.
 - **Shah K, Nongkynrih J.M. 2007.** Metal hyperaccumulation and bioremediation. *Biologia Plantarum.* **51**, 618-634.
 - **Sharmila P, Pardha Saradhi P. 2002.** Proline accumulation in heavy metal stressed plants: An adaptive strategy. In: Physiology and Biochemistry of Metal Toxicity and Tolerance in Plants. Prasad M. N. V. et Strzalka K. (Eds), 179-199.
 - **Sies H. 1991.** Oxidative stress: introduction. In: Sies H. (ed), Oxidative stress, Oxidants and Antioxidants. Academic Press, San Diego, I-XV, 650 p.
 - **Sirven J.B. 2006.** Détection de métaux lourds dans les sols par spectroscopie d'émission sur plasma induit par laser. Université de Bordeaux.
 - **Sobanska S. 1999.** Étude de la spéciation du plomb et du zinc dans des poussières industrielles et dans un sol contaminé. Approche par méthodes spectroscopiques. Thèse de doctorat, Université Lille 1, p. 394.
 - **Sposito G, Lund L.J et Chang A.C. 1982.** Trace metal chemistry in arid-zone field soils amended with sewage sludge : In Fractionation of Ni, Cu, Zn, Cd, and Pb in solid phases. *Soil Sci Soc Am J.* **46** (2): 260-264.
 - **Sterckeman T, Douay F, Proix N, Fourrier H. 2000.** Vertical distribution of Cd, Pb, and Zn in soils near smelters in the North of France. *Environmental Pollution* **107**: 377-389.
 - **Susarla S, Medina V.F et McCutcheon S.C. 2002.** Phytoremediation : an ecological solution to organic chemical contamination. *Ecological Engineering*, Vol 18 :647-658.
 - **Szabados T.H.E, Savoure A. 2009.** Proline: a multifunctional amino acid. *Trends in Plant Science.* **15**(2), 89- 97.
- ❖ **T**
- **Tester M, Leigh R.A. 2001.** Partitioning of nutrient transport processes in roots. *Journal of Experimental Botany.* **52**, 445-457.
 - **Tolra R.P, Poschenrieder C, Barcelo J. 1996.** Zinc hyperaccumulation in *Thlaspi caerulescens*. Influence on organic acids. *Plant Nutrition.* **19**, 1541-1550.

-
- **Tong Y.P, Kneer R, Zhu Y.G.** 2004. Vacuolar compartmentalization: a second-generation approach to engineering plants for phytoremediation. *Trends in Plant Science*: 9: 7-9.

- **Tremel-Schaub A, Feix I.** 2005. Contamination des sols. EDP Sciences & ADEME Edition, 413 p

❖ V

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

- **Vodnik D, Jentschke G, Fritz E, Gogala N et Godbold D.L.** 1999. "Root-applied cytokinin reduces lead uptake and affects its distribution in norway spruce seedlings." *Physiologia Plantarum* 106: 75-81.

❖ w

- **Wao A, Khare S, Ganguly S.** 2011. Unconventional plant-based remediation technologies for soil pollution at contaminated sites in Bhopal, *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 1: 41-44.

- **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.

❖ X

- **Xiong, Z.T.** 1997. Bioaccumulation and physiological effects of excess lead in a roadside pioneer species *Sonchus oleraceus* L. *Environmental Pollution* 97: 275–279.

- **Xiong Z, Zhao F, Li M.** 2006. Lead toxicity in *Brassica pekinensis* Rupr: effect on nitrate assimilation and growth. *Environmental Toxicology*. **21(2)**, 147-153.

❖ V

- **Zaier H, Ghnaya T, Lakhdar A, Baioui R, Ghabriche R, Mnasri M, Sghair S, Lutts S, Abdelly C.** 2010. Comparative study of Pb-phytoextraction potential in *Sesuvium portulacastrum* and *Brassica juncea*: tolerance and accumulation. *Journal of Hazardous Materials*. **183**, 609-615.

❖ site web

- <http://www.moringanews.org/> (site en français)

Annexe

Analyse de la variance des paramètres étudiés (Stat Box 6.5)

Tableau 1 : Analyse de variance de l'effet du plomb sur la teneur en chlorophylle **a** du *Moringa oleifera* Lam.

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	337,73	24	14,072				
VAR.FACTEUR 1	129,928	4	32,482	3,126	0,03747		
VAR.RESIDUELLE 1	207,802	20	10,39			3,223	33,47%

Tableau 2 : Analyse de variance de l'effet de plomb sur la teneur en chlorophylle **b** du *Moringa oleifera* Lam.

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	197,713	24	8,238				
VAR.FACTEUR 1	20,745	4	5,186	0,586	0,67881		
VAR.RESIDUELLE 1	176,969	20	8,848			2,975	55,08%

Tableau 3 : Analyse de variance de l'effet de plomb sur la teneur en chlorophylle **totale** du *Moringa oleifera* Lam.

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	437,571	24	18,232				
VAR.FACTEUR 1	211,73	4	52,932	4,688	0,0079		
VAR.RESIDUELLE 1	225,841	20	11,292			3,36	22,36%

Tableau 4 : Analyse de variance de l'effet de plomb sur la teneur en sucres solubles de partie aérienne du *Moringa oleifera* Lam.

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	0,101	24	0,004				
VAR.FACTEUR 1	0,015	4	0,004	0,876	0,49724		
VAR.RESIDUELLE 1	0,086	20	0,004			0,066	44,41%

Tableau 5 : Analyse de variance de l'effet de plomb sur la teneur en sucres solubles de partie racinaire du *Moringa oleifera* Lam.

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	0,101	24	0,004				
VAR.FACTEUR 1	0,041	4	0,01	3,356	0,02937		
VAR.RESIDUELLE 1	0,061	20	0,003			0,055	49,81%

Tableau 6 : Analyse de variance de l'effet de plomb sur la teneur en proline de partie aérienne du *Moringa oleifera* Lam.

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	2,354	24	0,098				
VAR.FACTEUR 1	1,042	4	0,26	3,968	0,01576		
VAR.RESIDUELLE 1	1,313	20	0,066			0,256	36,34%

Tableau 7 : Analyse de variance de l'effet de plomb sur la teneur en proline de partie racinaire du *Moringa oleifera* Lam.

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	2,157	24	0,09				
VAR.FACTEUR 1	1,514	4	0,378	11,768	0,00005		
VAR.RESIDUELLE 1	0,643	20	0,032			0,179	29,24%