

République Algérienne Démocratique et Populaire

Université Abdelhamid Ibn Badis  
Mostaganem  
Faculté des Sciences de la  
Nature et de la Vie



جامعة عبد الحميد بن باديس  
مستغانم  
كلية علوم الطبيعة و الحياة

DEPARTEMENT DE BIOLOGIE

LABORATOIRE DE BIODIVERSITE ET CONSERVATION DES EAUX ET DES SOLS

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Présenté par

SATTAH Sihame

HALOUI Faiza

Pour l'obtention du diplôme de

**MASTER EN BIOLOGIE**

**Spécialité: Biodiversité et environnement**

Thème :

**Effet du plomb sur les paramètres morpho-physiologiques de  
*Moringa oleifera* L.**

Date de soutenance : 08/07/2019

**Devant le Jury**

Mme. SAKKAL FZ	Président	Université de Mostaganem
Mme. BAHI K	Examineur	Université de Mostaganem
M. REGUIEG YASSAAD H.A	Encadreur	Université de Mostaganem
Mlle HAMAD H	Co-encadreur	Université de Mostaganem

Année universitaire : 2018/2019



## **Dédicaces**

*Avec l'aide de Dieu le tout puissant qui m'a éclairé les chemins du savoir, j'ai pu réaliser ce mémoire.*

*je dédie ce modeste travail avec toute l'ardeur de mes sentiments :*

*A Mes très chers parents qui m'ont fourni au quotidien un soutien et une confiance sans faille et de ce fait, je ne saurais exprimer ma gratitude seulement par des mots. Que dieu vous protège et vous garde pour nous.*

*A mes frères et sœurs merci de votre soutien en tout genre, que Dieu renforce nos liens et vous donne courage et chance pour vos perspectives d'avenir.*

*Puisse ce travail vous serve de source d'inspiration.*

*A toute Mes nièce surtout Achref, lina , nawel, rahma, yousef, marwa, sojoud et arij.*

*A toutes mes amies pour leurs encouragements.*

*A tous mes cousins et cousines.*

*A toute ma famille « **HALOUI** ».*

*Aussi à toutes les personnes qui m'ont aidée de près ou de loin dans la réalisation de ce travail.*

*A mon encadreur M. REGUIEG YASSAAD H. A , Mlle HAMAD H . A qui m'a dirigé dans ce labeur.*

**FAIZA**



## **Dédicaces**

*Je dédie ce projet aux êtres les plus chers à mon cœur:*

*-A mon cher père, que Dieu ait pitié de lui*

*-A ma très chère mère: aucune dédicace ne saurait exprimer mon grand respect, et ma reconnaissance pour les sacrifices que tu as consentis pour mon éducation. pour tous les efforts consentis pour moi durant toute ma vie, j'implore dieu le tout puissant de vous accorder bonne santé et longue vie ,Je mon grand remerciement qui ne sera jamais suffisant à elle j'espère la rendre fière par ce travail.*

*-Mes très chères sœurs Karima, Fatiha et Amel.*

*- Mes très chers frères et ses femmes, Said, Redouan et Mohammed.*

*-Mes très chère amies, surtout Chahrazed, Naima et Halla .*

*Et tous mes professeurs d'université et les personnes que j'aime, ainsi qu'à toute la promotion de Master 2 biodiversité et environnement 2018/2019.*

*Sihame*

## **Remerciement**

*En tout premier lieu, nous remercions ALLAH, tout puissant, de nous avoir donné la force pour survivre, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés*

*Nous remercions profondément notre encadreur **M. REGUIEG YASSAAD H.A** pour ses appréciations, ses précieux conseils et surtout pour nous avoir fait confiance et nous avoir accepté dans son laboratoire.*

*Nous remercions sincèrement. **Mlle HAMAD H** pour l'assistance et le dévouement sans faille dont nous a toujours fait preuve à nous égard et qui nous a permis d'élaborer le présent mémoire.*

*Nos remerciements vont également à **Mme. SEKKAL F**, de nous avoir fait l'honneur de présider le jury.*

*Et **Mme. BAHI Kh**, pour avoir accepté de prendre part du jury d'examination de notre travail*

*Nous remercions profondément **Mme. BENNAOUM A**, pour sa disponibilité et sa coopération remarquable.*

*Nos remerciements s'adressent aussi à toutes les gens de serre de l'atelier agricole de Mazagran pour leur disponibilité, leur bonne humeur, et pour nous avoir fait partager leur expérience.*

*Nous remercions tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

## RÉSUMÉ

Le plomb est l'un des métaux lourds considéré comme polluant environnemental, provoquant de nombreux effets toxiques, notamment lors d'exposition à dose élevée. Il cause des perturbations au niveau de tous les systèmes de l'organisme humain, ainsi que sur de très nombreux mécanismes physiologiques des végétaux.

Une des solutions écologiques pour à ce problème et la dépollution des sols consiste à utiliser les plantes accumulatrices de métaux lourds (phytoremediation). Dans ce contexte, l'objectif de ce travail est d'étudier la potentialité de *Moringa oleifera* L. de résister à des doses importante de plomb et se capacité de dépolluer un sol contaminé par le plomb. L'étude porte sur l'application de cinq doses de plomb (0, 3, 5 et 10 mM ) aux plantes *Moringa oleifera* L.

L'analyse morfo-physiologique de l'application des doses croissantes de plomb au *Moringa oleifera* L. Révèlent que ce dernier exerce un effet négatif sur les plantes et qui se traduit par une inhibition de la croissance, où on a enregistré une réduction de la longueur des racines et une diminution de la hauteur des tiges, ainsi que une diminution de la production de la matière fraîche des parties aériennes et racinaires de *Moringa oleifera* L. par rapport aux témoins et une diminution de la teneur en pigments chlorophylliens foliaires (chlorophylle a, b et totale) par rapport aux témoins.

**Mots clés :** plomb, *Moringa oleifera* L., phytoremédiation, paramètres morphologique, paramètres physiologiques.

## **ABSTRACT**

Lead is one of the heavy metals considered as an environmental pollutant, causing many toxic effects, especially during high dose exposure. It causes disturbances in all systems of the human organism, as well as on many physiological mechanisms of plants.

One of the ecological solutions for this problem and soil remediation is to use heavy metal storage plants (phytoremediation). In this context, the objective of this work is to study the potential of *Moringa oleifera* L. to withstand large doses of lead and its ability to clean up lead contaminated soil. The study involves the application of five doses of lead (0, 3, 5 and 10 mM) to *Moringa oleifera* L.

Morphophysiological analysis of the application of increasing doses of lead to *Moringa oleifera* L. shows that it has a negative effect on plants and results in growth inhibition, with a reduction in root length and a decrease in stem height, as well as a decrease in the production of fresh and dry material of the aerial and root parts of *Moringa oleifera* L. compared with controls and a decrease in leaf chlorophyllian pigment content (chlorophyll a, b and total) relative to the controls.

Key words: lead, *Moringa oleifera* L., phytoremediation, morphophysiological parameters,

## ملخص

الرصاص هو أحد المعادن الثقيلة التي تعتبر ملوثاً بيئياً ، مما يسبب العديد من الآثار السامة ، خاصةً أثناء التعرض لجرعة عالية. يسبب اضطرابات في جميع أنظمة الكائن البشري ، وكذلك على العديد من الآليات الفسيولوجية للنباتات.

أحد الحلول البيئية لهذه المشكلة ومعالجة التربة هو استخدام نباتات لتخزين المعادن الثقيلة (المعالجة النباتية). في هذا السياق ، يتمثل الهدف من هذا العمل في دراسة إمكانيات *Moringa oleifera* L. لتحمل جرعات كبيرة من الرصاص وقدرتها على تنظيف التربة الملوثة بالرصاص. تتضمن الدراسة تطبيق خمس جرعات من الرصاص (0 ، 3 ، 5 و 10 ملم) على نباتات المورينجا أوليفيرا إل.

التحليل المورفوفيزيولوجي لتطبيق جرعات متزايدة من الرصاص على *Moringa oleifera* L. يدل على أنه له تأثير سلبي على النباتات ويؤدي إلى تثبيط النمو ، مع انخفاض في طول الجذر وانخفاض في طول الساق ، وكذلك انخفاض في إنتاج المواد الطازجة والجافة للأجزاء الجوية والجذرية من المورينجا أوليفيرا إل. مقارنة مع الضوابط وانخفاض في محتوى الصباغ الكلوروفيليان ورقة ( الكلوروفيل a ، b و total) نسبة إلى عناصر التحكم.

الكلمات المفتاحية: الرصاص ، المورينجا أوليفيرا ، المعالجة النباتية ، العوامل الفيزيولوجية المورفولوجية ،

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 1:</b> Classification périodique des éléments métalliques analysés .....	04
<b>Tableau 2:</b> Les propriétés chimiques du plomb .....	06
<b>Tableau 3:</b> Systématique et dénomination internationale du <i>Moringa oleifera</i> L. ....	19
<b>Tableau 4 :</b> Composition de la solution nutritive .....	28
<b>Tableau 5 :</b> Dispositif expérimental .....	30

## LISTE DES FIGURE

<b>Figure 1:</b> méthodes de phytoremédiation .....	12
<b>Figure 2:</b> Technique de phytoextraction .....	13
<b>Figure 3:</b> Schéma représentant une phytoextraction continue .....	14
<b>Figure 4:</b> Schéma représentant une phytoextraction induite par des chélateurs .....	14
<b>Figure 5:</b> Technique de phytovolatilisation.....	15
<b>Figure 6:</b> Technique de la phytostabilisation .....	16
<b>Figure 7:</b> Technique de phytodégradation.....	17
<b>Figure 8:</b> Technique de rhizodégradation.....	17
<b>Figure 9 :</b> Arbre de <i>Moringa oleifera</i> L.....	20
<b>Figure 10 :</b> Feuilles de <i>Moringa oleifera</i> L.....	20
<b>Figure 11 :</b> Fleurs de <i>Moringa oleifera</i> L.....	21
<b>Figure 12 :</b> Fruits de <i>Moringa oleifera</i> L. ....	21
<b>Figure 13:</b> Valeurs nutritives des feuilles du <i>Moringa Oleifera</i> L.....	22
<b>Figure 14 :</b> Site d'expérimentation.....	24
<b>Figure 15:</b> tamisage du sable .....	25
<b>Figure 16 :</b> lavage du sable à l'eau ordinaire.....	25
<b>Figure 17:</b> traitement à l'esprit de sel.....	25
<b>Figure 18:</b> rinçage de sable à l'eau distillée.....	25
<b>Figure19 :</b> séchage de sable .....	25
<b>Figure 20 :</b> graines de <i>Moringa oleifera</i> L.....	26
<b>Figure 21 :</b> Laver les graines avec hypochlorite de sodium.....	27
<b>Figure 22:</b> Rinçages à l'eau distillée .....	27
<b>Figure 23:</b> Plantules de <i>moringa oleifera</i> L. âgées de 28 jours.....	27
<b>Figure 24 :</b> Repiquage des Plantules de <i>Moringa oleifera</i> L. dans les cylindres. ....	28
<b>Figure 25 :</b> Application de stress de nitrate de plomb ( $Pb(NO_3)_2$ ).....	29
<b>Figure 26 :</b> Mesure de l'élongation aérienne (a)et la partie sous terrain(b) .....	31
<b>Figure 27 :</b> la masse de la matière fraîche des partie aérienne(a) et la partie sous terrain(b) plantes du <i>Moringa</i> .L. ....	31
<b>Figure 28:</b> la masse de la matière sèche des partie aérienne(a) et la partie sous terrain (b) plantes du <i>Moringa</i> .....	32
<b>Figure 29:</b> Dosage de la chlorophylle.....	33

<b>Figure 30</b> : L'effet du plomb sur l'élongation des parties aériennes(a) et partie sous terrain (b) des plantes du <i>Moringa oleifera</i> L.....	35
<b>Figure 31</b> :l'effet du plomb sur la matière fraîche des parties aériennes(a) et partie sous terrain (b) plantes du <i>Moringa oleifera</i> L.....	36
<b>Figure 32</b> :l'effet du plomb sur le poids sèche des parties aériennes(a) et partie sous terrain (b) plantes du <i>Moringa oleifera</i> L.....	37
<b>Figure 33</b> : L'effet du plomb sur la teneur en chlorophylle du <i>Moringa</i> .....	38

## Liste des abréviations :

**Al** : Aluminium

**As** : Arsenic

**Pb** : Plomb

**Ca** : Calcium

**Cd** : Cadmium

**Chl** : chlorophylle

**Cm** : Centimètre

**Cu** : cuivre

**D** : dose

**Do** : densités optiques  
eau

**Fe** : Fer

**g** : Gramme.

**Hg** : Mercure

**h** : heure

**K** : Potassium.

**Kg** : Kilogramme

**Mf** : matière fraîche

**Ms** : matière sèche

**Mn** : Manganèse

**mM** : Milli mole

**mm** : Millimètre

**ml** : millilitre

**mg** : Milligramme.

**Ni** : Nickel

**nm** : Nanomètre

**P** : probabilité

**Pb (NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>** : Nitrate de plomb

**PFT** : poids frais tige

**PFR** : poids frais racine

**Pb** : Plomb

**Pf** : poids frais

**Ps** : poids sec

**ppm** : parties par million (équivalent à du mg/L)

**Ppt** : poids en pleine turgescence

**Rwc** : (Relative Water Content) teneur relative en

**Se** : Selenium

**Uv** : ultra-violet

**Zn** : Zinc

**°C** : Degré Celsius

**%** : pourcent

**µg** : Microgramme.

A l'heure actuelle et à l'échelle mondiale, on assiste à une intensification des activités industrielles et agricoles ainsi qu'à une augmentation rapide de la population (**Gold, 2002**), qui sont à l'origine d'une contamination de notre environnement par les métaux lourds et les polluants organiques (**Vavasseur et al., 2003**). Ces substances ont des répercussions néfastes sur l'environnement, mais aussi sur la santé humaine. Dans certains écosystèmes, ces produits chimiques peuvent être à l'origine de la disparition de certaines espèces animales et/ou végétales et par conséquent, entraînent le dysfonctionnement de la chaîne trophique (**Gold, 2002**).

Le plomb est considéré comme l'un des métaux les plus toxiques, et qui n'a aucun avantage sur le plan biologique, ainsi qu'il est nocif même des faibles doses. Le plomb étant un élément relativement peu mobile dans le sol, seule une faible proportion contenue dans la solution du sol est disponible pour les plantes (**Jopony et Young, 1994**). En fonction des conditions du milieu, les plantes peuvent absorber une partie du plomb présent dans le sol. Les ions  $Pb^{+2}$  diffusent dans la racine, mais sont bloqués par la barrière physique que représente l'endoderme, ce qui limite fortement leur translocation vers les parties aériennes. Bien que les plantes possèdent de nombreux systèmes de détoxification pour limiter l'interaction de ces ions avec les molécules biologiques, ces derniers induisent tout un éventail d'effets délétères pour les organismes.

Le plomb perturbe ainsi les structures membranaires et pariétales, modifie le statut hydrique, perturbe l'absorption et/ou la translocation des éléments minéraux essentiels (calcium, manganèse, zinc, fer...) ou encore réduit la photosynthèse (**Seregin et Ivanov, 2001; Sharma et Dubey, 2005**). A l'échelle macroscopique, l'exposition des plantes au plomb induit une réduction de la croissance, de la biomasse produite, des rendements et lorsque le stress est trop sévère, conduit à l'apparition de signes racinaires et foliaires visibles tel que les nécroses et les chloroses, voire à la mort de la plante (**Seregin et Ivanov, 2001; Sharma et Dubey, 2005**).

Parmi les procédés de restauration des sols, Il existe certes les techniques industrielles de remédiation comme méthodes physico-chimiques permettant la décomposition des polluants. Les plus utilisées sont l'incinération et les méthodes de décomposition chimique. Elles sont très efficaces pour certains types de contaminants

présents dans le milieu, mais elles sont très onéreuses et peu respectueuses de l'environnement. Ainsi, le développement de méthodes utilisant des plantes pour dépolluer l'environnement présente un intérêt croissant ces dernières décennies. Dans ce cadre, la phytoremédiation -technique considérée comme étant respectueuse de l'environnement, avec un rapport coût-efficacité notable, et socialement acceptée -consiste en l'utilisation de plantes particulières, (**Baniet al., 2007; Montarges-Pelletieral., 2008 et Kraemer, 2010**).

De nombreuses espèces de plantes ont réussi à absorber des contaminants tels que le plomb, le cadmium, le chrome, l'arsenic et divers radionucléides des sols. Cette étude tente de déterminer l'effet de plomb sur les paramètres morpho-physiologiques de *Moringa oleifera*L.

Ce mémoire s'articule autour de deux parties regroupant cinq chapitres:

❖ **Partie I: Synthèse bibliographiques**

- Chapitre I: Métaux lourds le cas de plomb
- Chapitre II: Phytoremédiation des sols pollués
- Chapitre III: *Moringa oleifera* L.

❖ **Partie II: Etude expérimentale**

- Chapitre I: Matériel et méthodes
- Chapitre II: Résultats et discussion

❖ **Conclusion**

**I.1. Généralités sur les métaux lourds**

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**). Les métaux ne sont pas biodégradables et donc peuvent persister dans le sol pendant de longues périodes. Le Zn, Cu et Pb sont toxiques pour les végétaux et les animaux y compris l'homme (**Kabata-Pendias, 2001**).

**I.2. Définition des métaux lourds**

Le terme de métaux lourds est arbitraire et imprécis. Il est utilisé pour des raisons de simplicité et il recouvre des éléments ayant des propriétés métalliques (ductilité, conductivité, densité, stabilité des cations, spécificité de ligand...) et un numéro atomique  $> 20$  (**Raskin et al., 1994**). Les métaux lourds sont définis comme étant des éléments chimiques toxiques ayant une densité supérieure à  $5\text{g/cm}^3$  (**Elmsley, 2001**). Sous cette appellation figurent des éléments qui, pour certains, sont effectivement des métaux tels que Ni, Cu, Zn, Pb, Cd, Hg, Al... mais aussi des métalloïdes tels que As et Se. Ceux-ci sont présents le plus souvent dans l'environnement sous forme de traces. Les plus toxiques d'entre eux sont le cadmium, l'arsenic, le plomb et le mercure. Ces éléments sont présents naturellement dans la croûte terrestre et dans tout organisme vivant, à des concentrations variables suivant les milieux et les organismes. Selon les textes législatifs, la pollution par les métaux toxiques (METOX) regroupe huit métaux et un métalloïde (chrome, zinc, cuivre, nickel, plomb, arsenic, cadmium et mercure) (**Koller, 2004**).

Tableau 1: Classification périodique des éléments métalliques analysés (Belabed, 2010)

**CLASSIFICATION PERIODIQUE DES ELEMENTS**

■ Métaux

■ Semi-conducteurs

■ Non-métaux

■ Gaz nobles

■ Lanthanides et actinides

Li : Solide à 25°C, sous 1 bar

He : Gaz à 25°C, sous 1 bar

Br : Liquide à 25°C, sous 1 bar

Tc : Obtenu par synthèse

I	1	H	II																	VIII	2	He																
	3	Li	4	Be																	10	Ne																
	11	Na	12	Mg																	18	Ar																
	19	K	20	Ca	21	Sc	22	Ti	23	V	24	Cr	25	Mn	26	Fe	27	Co	28	Ni	29	Cu	30	Zn	31	Ga	32	Al	33	Ge	34	As	35	Se	36	Br	37	Kr
	37	Rb	38	Sr	39	Y	40	Zr	41	Nb	42	Mo	43	Tc	44	Ru	45	Rh	46	Pd	47	Ag	48	Cd	49	In	50	Sn	51	Sb	52	Te	53	I	54	Xe		
	55	Cs	56	Ba	57	Lu	71	Hf	72	Ta	73	W	74	Re	75	Os	76	Ir	77	Pt	78	Au	79	Hg	80	Tl	81	Pb	82	Bi	83	Po	84	At	85	Rn		
	87	Fr	88	Ra	89	Lr	103	Rf	104	Db	105	Sg	106	Bh	107	Hs	108	Mt	109	Uun	110	Uuu	111	Uub														
Série des Lanthanides		57	La	58	Ce	59	Pr	60	Nd	61	Pm	62	Sm	63	Eu	64	Gd	65	Tb	66	Dy	67	Ho	68	Er	69	Tm	70	Yb									
Série des Actinides		89	Ac	90	Th	91	Pa	92	U	93	Np	94	Pu	95	Am	96	Cm	97	Bk	98	Cf	99	Es	100	Fm	101	Md	102	No									

### I.3. Origine des métaux présents dans le sol

Le problème principal avec les métaux lourds comme le plomb, le cadmium, le cuivre et le mercure est qu'ils ne peuvent pas être biodégradés, et donc persistent pendant de longues périodes dans des sols. Leur présence dans les sols peut être naturelle ou anthropogénique.

#### I.3.1. Sources naturelle

Les métaux lourds sont présents naturellement dans les roches, ils sont libérés lors de l'altération de celles-ci pour constituer le fond géochimique (Bourellier et Berthelin in Huynh, 2009). La concentration naturelle de ces métaux lourds dans les sols varie selon la nature de la roche, sa localisation et son âge. (Baize, 2000). Ce fond pédo-géochimiques local résulte des phénomènes naturels géologiques.

#### I.3.2. Sources anthropiques

Les métaux provenant d'apports anthropiques sont présents sous des formes chimiques assez réactives et entraînent de ce fait des risques très supérieurs aux métaux d'origine naturelle qui sont le plus souvent immobilisés sous des formes relativement inertes. Parmi les activités qui contribuent à l'apport des concentrations dans l'environnement on a: activités pétrochimiques, utilisation de combustibles,

transport, incinération de déchet, produits (interrupteurs électriques, amalgames dentaires, éclairages fluorescents), déchets urbains (eaux usées, boues d'épuration, ordures ménagères), agricoles, activités minières, déchets industriels (**Monna, 2008**).

#### **I.4. Généralité sur le plomb**

Le plomb est présent naturellement dans l'environnement. Cependant, la plupart des concentrations en plomb que l'on trouve dans l'environnement sont le résultat des activités humaines. Il n'y a pas seulement l'essence au plomb qui augmente les concentrations dans l'environnement, d'autres activités telles que les procédés industriels et la combustion des déchets solides, y contribuent aussi (**Stoekli et al., 1998**).

Le plomb est un élément réputé peu mobile par rapport à d'autres métaux en traces tel que le cadmium (**Bourrellet et Berthelin, 1998**). Son cycle biogéochimique 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.

#### **I.5. Propriétés physico-chimiques du plomb**

Le plomb, du latin plumbum, est un métal mou et gris, sans goût ni odeur caractéristique, se trouvant habituellement en petite quantité dans la croûte terrestre. Il appartient au groupe IV b de la classification périodique des éléments. Ses principales propriétés physico-chimiques sont présentées dans le tableau 2 (**Sposito et al., 1982**). Sa configuration électronique est  $[Xe] 4f^{14} 5d^{10} 6s^2 6p^2$  avec deux 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).

Tab 2: Les propriétés chimiques du plomb (Sposito *et al.*, 1982; Fahr, 2014).

<b>Symbole</b>	pb
<b>Numéro atomique</b>	82
<b>Masse atomique</b>	207,2 g.mol <sup>-1</sup>
<b>Electronégativité de pauling</b>	1,8
<b>Masse volumique</b>	11,34 g.cm <sup>-3</sup> à 20°C
<b>Température de Fusion</b>	327 °C
<b>Température d'ébullition</b>	1740 °C
<b>Rayon atomique (Van der Waals)</b>	0,154 nm
<b>Rayon ionique</b>	0,132 nm (+2) ; 0,084 nm (+4)
<b>Isotopes</b>	4
<b>Configuration électronique</b>	[Xe] 4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 6p <sup>2</sup>
<b>Energie de première ionisation</b>	715,4 kJ.mol <sup>-1</sup>
<b>Energie de deuxième ionisation</b>	1450,0 kJ.mol <sup>-1</sup>
<b>Energie de troisième ionisation</b>	3080,7 kJ.mol <sup>-1</sup>
<b>Energie de quatrième ionisation</b>	4082,3 kJ.mol <sup>-1</sup>
<b>Energie de cinquième ionisation</b>	6608 kJ.mol <sup>-1</sup>
<b>Densité</b>	11,35
<b>Valence</b>	0, +2, +4
<b>Rayon ionique pb<sup>2+</sup></b>	0,94 à 1,49 Å
<b>pb<sup>4+</sup></b>	0,78 à 0,94 Å

### I.6. Origines de la pollution par le plomb

Le plomb retrouvé dans l'environnement provient à la fois de sources naturelles et anthropiques. Le métal est présent dans le sol, eau et air. Le plomb est naturellement présent en moyenne à 0,002% dans la croûte terrestre (36<sup>ème</sup> élément de la croûte terrestre) . Les sols non contaminés contiendraient de 10 à 30 mg.kg<sup>-1</sup> (Nriagu, 1978 ; Baize, 2002). A l'état naturel, le Pb se retrouve dans l'environnement sous forme de galène (sulfure de Pb), de cérusite (carbonate de Pb), et d'anglésite (sulfate de Pb). La forme la plus abondante est la galène, la cérusite et l'anglésite apparaissent lors de l'oxydation de la galène (Brunet, 2008).

la majorité du plomb contenue dans l'air ambiante provient de la combustion de l'essence plombée, en milieu urbain environ 90% du plomb est émis dans l'atmosphère par le gaz d'échappement mais la pollution de l'air par le Pb a considérablement diminué depuis l'arrêt des essences plombées, (Source CITEPA traitement OPECST). A ce jour, les principales sources de contaminations en Pb sont les rejets anthropiques. Ils proviennent principalement des industries qui extraient et purifient le Pb naturel et qui recyclent les composants contenant du Pb comme les batteries et leurs retombées atmosphériques contaminent les sols. A ceci s'ajoute les déchets industriels et la détérioration des peintures extérieures à base de Pb. Des rejets provenant des industries sidérurgiques ainsi que les réseaux de canalisations de distribution d'eau anciennes, contenant du Pb, contaminent les eaux (**Pichard, 2002**).

### **I.7. Le plomb dans le sol**

On peut trouver le plomb dans le sol sous forme ionique, dissoute, ou liée plus ou moins fortement aux particules. Leur accumulation provenant des retombées atmosphériques, ou de déchets contaminés déposés sur le sol, se fait principalement dans les horizons de surface (**Sterckeman et al., 2000**) et plus précisément dans les horizons riches en matières organiques.

Les teneurs en Pb diminuent, ensuite, plus en profondeur (**De Abreu et al., 1998**), ceci s'explique par le fait que le Pb est peu mobile. Etant donné que le Pb<sup>+2</sup> se lie facilement aux particules du sol, les quantités de Pb<sup>+2</sup> accumulées dans les sols diffèrent selon la composition, notamment en argile, sable et matière organiques du sol (Brunet., 2008). Les sols non contaminés contiendraient de 10 à 30 mg Pb kg<sup>-1</sup> de sol sec ; des teneurs en plomb supérieures à 110 mg Pb kg<sup>-1</sup> sont considérées comme des anomalies (**Laperche et al., 2004**).

### **I.8. Bioaccumulation du plomb dans les végétaux**

Le plomb est absorbé passivement par les racines et est rapidement immobilisé dans les vacuoles des cellules racinaires ou retenu par les parois des cellules de l'endoderme. Son accumulation depuis le sol est assez limitée (**Cobb et al., 2000**). La quantité de matière organique présente dans le sol et le pH du sol ont une certaine influence sur l'absorption du plomb par les plantes. 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.8.1. Absorption**

Au départ, le  $Pb^{2+}$  présent dans la solution du sol se lie aux groupements carboxyle de l'acide uronique composant le mucilage autour des racines (Sharma et Dubey, 2005). Ce mucilage permet donc de restreindre le passage du plomb à l'intérieur des cellules racinaires, et constitue ainsi une protection du système racinaire. Une fois adsorbé à la surface des racines, la voie apoplastique pourrait être une voie importante pour le plomb qui peut être immobilisé par les charges négatives des parois cellulaires.

Il aurait donc tendance à s'accumuler dans l'espace libre, étant fortement lié aux groupements carboxyliques des composés pectocellulosiques des parois. Des études ont montré que le plomb est majoritairement présent dans l'apoplaste et que seule une faible proportion pénètre dans l'endoderme (Tung et Temple, 1996).

### **I.8.2. Translocations du plomb des racines vers les parties aériennes**

Après l'absorption par les racines, la translocation correspond au transfert des éléments traces métalliques vers les parties aériennes. Elle peut varier considérablement en fonction du métal, mais également de l'espèce végétale. Pour être conduits vers les parties aériennes, les éléments prélevés dans le sol par les racines doivent être transportés dans le cortex puis déversés dans les vaisseaux du xylème (par circulation de la sève brute). Ce flux d'ions métalliques dans le xylème nécessite leur chélation à des acides organiques (tels que le citrate) ou à des acides aminés.

Pour la plupart des espèces, la majorité du plomb absorbé par les plantes réside dans les racines, et seulement une faible proportion est transloquée vers les parties aériennes. Ce transport limité des racines vers les feuilles peut être expliqué par la barrière formée par l'endoderme des racines. (Briat et Lebrun, 1999).

**I.9. Principaux effets du plomb sur les plantes****I.9.1. Croissance et morphogénèse**

Globalement, le plomb affecte la croissance et la morphogénèse des plantes, en perturbant de très nombreux mécanismes physiologiques. Il inhibe fortement la germination et la croissance des plantes (**Wierzbicka et al., 1998**), entraînant la formation de plantes de taille réduite (**Mishra et Chouduri, 1998**). Le plomb affecte considérablement la morphologie des racines, en diminuant la taille des racines primaires ainsi qu'en réduisant le nombre de racines secondaires.

L'inhibition de la division et de l'élongation cellulaire sont les phénomènes les plus souvent reportés pour expliquer ces effets du plomb sur les racines (**Seregin et Ivanov, 2001 ; Malkowski et al., 2002 ; Patra et al., 2004 ; Kopittke et al., 2007 ; Cecchi, 2008**).

**I.9.2. Photosynthèse :**

L'inhibition de la photosynthèse est un des effets bien connus du Pb sur la plante (**Islam et al., 2008**). Parmi les causes de l'altération de la photosynthèse, on peut citer une augmentation de l'activité de la chlorophyllase et, par conséquent, une dégradation des pigments chlorophylliens, en particulier, de la chlorophylle b qui est plus sensible que la chlorophylle a (**Liu et al., 2009**). Il a été aussi montré qu'il existait une inhibition de la synthèse des pigments chlorophylliens (**Cenkci et al., 2010**). L'affinité du Pb pour les protéines de la membrane entraîne, à des concentrations en Pb élevées, une déformation et une destruction de l'ultra structure des chloroplastes (**Islam et al., 2008**).

De plus, parmi les facteurs qui vont inhiber la photosynthèse, on peut citer l'inhibition des enzymes du cycle de Calvin par le Pb (**Liu et al., 2008**) ainsi que le remplacement par le Pb d'ions essentiels tels que le Mn et le Fe (**Chatterjee et al., 2004 ; Cecchi, 2008**)

**I.9.3. Effets sur la nutrition minérale**

Le plomb affecte 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). Il a été montré, chez plusieurs plantes exposées au Pb, une diminution dans les feuilles de la concentration en cations divalents comme le  $Zn^{2+}$ , le  $Mn^{2+}$ , le  $Ca^{2+}$  et le  $Fe^{2+}$  (Seregin *et al.*, 2004; Chatterjee., 2004 ; Kopsiitke *et al.*, 2007; Cecchi, 2008). Cette diminution pourrait être due à une compétition entre le Pb et certains ions de taille équivalente au niveau des transporteurs membranaires. En effet, le Pb, qui a quasiment le même rayon que le  $K^+$ , pourrait emprunter les canaux potassiques pour entrer dans la cellule (Sharma et Dubey, 2005).

Le plomb affecte aussi le métabolisme azoté en diminuant le prélèvement de nitrate et en perturbant le fonctionnement de la nitrate réductase (Seregin et Ivanov, 2001; Cecchi, 2008).

#### **I.9.4. Stress hydrique :**

Le plomb peut également affecter l'état hydrique de la plante, en provoquant un stress hydrique, notamment par la fermeture des stomates. Cette fermeture des stomates a un impact sur divers processus dans la cellule, tel que la photosynthèse, en induisant une déficience en  $CO_2$ .

Le stress hydrique s'exprime également par une réduction de la surface foliaire, ainsi que globalement de tous les organes sièges de la transpiration, afin de limiter les pertes en eau. On observe ensuite un flux transpiratoire diminué, une pression osmotique plus faible ou un potentiel hydrique réduit dans le xylème. Le plomb provoque une perte globale de turgescence et de plasticité, et enfin une réduction globale du contenu en eau de la plante (Parys *et al.*, 1998)

#### **I.10. Mécanismes de tolérance des plantes au plomb**

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

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

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

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

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

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

## II.1. Techniques de dépollution

Les nombreux cas de pollution par les métaux lourds génèrent autant de sites contaminés qu'il faut réhabiliter. Les méthodes physico-chimiques de dépollution de ces sites utilisées *in situ* et *ex situ* présentent l'inconvénient d'être coûteuses et lourdes à mettre en œuvre (Gadd, 2000; Raskinet *et al.*, 1994; Salt *et al.*, 1995). La capacité de certaines plantes à tolérer ou même à accumuler des métaux a permis d'ouvrir des nouvelles voies de recherche sur le traitement des sols : on parle de phytoremédiation.

## II.2. Définition de phytoremediation

La phytoremédiation ou la bioremédiation est une nouvelle technologie qui utilise les plantes vertes et/ou des microorganismes associés (ex. bactéries, champignons) pour le nettoyage d'un environnement pollué par les métaux lourds et les métalloïdes (Smits et Freeman, 2006; Lamb *et al.*, 2010). Le terme phytoremédiation vient du préfixe grec « phyto » (plante) et du mot latin *remedium* (corriger ou éliminer un mal) (Ghosh et Singh, 2005).

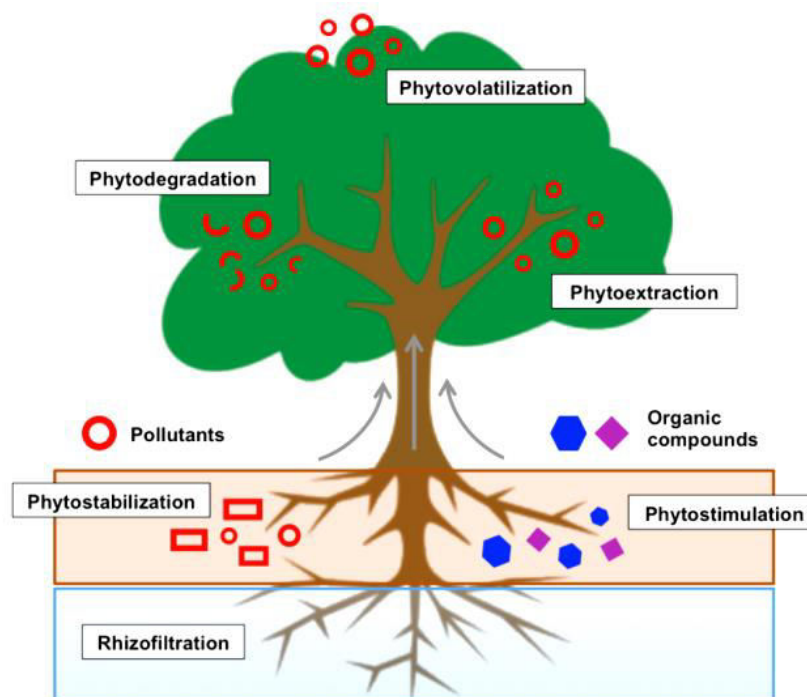
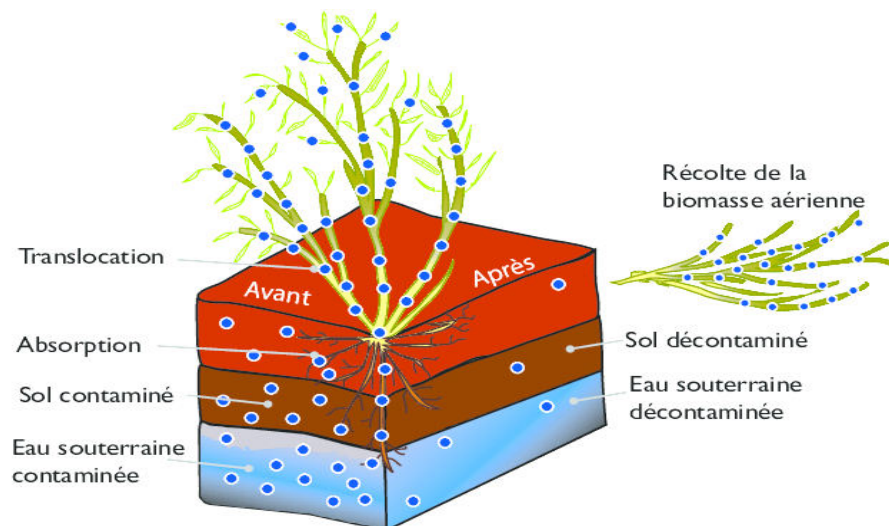


Fig. 1 : Méthodes de phytoremédiation (Barnes, 2016).

### II.3. Méthodes de phytoremédiation

#### II.3.1. Phytoextraction

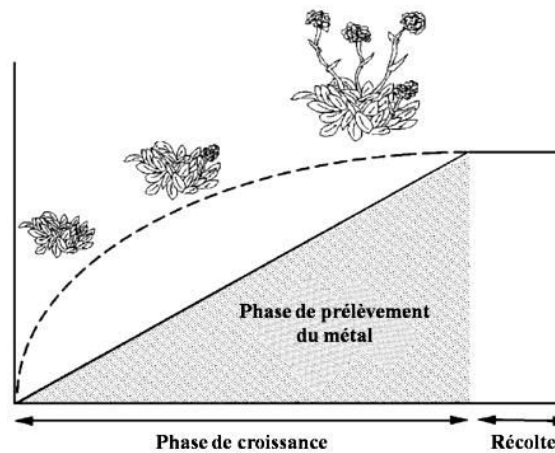
La phytoextraction est une technologie in situ liée aux plantes qui sont capables d'absorber les métaux lourds (Pb, Cd, Ni, Zn, ...) par leurs racines et de les transporter ensuite vers les parties aériennes (Zheng *et al.*, 2011). Les tiges et feuilles sont alors récoltées et éliminées des sites pollués. Ceci contribue à rétablir la fertilité de larges zones agricoles, contaminées pour la plupart dans leur couche supérieure (Alkortaet *al.*, 2004). Deux stratégies sont proposées pour une phytoextraction réussie des sols contaminés par les métaux lourds et autres polluants : la phytoextraction naturelle et la phytoextraction induite ou assistée par des chélateurs.



**Fig. 2:** Technique de de phytoextraction.(Louise, 2016).

#### ➤ Phytoextraction naturelle

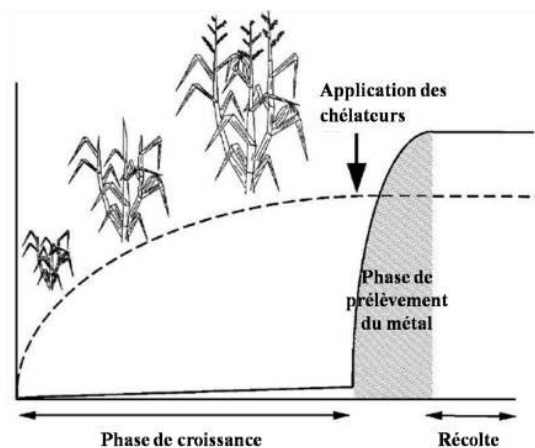
Pour qu'une plante soit adéquate pour la phytoextraction d'un polluant donné, elle doit être capable durant toute sa vie de résister à la toxicité du polluant et de l'accumuler dans ses parties aériennes. En effet, la phytoextraction naturelle utilise des plantes hyperaccumulatrices qui peuvent naturellement extraire des teneurs importantes de métaux présents sur des sols pollués sans présenter de signes de phytotoxicité (Quartacciet *al.*, 2006 ; Zheng *et al.*, 2011).



**Fig. 3:** Schéma représentant une phytoextraction continue (Salt *et al.*, 1998).

➤ **phytoextraction induite ou assistée par des chélateurs**

Elle est basée sur l'utilisation de chélateurs permettant à des plantes non hyperaccumulatrices mais de biomasse importante d'absorber des teneurs élevées en métaux à partir d'un site pollué. La solubilité des métaux est accrue par des chélateurs tels que l'acide citrique, Ils sont appliqués soit directement sur le sol ou en conditions hydroponiques (Saifullahet *al.*, 2009 ; Shahidet *al.*, 2011 ; Zheng *et al.*, 2011) soit en pulvérisation foliaire (Meers et Tack, 2004).



**Fig. 4:** Schéma représentant une phytoextraction induite par des chélateurs (Salt *et al.*, 1998).

Les plantes utilisées pour la phytoextraction doivent avoir les caractéristiques suivantes (Ann-Peer *et al.*, 2003) :

- Tolérance à un niveau élevé de métal
- Accumulation raisonnable du métal dans les parties aériennes
- Croissance rapide
- Production importante de biomasse au terrain
- Avoir un système racinaire dense et capable de coloniser le sol/ sédiment en profondeur

### II.3.2. 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; Dechamp et Meerts, 2003; Bert et Deram, 1999)

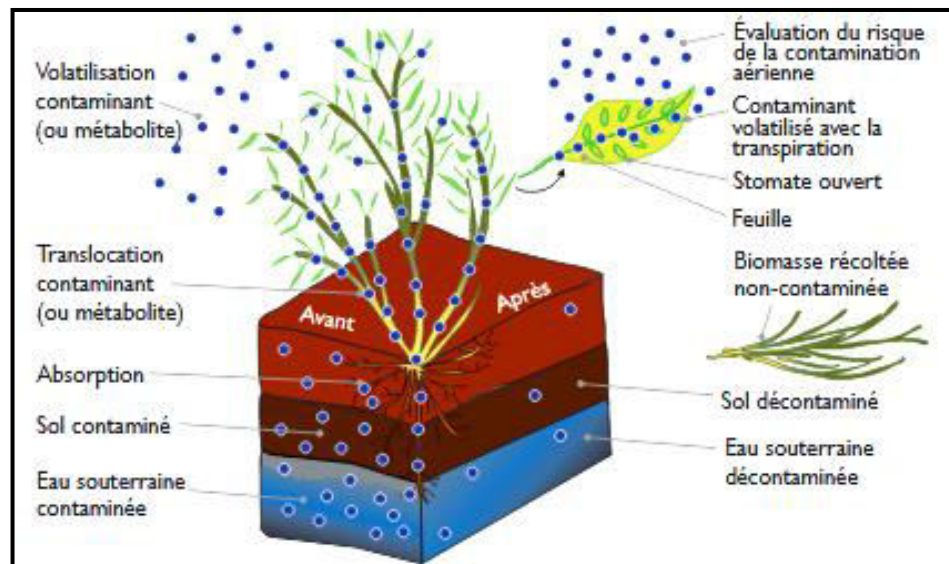


Fig. 5 : Technique de phytovolatilisation (Louise, 2016)

### II.3.3. Phytostabilisation

La phytostabilisation utilise un couvert végétal pour empêcher la dispersion des contaminants dans les eaux souterraines et l'habitat humain, donc pour les rendre peu mobile dans les écosystèmes (Krämer, 2005; Pilon-Smits, 2005). Certaines plantes immobilisent les contaminants par précipitation dans le sol par les exsudats racinaires ou par accumulation dans les racines (Do Nascimento et Xing, 2006 ; Zheng *et al.*, 2011).

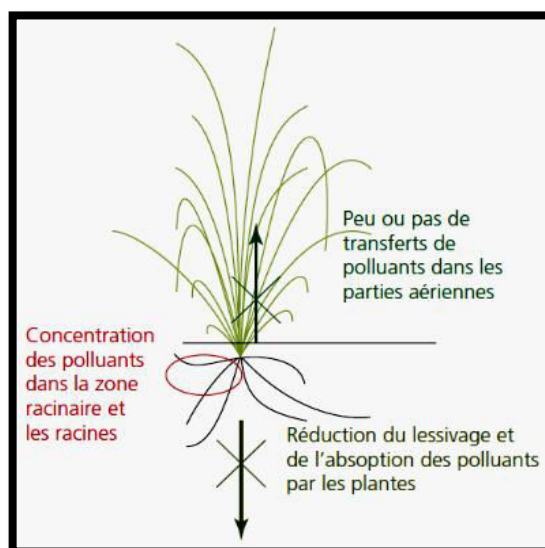


Fig. 6 : Technique de la phytostabilisation (Bertet *al.*, 2013).

### II.3.4. Phytotransformation ou phytodégradation

La phytodégradation est l'accélération de la dégradation des composés organiques polluants (hydrocarbures, pesticides, explosifs...) en présence de plante. Cette dégradation peut avoir lieu soit hors de la plante, grâce à l'activité des micro-organismes présents dans l'environnement des racines (rhizosphère), soit dans la plante après absorption du composé puis dégradation dans les cellules, les plantes produisent des enzymes qui aident catalyser et accélérer les réactions chimiques de dégradation. Les structures moléculaires complexes des contaminants sont dégradées dans des molécules plus simples et moins toxiques (Rudolph, 2010).

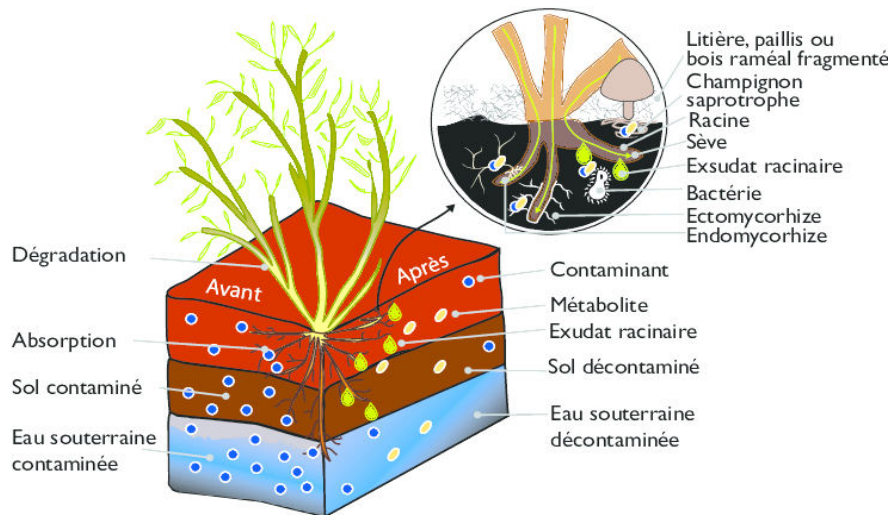


Fig. 7 : Technique de phytodégradation (Louise, 2016)

### II.3.5. Rhizodégradation

La rhizosphère est une zone de croissance microbienne et de surface d'échange entre le sol, les microorganismes et la plante (Lorenz, 1904 ;CurletTruelove, 1986). Les communautés microbiennes (bactéries, champignons, mycorhizes) peuvent agir sur l'absorption et la biodégradation des polluants facilitant l'absorption ultérieure des polluants primaires et secondaires par la plante.

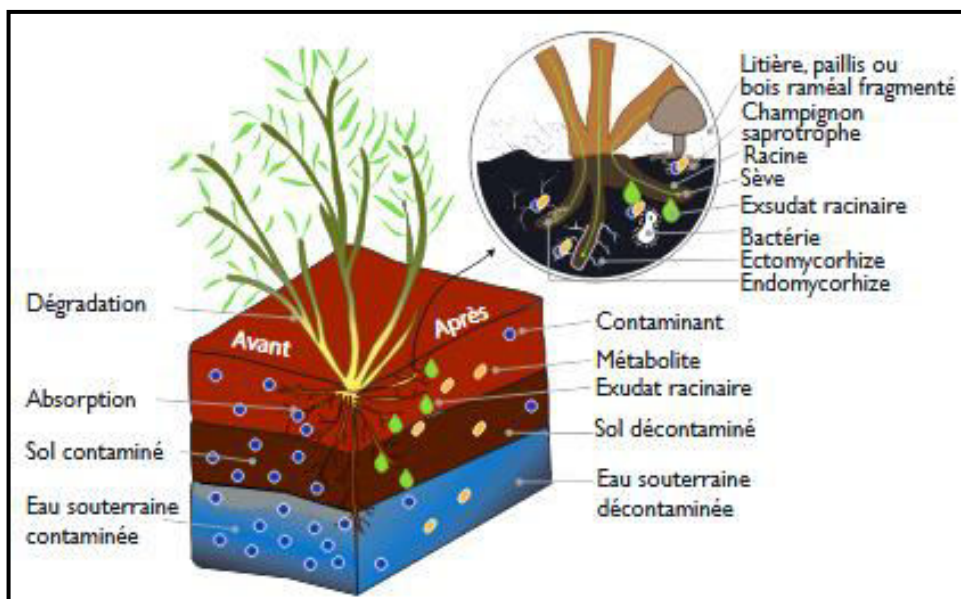


Fig. 8 : Technique de rhizodégradation (Louise, 2016)

## II.4. Avantages et les limites de la phytoremédiation

### II.4.1. Avantages :

La technique présente de nombreux avantages :

- En adéquation avec le développement durable
- Gestion in situ des terres : pas de transfert de sol
- Traitement sur de grandes superficies (**Bert, 2012**).
- Par comparaison avec les traitements physico-chimiques, la phytoremédiation montre un faible coût (se situe en moyenne entre 2 et 100 dollars / m<sup>3</sup>).
- Elle provoque une perturbation minimale de l'environnement et permet même de réinitier le cycle de dégradation de la matière organique là où la végétation avait disparu.
- La décontamination par les plantes présente aussi l'avantage de réduire l'érosion et le lessivage des sites, ce qui maintient le polluant à proximité de la plante (**Berti et al., 1995**).
- Très peu de modification de la topographie existante du site.
- récupération et réutilisation de métaux de valeur peut être possible (des entreprises se spécialisent dans le « phytominage ») (**Rudolph, 2010**).

### II.4.2. Limites

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

- Durée de décontamination longue, de l'ordre de plusieurs années (2 à 20 ans)
- Risque de déstabilisation de l'écosystème local (**Bert, 2012**).
- On ne peut pas, avec des systèmes de remédiation à base de plantes, empêcher totalement l'écoulement des contaminants dans la nappe phréatique.
- Le niveau et le type de contamination influence la phytotoxicité des polluants (dans Certains cas, la croissance ou la survie des plantes peut être réduite).
- Problème de multi-pollutions qui limite le choix des plantes (**Rudolph, 2010**).

### III. Données générales sur *Moringa oleifera* L.

#### III.1. Origine et distribution de *Moringa oleifera* L.

*Moringa oleifera* L. arbre originaire d'Inde, aujourd'hui très largement répandu à travers le monde, est par ailleurs cultivé dans toutes les régions tropicales, notamment en Afrique ( **Olson et Carlquist 2001; De Saint Sauveur et Broin, 2006**). *Moringa* peut se trouver dans des zones très arides comme le Sahara, mais il préfère les climats semi-tropicaux humides. Cet arbuste est retrouvé autour de la Mer rouge, de la Mer Morte au Kenya, Namibie, Angola, ainsi qu'en Asie sous-continent indien : Pakistan, Inde et Bangladesh (**Olson, 2001**). Son introduction en Afrique de l'Est a eu lieu au début du 20<sup>ème</sup> siècle par le biais du commerce et des échanges maritimes (**Foidl et al., 2001**).

#### III.2. Dénomination et taxonomie

**Tableau 3** : Systématique et dénomination internationale du *Moringa oleifera* L. (**Laley et al., 2015; Sánchez-Martín et al., 2009; Potisate et al., 2014**).

Systématique	Dénomination internationale
<b>Règne</b> : plante	<b>Anglais</b> : West Indian tree Drumstik tree Naver die tree
<b>Sous-règne</b> : tracheobionta	
<b>Classe</b> : Mgnoliopsida	
<b>Ordre</b> : Capparales	<b>Arabe</b> :Rawag
<b>Famille</b> : Moringaceae	Shagara Al Ruwag
<b>Division</b> : Magnoliopyte	<b>Indien</b> :Mungn
<b>Genre</b> : <i>Moringa</i>	<b>Français</b> : Moringe à graine ailée Mrungue
<b>Espèce</b> : <i>oleifera</i>	

*Moringa* appartient à une famille monogénérique dont on connaît 14 espèces Neuf D'entre elles sont africaines, deux malgaches, deux indiennes et une en Arabie. Les espèces les plus courantes sont: *Moringa oleifera*, *Moringa stenopetala*, *Moringa conxanensis*, *Moringa Drouhardii*, *Moringa Longituba* et *Moringa Peregrina*. «Moringa» vient demuringa en malayalam une langue indienne.

La plupart des langues utilisent un dérivé phonétique de ce mot pour désigner la plante *Moringa oleifera* L. arbre 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 semis ou de boutures et à se régénérer même après des coupes très sévères (Fuglie, 2001).

### III. 3.Description de *Moringa oleifera* L.

*Moringa oleifera* L.est un arbre pérenne, à croissance rapide, qui peut atteindre 7 à 12 mètres de hauteur et dont le tronc mesure 20 à 40 cm de diamètre ,il est généralement droit, mais il est parfois très peu développé. Il atteint en général 1,5 à 2 mètres de haut avant de se ramifier, bien qu'il puisse parfois atteindre les 3 mètres (Foidl *et al.*, 2001).



**Fig. 9 :** Arbre de *Moringa oleifera* L. (De Saint Sauveur et Broin, 2010).

- Les feuilles sont duveteuses, bi ou tripennées, et se développent principalement dans la partie terminale des branches (Figure10 ).



**Fig. 10 :** Feuilles de *Moringa oleifera* L. (Atakpama *et al.*, 2014)

- Les fleurs mesurent 2,5 cm de large et se présentent sous forme de panicules axillaires de 10 à 25 cm, elles sont blanches ou couleur crème, avec des points jaunes à la base (Figure 11).



**Fig. 11 :** Fleurs de *Moringa oleifera* L. (Saint Sauveur et Broin, 2010)

- Les fruits forment des gousses à trois lobes mesurant 20 à 60 cm de long. Les gousses sèches s'ouvrent à trois parties en libérant 12 à 35 graines ; ces dernières sont arrondies, ailées, avec une coque marron semi perméable. Le poids moyen d'une graine est de 0,3 g dont 25% sont représentés par la coque (Figure 12) (Makkar et Becker, 1997; Laleye *et al.*, 2015).

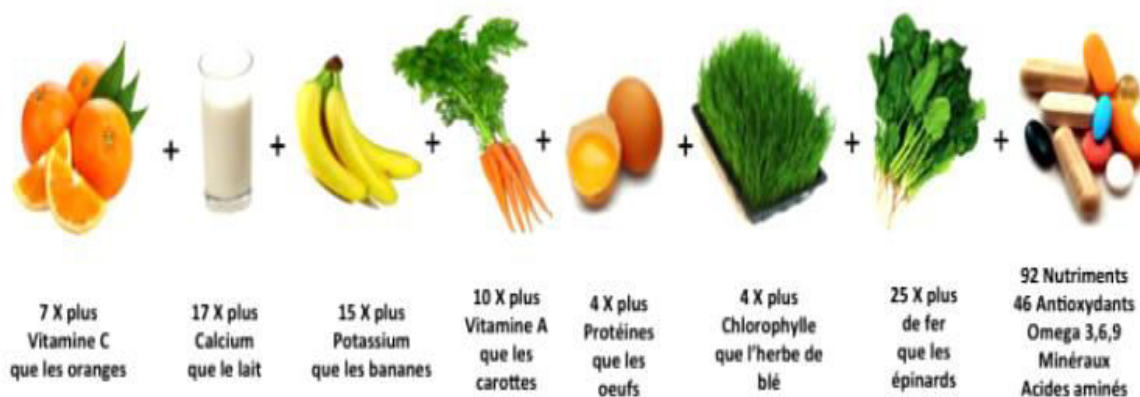


**Fig. 12 :** Fruits de *Moringa oleifera* L. (Atakpama *et al.*, 2014)

#### III.4. Valeurs nutritives et usages des feuilles du *Moringa Oleifera* L.

*Moringa oleifera* L. 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* L. 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* rivalise avec celle du lait et des œufs (Jongrungruangchok *et al.*, 2010).



**Fig. 13:** Valeurs nutritives des feuilles du *Moringa Oleifera* L. (Fahey, 2005).

### III.5. Utilisation médicinale:

*Moringa oleifera* L. une source d'antioxydants d'où leur exploitation a des fins thérapeutiques, Le suc de ces feuilles instillé dans les yeux soulagerait des céphalées et des convulsions, alors que l'ingestion du macéré aqueux des tiges feuillées calme des ophtalmies (Abrogoua *et al.*, 2012; Fahey, 2005). Des recherches ont montré que cette plante a un usage préventif et curatif, c'est un antifongique, antibiotique, hypoglycémien, diminue la tension artérielle et soulage les maux de tête...etc. (Patel *et al.*, 2010).

### III.6. Autres domaines d'utilisation

*Moringa oleifera* L. est une espèce d'arbre à usage multiple typique avec un potentiel économique élevé (Anwar *et al.*, 2007).

L'arbre est utilisé pour la conservation des sols, ombre, brise-vent,...etc. Les feuilles peuvent être utilisées comme fourrage pour le bétail en particulier pour les chèvres, les chameaux, et les ânes. Le bois blanc brûle sans fumée et donne un bleu colorant. En Inde, la pulpe a été utilisée pour fabriquer du papier approprié pour le papier journal, l'emballage, l'impression l'écriture, le textile et la cellophane (Guha et Negi, 1965).

Le «ben-oil» issu des graines conserve sa qualité et peut donc lubrifier des machines de précision. Il est également utilisé pour l'illuminant, cosmétiques-parfums et la coiffure.

Les huiles ont révélé être particulièrement efficaces dans la fabrication de savon produisant une mousse stable et la vente à haute efficacité adaptée pour certains pays d'Afrique.

Le tourteau considéré comme impropre à l'alimentation animale en raison de la forte teneur en alcaloïdes et des saponines est principalement utilisé comme engrais. Les graines et le tourteau résidu de l'extraction de l'huile, peuvent être utilisés pour la purification de l'eau (**Panda *et al.*,2008**)

### I.1. Site expérimental

Le travail a été réalisé dans 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 (Fig. 14).



**Fig. 14:** Site d'expérimentation.

### I.2. Condition de culture

#### I.2.1. Préparation du substrat de culture

Le substrat utilisé dans ce travail est du sable des dunes ayant subi :

- Un tamisage (2 mm) approprié pour éliminer les débris et les déchets végétaux, animaux et toutes les pierres afin d'obtenir un sable fin et net .
- Des lavages successifs à l'eau ordinaire (3 fois).
- Un traitement à l'esprit de sel pour éliminer les sels, les carbonates, les chlorures...etc.
- Des rinçages répétés à l'eau ordinaire (3 fois) et à l'eau distillée (1 fois) afin de supprimer toute trace de chlore.
- Enfin, un séchage à l'aire libre.

**Fig. 15:** tamisage du sable**Fig. 16 :** lavage du sable à l'eau ordinaire**Fig. 17:** traitement à l'esprit du sel**Fig. 18:** rinçage de sable à l'eau distillée**Fig. 19 :** séchage du sable

### I.2.2. Préparation des cylindres et remplissage du substrat

Pour la réalisation de ce travail, on a utilisé des cylindres en plastiques de 20 cm de diamètre et de 50 cm d'hauteur, chaque cylindre a une contenance de 10 kg du mélange sable et terreau (90% sable et 10% de terreau) avec une capacité de rétention de 1300 ml. Le fond des cylindres a été recouvert d'une couche de graviers après un lavage à l'eau du robinet permettant le drainage avant la mise du substrat.

## I.3. Matériel végétal

### I.3.1. Choix de l'espèce végétale

Les graines utilisées dans cette étude sont des semences de *Moringa oleifera* L. qui est une plante à une croissance rapide et d'une biomasse importante, à achetée a wilaya El Alleug de Blida en Algérie.



**Fig. 20 :** Graines de *Moringa oleifera* L.

### I.3.2. Préparation des graines pour la germination

Au laboratoire de biodiversité et conservation des eaux et des sols de l'université de Mostaganem, les graines de *Moringa oleifera* L. sont lavées avec hypochlorite de sodium dosée à 8° pendant 5 minutes pour éliminer toute contamination fongique. Puis un rinçages à l'eau distillée pour supprimer toutes traces de l'hypochlorite de sodium, ensuite les graines sont trempées dans de l'eau distillée tiède pendant 24 h pour faciliter leurs germination.



**Fig. 21:** Laver les graines avec hypochlorite de sodium



**Fig. 22 :** Rinçages à l'eau distillée

### I.3.3. Germination des graines de *Moringa oleifera* L.

La germination des graines a été réalisée au niveau de laboratoire de biodiversité et conservation des eaux et des sols de l'université. Elles sont mises à germer le 18/03/2019, dans des alvéoles contenant du terreau pour la production des plantules. Ces alvéoles sont arrosées avec de l'eau distillée à raison de trois fois par semaine, pendant 28 jours.



**Fig. 23:** Plantules de *moringa oleifera* L. âgées de 28 jours.

### I.3.4. Repiquage

Au niveau de la serre, au bout du 28<sup>ème</sup> jour (le 16/04/2019) de la germination et après l'apparition des premières feuilles, les plantules sont repiquées dans des cylindres à raison d'une plantule par cylindre et cinq répétition par traitement. Ces plantules sont arrosées trois fois par semaine, une fois par solution nutritive « Activeg puissance 20 » (40g/ 20L), qui se compose de macroéléments et micro-éléments ( Voir tableau 4), et deux fois par l'eau distillée, en respectant la capacité de rétention (1300 ml /cylindre).

**Tab 4 :** Composition de la solution nutritive « Activeg puissance 20 ».

Composition	Poids (%)
N	20%
P205	20%
K20	20%
MgO	0,4%
SO3 + OE	0,8%



**Fig. 24 :** Repiquage des Plantules de *Moringa oleifera* L. dans les cylindres.

### I.3.5. Préparation des solutions stressante

Le plomb est apporté sous forme de nitrate de plomb ( $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ ) aux Cinq doses différentes : 0, 3, 5, 7 et 10mM

- Dose 01: 0mM  $\longrightarrow$  0 ppm
- Dose 02 : 3mM  $\longrightarrow$  993,6 ppm = 0,9935 g/l
- Dose 03: 5mM  $\longrightarrow$  1656 ppm = 1,656 g/l
- Dose 04: 7mM  $\longrightarrow$  2318,4 ppm= 2,3184 g/l
- Dose 05:10mM  $\longrightarrow$  3312 ppm= 3,312 g/l

L'application du stress, est effectuée aux plantes âgés de 67 jours de la culture, pendant quinze jours à raison d'une fois par semaine en respectant la capacité de rétention (1300 ml /cylindre). Cinq doses ont été appliqué (0, 3, 5, 7 et 10 mM) avec cinq répétitions pour chaque traitement, dont la première application du stress est effectuée le 25/05/2019 et la deuxième application est effectuée après une semaine de la première application (01/06/2019).



**Fig. 25** : Application de stress de nitrate de plomb ( $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ ).

- Les plantes stressées sont arrosées trois fois par semaine : une fois par solution nutritive, une fois par l'eau distillée et une fois par la solution de stress (nitrate du plomb  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ ).
- Les plantes témoins sont arrosées trois fois par semaine : une fois par solution nutritive et deux fois par l'eau distillée jusqu'au la fin de l'expérience.

### I.3.6. Dispositif expérimental

Pour l'installation de l'expérience dans la serre, on a choisi d'installer les plantes en randomisation totale répartie en 5 blocs, chaque bloc contient cinq doses et une seule répétition pour chaque traitement (Voir le tableau 5).

**Tableau 5:** Dispositif expérimental.

Bloc1	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	03 mM Répétition2	0 mM Répétition1
3 mM Répétition 2	10 mM Répétition 5	0 mM Répétition 1	7 mM Répétition 4	10 mM Répétition 5
10 mM Répétition5	0 mM Répétition1	5 mM Répétition 3	5 mM Répétition3	5 mM Répétition 3
5 mM Répétition3	7 mM Répétition4	7 mM Répétition 4	0 mM Répétition 1	3 mM Répétition 2

## I.4. Méthodes

A la fin de l'expérience ; les plantes du *Moringa oleifera* L., sont récoltées et rincées rapidement et abondamment avec l'eau de robinet puis à l'eau distillé pour éliminer toute trace du substrat. Les 25 échantillons sont placés dans des sachets et amené au laboratoire de biodiversité et conservation des eaux et des sols du département de biologie.

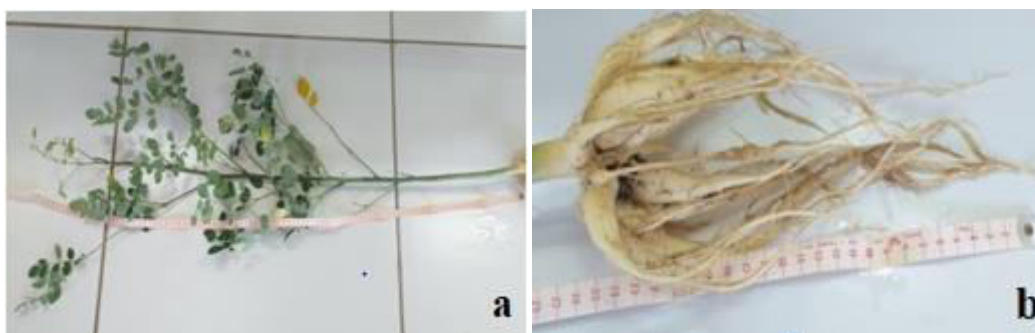
### I.4.1. Paramètres étudiés

#### I.4.1.1. Paramètres Biométriques

##### ➤ Mesure de la longueur des parties aériennes et sous terraines

Après la récolte, les plantes de *Moringa oleifera* L. sont subdivisées en deux parties : parties aériennes et sous terraines dont la longueur de ces parties est déterminée à l'aide

d'un mètre à ruban graduée en (cm). Les valeurs obtenues sont les moyennes des cinq répétitions par traitement.



**Fig. 26:** Mesure de l'élongation des parties aériennes (a) et la partie sous terrain (b).

➤ **La masse de la matière fraîche (MF)**

Les plantes du *Moringa oleifera* L. sont pesées pour la détermination de la matière fraîche (MF) en gramme. Les valeurs obtenues sont les moyennes de cinq répétitions par dose.



**Fig. 27:** la masse de la matière fraîche des parties aériennes (a) et la partie sous terrain (b) des plantes de *Moringa oleifera* L.

➤ **La masse de la matière sèche (MS)**

Après la prise de la masse de la matière fraîche des parties aériennes et sous terraines des plantes du *Moringa oleifera* L., qui sont enveloppées dans un papier aluminium et placées dans l'étuve à 80°C pendant 48 h pour déterminer la masse de la matière sèche. Les valeurs obtenues sont les moyennes de cinq répétitions par traitement.



**Fig. 28:** la masse de la matière sèche des parties aériennes (a) et la partie sous terrain (b) des plantes du *Moringa oleifera* L.

#### I.4.2. Paramètres physiologiques

##### ➤ 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)** et au niveau de l'avant dernière feuille .

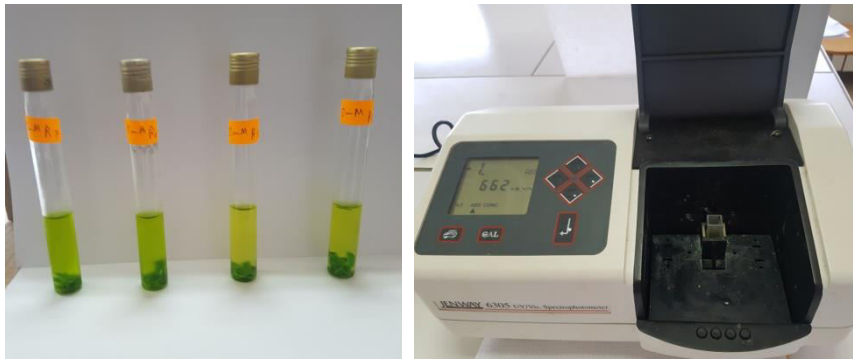
Dans des tubes à essai, on ajoute à 100 mg d'échantillon frais, coupé en petits fragments, 10 ml d'acétone à 95%, l'ensemble est conservé dans l'obscurité et à 4°C pendant 48 heures.

Les concentrations de la chlorophylle « a », de la chlorophylle « b » sont effectués à l'aide d'un spectrophotomètre à UV et à des densités optiques respectives de 662 nm et 664 nm. L'appareil est étalonné avec la solution témoin à base d'acétone à 95%. Les teneurs de la chlorophylle a, de la chlorophylle b et les chlorophylles totales sont calculées par les formules suivantes :

$$\text{Chl a (mg.L-1)} = 12,25 \times \text{Do (662)} - 0,99 \times \text{Do (664)}.$$

$$\text{Chl b (mg.L-1)} = 21,42 \times \text{Do (664)} - 4,65 \times \text{Do (662)}.$$

$$\text{Chlorophylle totale (mg.L-1)} = \text{Chl a} + \text{Chl b}$$



**Fig. 29:** Dosage de la chlorophylle

### **I.5. Etude statistique**

Les résultats obtenus (longueur des parties aériennes et racinaires et la masse de la matière fraîche et sèche) ont fait l'objet d'une analyse statistique par le logiciel R version 3.5.2 (2018-12-20), bien que l'étude statistique du dosage de chlorophylle est analysé a l'aide d'un logiciel Statbox.

## II. 1. Analyses des paramètres morpho-physiologiques

### II.1.1. Effet de plomb sur les longueurs des parties aériennes et sous terraines de *Moringa oleifera* L.

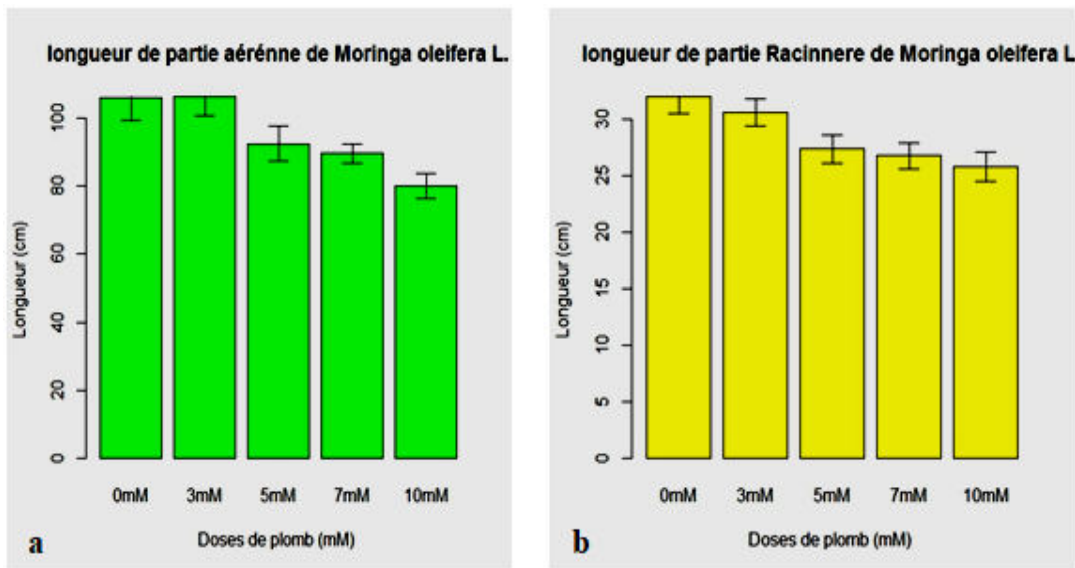
#### ❖ Longueurs de la partie aérienne

Les résultats obtenus montrent une diminution importante dans la longueur de la partie aérienne des plantes stressées par le plomb à différentes concentrations ( 5, 7 et 10 mM) par rapport aux plantes témoins et les plantes traitées avec 3 mM .(Figure30.a). En effet, la longueur des parties aériennes la plus élevée a été enregistrée au niveau des plantes témoins avec une moyenne de 105,9 cm, bien que la longueur la plus basse a été enregistrée chez les plantes traitées avec 10 mM où elle est égale 80cm. alors qu'au niveau des plantes traitées avec 5 mM, on a enregistré des valeurs de 83,4 cm respectivement avec les doses 3 et 5mM de plomb.

L'analyse statistique de l'effet du plomb sur la longueur de la partie aérienne de *Moringa oleifera* L révèle une diminution hautement significative où la probabilité est égale 0.005 ( $P > 0.05$ ).

#### ❖ Longueur de la parties sous terraines

Les résultats obtenus montrent une diminution hautement significative où la probabilité est égale 0.01 ( $P > 0.05$ ) de la longueur des parties sous terraines de *Moringa oleifera* L. avec des valeurs de 24.4, 26.8 , et 25.4 cm respectivement pour les doses 3,5 , 7 et 10 mM du Pb comparativement au témoin mM où l'élongation racinaire est égale 33 cm (figure30. b).



**Fig. 30:** L'effet du plomb sur la longueur de la partie aérienne (a) et souterraine (b) de *Moringa oleifera* L.

### II.1.2. Effet du plomb sur le poids frais de la partie aérienne et souterraine de *Moringa oleifera* L.

#### ❖ poids frais de la partie aérienne

Les résultats obtenus, révèlent que le poids frais de la partie aérienne des plantes de *Moringa oleifera* L. diminue légèrement en fonction de l'accroissement des doses de plomb appliquées (Figure 31.a).

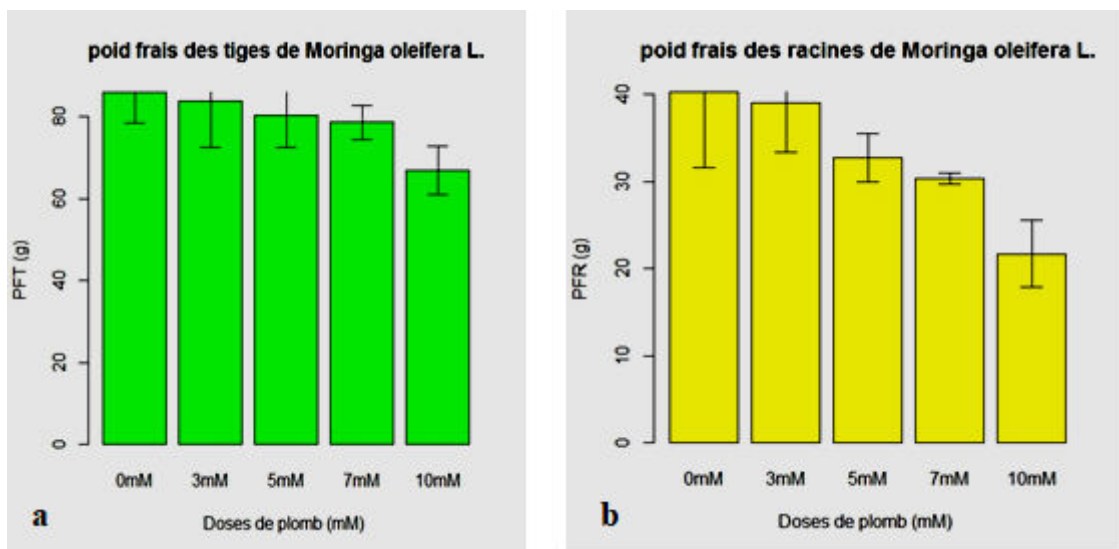
Le poids frais le plus élevé est de 85.96 g a enregistré, en absence de plomb chez les plantes témoins. En présence de plomb le poids frais des parties aériennes des plantes stressées par les différentes doses de plomb diminue d'une façon non significative avec une probabilité qui est égale 0,4 ( $P > 0,05$ ) pour les doses 3, 5, 7 et 10 mM ; les moyennes du poids frais sont évaluées respectivement 83.88, 80.26, 78.66 et 67.02g.

#### ❖ poids frais de la partie sous terrainne

Les résultats obtenus montrent une diminution importante de poids frais de la partie racinaire des plantes soumises au stress par le plomb par rapport à la plante témoin (Figure 31.b).

La production de la matière fraîche racinaire des plantes stressées au cuivre diminue proportionnellement avec les doses appliquées. Le poids frais obtenu pour les racines des plantes traitées à 3, 5 mM diminue légèrement à 39.04 et 32.78 g respectivement comparativement à celui des racines des plantes témoins (40.24 g). L'enrichissement des solutions à 7 et 10 mM de plomb provoque une diminution de la production de la matière fraîche (30.34 et 21.68 g respectivement).

L'analyse statistique montre que la production de la matière fraîche des racines des plantes sous l'effet du plomb est non significative dont  $P = 0.1$ .



**Fig. 31:** Effet du plomb sur le poids de la matière fraîche de la parties aérienne (a) et sous terraines (b) des plantes de *Moringa oleifera* L.

### II.1.3. Effet du plomb sur la matière sèche de la partie aérienne et racinaire des plantes de *Moringa oleifera* L.

#### ❖ Matière sèche de la partie aérienne

La production de la matière sèche aérienne est plus importante que la matière sèche racinaire de *Moringa oleifera* L. (Figure 32).

Les résultats obtenus montrent que, Le poids sec de la partie aérienne de la plante diminue progressivement avec des doses croissantes de plomb. Le poids le plus élevé de la matière sèche (13.78 g) est obtenu pour le témoin, chez les plantes stressées à 3,5, 7 et 10 mM, il y a une réduction de la matière sèche aérienne par rapport aux témoins où on a

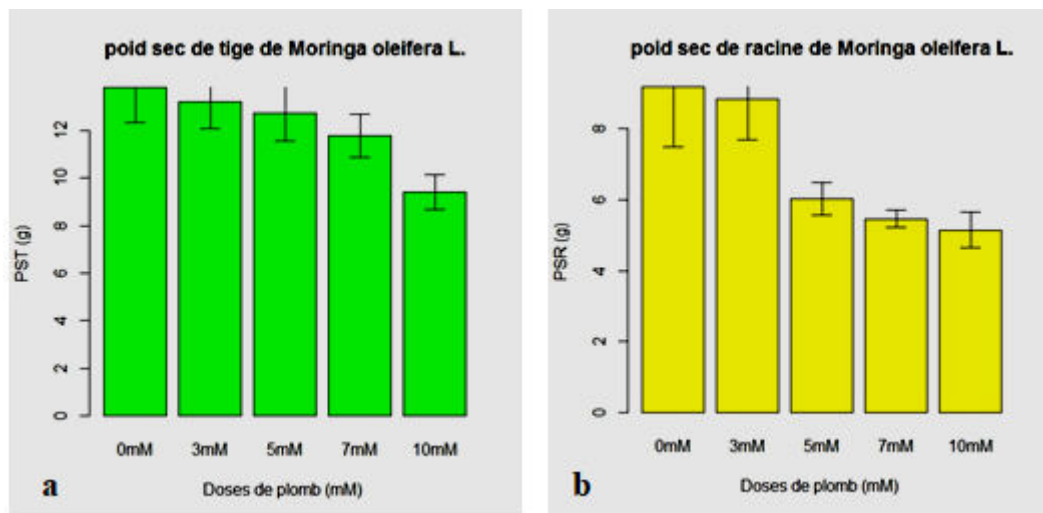
enregistré les valeurs de 13.2, 12.72, 11.76 et 9.4g respectivement avec les doses (3, 5, 7 et 10 mM) (Figure 32.a).

L'étude statistique montre un effet non significative ( $p=0.08$ ) de plomb sur la production de la matière sèche aérienne des plantes stressées par rapport à la plante témoin.

#### ❖ Matière sèche de la partie sous terrainne

Les résultats obtenus révèlent que la production de la matière sèche des racines de *Moringa oleifera* L. diminue avec les doses croissantes de plomb par rapport au témoin (Figure 32.b).

En absence de plomb, La masse de la matière sèche des plantes témoins enregistré est estimée à 9.16 g. En présence de plomb, La production de la matière sèche des plantes de *Moringa oleifera* L. traitées par doses différentes de plomb est diminuée d'une façon hautement significative avec une probabilité qui est égale 0,01 ( $P > 0,05$ ), pour les doses 3, 5, 7 et 10 mM les moyennes du poids sec des racines sont évaluées respectivement 8.82, 4.7, 4.38 , et 3.9g.



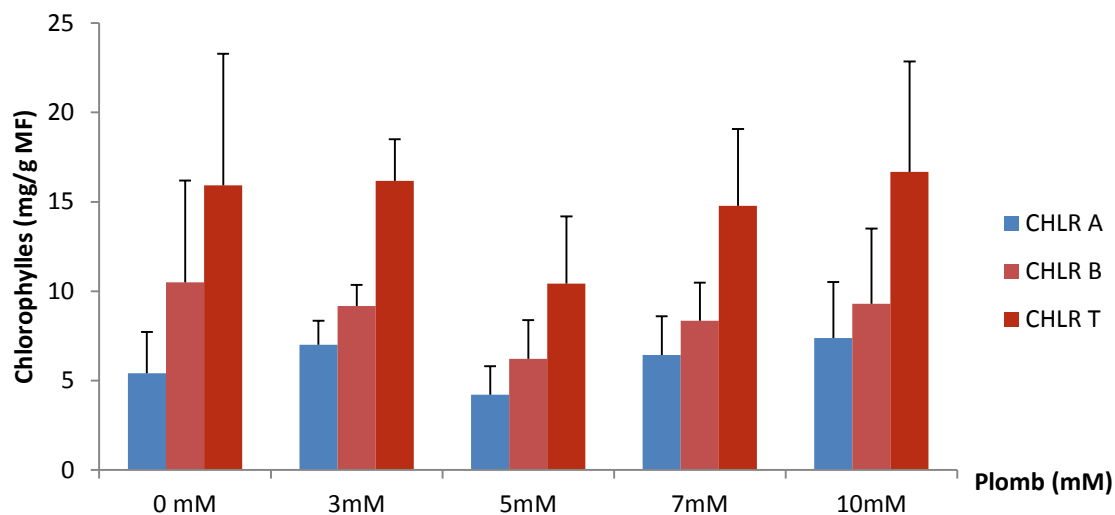
**Fig. 32:** l'effet du plomb sur le poids sèche de la partie aérienne (PST, a) et sous terrainne (PSR, b) des plantes de *Moringa oleifera* L.

#### II.1.4. Effet du plomb sur la teneur en pigments chlorophylliens foliaires

La chlorophylle b et totale chez les feuilles de la plante est largement supérieure à celle de la chlorophylle a. La chlorophylle a, b et totale diminue progressivement avec des doses croissantes de plomb (Figure 33).

Les résultats obtenus montrent une diminution importante de la teneur en chlorophylle a, b et totale dans les feuilles des plantes soumises au stress par le plomb par rapport à la plante témoin (Figure 33). La teneur la plus basse de la teneur en chlorophylle a, b, et totale est enregistré chez les plantes traités avec 5 mM par rapport au témoin.

L'analyse statistique montre que l'accumulation de la chlorophylle a, b et totale est non significative dans les feuilles de la plante avec tous les traitements de plomb.



**Fig. 33:** l'effet du plomb sur teneur en chlorophylle de *Moringa*

## II.2. Discussion

Les résultats obtenus montrent que le stress des métaux lourds induit des changements dans les plantes conduisant à une diminution de la biomasse sèche et fraîche, inhibent l'allongement de la racine, réduisent la hauteur de la plante, une perturbation des fonctions physiologiques.

### II.2.1. Paramètres morphologiques

#### ➤ Effet du plomb sur la longueur des tiges et racines chez *Moringa oleifera* L.

Les résultats obtenus révèlent que le plomb inhibe la croissance des plantes de *Moringa oleifera* L. qui se manifeste une diminution importante de la longueur des parties aériennes et souterraines des plantes stressées par différentes concentrations de plomb (3, 5, 7 et 10 mM) par rapport à la plante témoin. Ces résultats obtenus sont en accord avec ceux de (Sereguine et Ivanov, 1998) qui ont également observé une inhibition de 50% de la croissance des racines du maïs traité par le nitrate de plomb, de nombreux travaux font état d'une inhibition de la croissance et réduction d'élongation foliaire et racinaire, et les masses de matière fraîche et sèche, après exposition par le plomb des plantes variées telles que les petits pois (Kopittke et al., 2007b), le radis (Gopal et Rizvi, 2008), le maïs (Ekmekçiet al., 2009).

#### ➤ Effet de plomb sur les matières sèche et fraîche des parties aériennes et racinaires chez *Moringa oleifera* L.

Les résultats expérimentaux obtenus montrent que le poids frais et le poids sec de la partie aérienne et racinaire de *Moringa oleifera* L. traitées par les doses croissantes de plomb (3, 5, 7 et 10 mM) ont diminué comparativement à la plante non stressée.

Cette réduction de la croissance pondérale de la partie aérienne et racinaire a également été relevée chez plusieurs espèces soumises à la présence du Pb comme par exemple certaines espèces de Fabacées (Huang et Cunningham, 1996 ; Piechalak et al., 2002), *Plantago major* (Kosobrukhov et al., 2004), *Elsholtzia argyi* (Islam et al., 2007), *pisum sativum* L. (Kopittke et al., 2007), *Raphanus sativus* L. (Gopal et Rizvi, 2008), *Zee mays* (Ekmekçi et al., 2009), *Arabidopsis thaliana* (Phang et al., 2011).

### II.2.2. Paramètres Physiologiques

#### ➤ Effet du plomb sur la teneur en pigments chlorophylliens foliaires

La teneur en pigments chlorophylliens est souvent utilisée pour évaluer l'impact de nombreux stress environnementaux. Au niveau physiologique une exposition au plomb entraîne de nombreuses perturbations dans les parties aériennes, en particulier l'appareil photosynthétique (**Seregin et Ivanov, 2001; Sharma et Dubey, 2005**). Nos résultats montrent une diminution importante de la teneur en pigments chlorophyllien (CHa, CHb et CHt) du *Moringa oleifera* L. exposé à différentes concentrations en Pb (3, 5, 7 et 10 mM) par rapport aux témoins.

Cette diminution s'accroît avec l'augmentation de l'intensité du stress. De ce fait plusieurs travaux montrent que le plomb a une influence sur la réduction de la teneur en pigments chlorophylliens. Ceci pourrait être attribué d'une part, au stress qui provoque l'inhibition de l'acide aminolévulinique déshydratase (ALAD), une enzyme importante dans la biosynthèse de la chlorophylle (**Pereira et al., 2006**)

Les ions du plomb peuvent aussi être la cause principale de la détérioration de la structure et de la composition des thylakoïdes et des chloroplastes, ce qui a pour effet d'altérer les photosystèmes (**Yruela et al., 1996; Yruela, 2005**). L'effet des différentes concentrations de (Pb) ne semble pas identique sur les deux types de chlorophylle a et b, les résultats obtenus montrent que la chlorophylle a est plus sensible que la chlorophylle b à l'intoxication.

Le plomb pose actuellement des problèmes importants en matière de contamination de l'environnement. Les plantes, du fait de leur immobilité, sont particulièrement vulnérables à l'effet délétère de ce contaminant.

Ces dernières années, le développement de techniques efficaces pour décontaminer les sites pollués est devenu indispensable. L'une d'elles, la phytoremédiation qui exploite les propriétés de certaines plantes à tolérer et accumuler de grandes quantités de métaux lourds dans ces parties (tige, feuilles et / ou racines).

Cette étude consiste à déterminer l'impacte du plomb à différentes doses (0, 3, 5, 7 et 10 mM) sur les paramètres morphologique et physiologiques de *Moringa oleifera* L. et sur l'évaluation de la potentialité de cette espèce à tolérer à des doses élevées en Pb et sa capacité de dépollution d'un sol contaminé par le plomb.

Les résultats obtenus indiquent que l'exposition la plante du *Moringa oleifera* L. au stress métallique au plomb provoque une perturbation qui affecte ses processus morpho-physiologiques.

Les résultats de l'analyse morphologique indiquent que le plomb exerce un effet négatif sur la plante de *Moringa oleifera* L. qui se traduit par une inhibition de sa croissance, où on a enregistré une réduction dans la longueur des parties aériennes et souterraines, ainsi qu'une diminution dans la production de la matière fraîche et sèche. L'analyse physiologique de l'impacte de plomb sur la teneur en pigments chlorophylliens foliaires (Chl a, Chl b et Chl totale) révèle une diminution non significative à différentes concentrations du plomb. Alors que l'observation macroscopique a révélée l'apparition des signes visibles au niveau des feuilles et des racines (jaunissement et des taches brunes).

Notre travail laisse entrevoir de nombreuses perspectives d'expérimentations. Dans un premier temps et dans la continuité directe de cette étude, Il est nécessaire d'effectuer l'effet du plomb sur les paramètres biochimiques, anatomiques et génétiques *Moringa oleifera* L. pour comprendre les mécanismes de toxicité du plomb mais également ceux de tolérance à ce métal. Ainsi le dosage du plomb dans les différentes parties de la plantes, pour savoir les parties responsables de l'accumulation de ce métal.

Il sera important aussi de tester les capacités de tolérance du *Moringa oleifer* L. à d'autres métaux (Cd, Zn, Ni, Cu...), car il est rare qu'un milieu soit pollué par un seul métal. Ceci permettrait d'étudier les réponses de la plante aux autres métaux mais aussi sa réaction face à la combinaison de plusieurs d'entre eux qui pourrait induire une contrainte différente. De plus un phénomène de compétition entre les différents éléments métalliques pourra se produire permettant de déterminer les « préférences » de la plante.

## **RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

### **❖ A**

- **Alloway B. (1995).** Heavy metals in soils, Blackie Academic and Professional. 2nd Ed.
- **Alkorta I, Hernandez-Allica J, Becerril JM, Amezaga I, Albizu I et Garbisu C. (2004).** Recent findings on the phytoremediation of soils contaminated with environmentally toxic heavy metals and metalloids such as zinc, cadmium, lead and arsenic. Environ Sci Biotechnol. 3: 71-90.
- **Ann-Peer W., Baxter I.R., Richards E.L., Freeman J.L et Murphy A.S. (2003).** Phytoremediation and hyperaccumulator plants. Int J Phytorem. 5 : 89-103
- **Antonovics J., Bradshaw A.D. & Turner R.G. (1971).** Heavy metal tolerance in plants. Advances in Ecological Research, 7, 1-85.
- **Anwar F., Ashraf M., Iqbal M., et Hanger B. (2005).** Inter provenance variation in composition of moringa oleifera oil seeds from Pakistan. JAOCS. 1: 82
- **Aoun M. (2009).** Action du cadmium sur les plants de moutarde indienne (*Brassicajuncea* L. Czern) néoformés à partir de couches cellulaires minces et issus de semis. Analyses physiologiques et rôle des polyamines. Thèse de doctorat en science, université de Bretagne occidentale. 135 p.
- **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 phytogénétique à usage multiple." Sciences de la vie, de la terre et agronomie, 2(1).

### **❖ B**

- **Baize D. (1997).** "Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France). "INRA Editions, Paris, 408 pp.
- **Baize D. (2000).** Guide des analyses en pédologie. 2ème éd. INRA. Paris. 257 p

- **Baize D .(2002).**Les éléments traces métalliques dans les sols. INRA éditions
- **Bani A., Echevarria G., Sulce S., Morel J.L., Mullai A., (2007).**In-situ phytoextraction of Ni by a native population of *Alyssum murale* on an ultramafic site (Albania), *Plant and Soil*, 293 :79-89
- **Barrs C et Weatherley P.E. (1968).** A re-examination of the relative turgidity technique for estimating water deficit in leaves. *Australian journal of Biological Sciences*. 15: 413-428
- **Berti W R et Cunningham S D., (1995)** .Sequentiel chemical extraction of trace elements: Development and use in remediating contaminated soils. Conference on the biochemistry of trace elements, Paris.
- **Bert v., deram A. (1999).** Guide des phytotechnologies : utilisation des plantes dans la
- **Bert V. (2012).** Les phytotechnologies appliquées aux sites et sols pollués: Etat de l'art et guide de mise en oeuvre. EDP Sciences, ADEME, Paris, 86 p
- **Bert, V. et al., (2013).** Les phytotechnologies appliquées aux sites et sols pollués ; Etat de l'art et guide de mise en oeuvre. EDP Science éd. s.l.ADEME.
- **Bourrelier P et J Berthelin .(1998).** "Contamination des sols par les éléments traces : les risques et leur gestion." Rapport de l'Académie des sciences Ed. Lavoisier, Paris
- **Brunet J, Reppelin A, Varrault G, Terryn N et Zuily-Fodil Y .(2008).**"Lead accumulation in the roots of grass pea ( *Lathyrus sativus* L.)". *C.R.Biologies* 331 : 859-864.
- **Briat JF., Lebrun M., (1999).** Plant responses to metal toxicity. *Plant Biology and Pathology, cadmium and lead. Plant Physiol.* 54, 122-124.

#### ❖ C

- **Cecchi M. (2008).** Devenir du plomb dans le système sol- plante. Cas d'un sol contaminé par une usine de recyclage du plomb et de deux plantes potagères (Fève et Tomate). Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse. 215 : 12-35.
- **Cenkci, S, Hakki Cigerci I, Yildiz, M Özay C, Bozdog A, and Terzi H.,(2010).** Lead contamination reduces chlorophyll biosynthesis and genomic template stability in *Brassicarapa* L. *Environ. Exp. Bot.* 67, 467-473
- **Chatterjee, C., Dube, B. K., Sinha, P. & Srivastava, P.,(2004).** Detrimental effects of lead phytotoxicity on growth, yield and metabolism of rice. *Soil Science and Plant Analysis*, 35, 255-265.

- **Cobb G.P., Sands K., Waters M., Wixson B.G. and Dorward-King E.,(2000).**Accumulation of heavy metals by vegetables grown in mine wastes. *Environ Toxicol Chem*, 19, 3, 600-607.
- **Curl, E.A., Truelove, B., (1986).** *The Rhizosphere*. Springer-Verlag, Berlin.

❖ **D**

- **Dechamp c., meerts P. (2003),**«La phytoremediation : Panacee pour l'environnement ou menace pour la biodiversite ? >>, *Les Naturalistes belges*, n°82, pp. 135-148. Delacroix 2006a l'idée de peindre un tableau sur ce thème qu'il ..... 364-369; Edina Bernard, Pierre Cabanne, Janic Durand et Gérard Legrand, *Histoire de l'Art du Moyen Âge à nos jours* , Paris, Larousse,, 947 p.
- **De Abreu C A., De Abreu M F et Andrade J C., (1998).** Distribution of lead in the soil profil evaluated by DTPA and Mehlich-3 solution. *Bragantia* 57, 185-882
- **De Saint Sauveur, A., and Broin, M. (2006).** "L'utilisation des feuilles de *Moringa oleifera* contre les carences alimentaires: un potentiel encore peu valorisé." Atelier international «*Moringa* et autres végétaux à fort potentiel nutritionnel: Stratégies, normes et marchés pour un meilleur impact sur la nutrition en Afrique». Accra, Ghana.
- **De Saint Sauveur, A., and Broin, M. (2010).**"Produire et transformer les feuilles demoringa."
- **Dumat C., Quenea K., Bermond A., ToinenS et Benedetti M F., (2006 ).** A study of the trace metal ion influence on the turn-over of soil organic matter in various cultivated contaminated soils. *Environmental Pollution*, 142: 521-529
- **Do Nascimento CWA et Xing B (2006).** Phytoextraction : A review on enhanced metal availability and plant accumulation. *Sci Agric (Piracicaba, Braz)*. 63: 299-311.

❖ **E**

- **Ekmekçi Y, Tanyolaç D, Ayhan B, (2009).** A crop tolerating oxidative stress induced by excess lead in maize. *Acta Physiologia Plantarum*. 31, 319-330.
- **Elmsley J. (2001).** *Nature's Building Blocks.A-Z guide to the elements*. Oxford University Press, Oxford, UK.

## ❖ F

- **Fahey, J. W. (2005).** Moringa oleifera: a review of the medical evidence for its nutritional, therapeutic, and prophylactic properties. Part 1. Trees for life Journal, 1(5), 1-15.
- **Fahr M, (2014).** Étude physiologique et moléculaire de la tolérance et l'accumulation du Pb chez une population métallicole et une population non métallicole d'*Hirschfeldia incana* (Brassicacée récoltée au Maroc) : Perspectives pour la phytoremédiation. Thèse de doctorat. Université Mohammed v -Faculté des Sciences–Rabat
- **Foidl, N., Makkar, H., and Becker, K. (2001).** "Potentiel de Moringa oleifera en agriculture et dans l'industrie." Potentiel de développement des produits de Moringa. Dar es Salaam, Tanzanie, du 29 octobre au 2 Novembre 2001.
- **Fuglie, L. (2001).** Combating malnutrition with Moringa. The miracle tree: the multiple attributes of Moringa. CTA Publication, Wageningen, the Netherlands, 117-136.

## ❖ G

- **Gadd, J.M. (2000).** Phytoremediation of toxic metals: using plants to clean up the
- **Gartside, D.W. & McNeilly, T.B. (1974).** The potential for evolution of heavy metal tolerance in plants. II: Copper tolerance in normal populations of different plant species. Heredity, 32:335-348.
- **Ghosh M et Singh SP (2005).** A review on phytoremediation of heavy metals and utilization of its by products. App Ecol Environ Res. 3: 1-18.
- **Gopal R, Rizvi AH. (2008).** Excess lead alters growth, metabolism and translocation of certain nutrients in radish. Chemosphere. 70(9), 1539–1544.
- **Gonzales X I, Aboal J R., Fernandez J A et Carballeira A., (2008).** Heavy metal transfers between trophic compartments in different ecosystems in Galicia (northwest Spain): Essential elements. Archives of Environmental Contamination and Toxicology 55: 691-700.
- **Guha S.R.D., Negi J.S. (1965).** Wrapping, printing, and writing paper from Moringa pterygasperma. Indian Pulp. (6): 377-379.

## ❖ H

- **Halloran John A. [archive].(1999).** Sumerian lexicon version 3.0.

- **Huang JW, Chen J, Berti WR, Cunningham SD. (1997).**Phytoremediation of lead contaminated soils: role of synthetic chelates in lead phytoextraction. *Environmental Science and Technology*. 31, 800-805.

❖ **I**

- **Islam E, Yang X, Li T, Liu D, Jin, X, Meng F. (2007).** Effect of Pb toxicity on root morphology, physiology and ultrastructure in the two ecotypes of *Elsholtzia argyi*. *Journal of Hazardous Materials*. 147 (3), 806-816.
- **Islam E, D Liu, T Li, X Yang, X Jin, Q Mahmood, S Tian et J Li. (2008).** "Effect of Pb toxicity on leaf growth, physiology and ultrastructure in the two ecotypes of *Elsholtzia argyi*." *Journal of Hazardous Materials* In Press, Corrected Proof.

❖ **J**

- **Jopony M and SD Young (1994).** "The solid solution equilibria of lead and cadmium in polluted soils." *European Journal of Soil Science* 45(1): 59-70.
- **Jongrungruangchok, S., Bunrathep, S., & Songsak, T. (2010).** Nutrients and minerals content of eleven different samples of *Moringa oleifera* cultivated in Thailand. *J Health Res*, 24(3), 123-127

❖ **K**

- **Kabata-Pendias A et Pendias H (2001).** "Trace elements in soils and plants." CRC Press, Boca Raton, Florida, 2nd Edition, 209 p.
- **Koller E. (2004)** .Traitement des pollutions industrielles, Ed. Dunod, Paris, pp 424.
- **Kopittke PM., Colin JA., Kopittke RA., Menzies NW., (2007).**Toxic effects of Pb<sup>2+</sup> on growth of cowpea (*Vigna unguiculata*). *Environmental Pollution*, in press.
- **Kosobrukhov A, Knyazeva I, Mudrik V. (2004).** Plantago major plants responses to increase content of lead in soil: Growth and photosynthesis. *Plant Growth Regulation*. 42, 145-151.
- **Kraemer U. (2010).** Metal Hyperaccumulation in Plants, *Annual Review of Plant Biology*, Vol 61, 61: 517-534.
- **Krämer U. (2005).** Phytoremediation : Novel approaches to cleaning up polluted soils. *Cur Opin Biotechno*. 2: 133-141.

❖ L

- **Laïd Y. (2012)**. Effets sanitaires liés au plomb. Journée d'Etude sur la Médiatisation de l'Essence Sans Plomb Alger. Institut National de Santé Publique.
- **Laleye, O. A. F., Ahissou, H., Olounlade, A. P., Azando, E. V. B., and Laleye, A. (2015)**. "Etude bibliographique de trois plantes antidiabétiques de la flore béninoise: *Khaya senegalensis* (Desr) A. Juss (Meliaceae), *Momordicacharantia* Linn (Cucurbitaceae) et *Moringa oleifera* Lam (Moringaceae)." *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 9(5), 2682-2700.
- **Lamb DT, Ming H, MegharajM et Naidu R (2010)**. Phytotoxicity and accumulation of lead in Australian native vegetation. *Arch Environ Contamin Toxicol*. 58 (3): 613-621.
- **Laperche V., Dictor MC., Clozel-Leloup B et Baranger Ph., (2004)**. Guide méthodologique. du plomb, appliqué à la gestion des sites et sols pollués. BRGM/RP-52881-FR.
- **Lecoq Henri. (2014)**. AFFAIRES DE PLOMBS. Une enquête de M-H. Lecoq Dossier pédagogique, 28 juin 2013 au 16 mars 2014 Service éducatif.
- **Liu D, Zou J, Meng Q, Zou J et Jiang W (2009)**. Uptake and accumulation and oxidative stress in garlic (*Allium sativum* L.) under lead phytotoxicity. *Ecotoxicol*. 18:134143.
- **Louise , Hénaul-Ethier .(2016)**. ResearchGate phytoremédiation , Société québécoise de phytotechnologie - info@phytotechno.com 2030, Boul. Pie-IX, bureau 403, Montréal (Québec) H1V 2C8 PHYTOTECHNO.COM

❖ M

- **Makowski EK, A Kita, W Galas, W Karcz et JM Kuperberg (2002)**. "Lead distribution in corn seedlings (*Zea mays* L.) and its effect on growth and the concentrations of potassium and calcium." *Plant Growth Regulation* 37: 69-76.
- **Marschner H.(1995)** . Mineral Nutrition of Higher Plants, San Diego.
- **Marmioli M., Antonioli G., Maestri E et Marmioli N., (2005)**. "Evidence of the involvement of plant ligno-cellulosic structure in the sequestration of Pb: an X-ray spectroscopy-based analysis." *Environmental Pollution* 134(2): 217-227.

- **McLean C M., Koller C E., Rodger J C et MacFarlane G R., (2009 )**. Mammalian hair as an accumulative bioindicator of metal bioavailability in Australian terrestrial environments. *Science of the Total Environment* 407 (11): 3588-3596.
- **Meers E et Tack F. (2004)**. The potential of foliar treatments for enhanced phytoextraction of heavy metals from contaminated soil. *Remed J.* 14: 111-123.
- **Miquel MG. (2001)**. Les effets des métaux lourds sur l'environnement et la santé, rapport de l'office parlementaire des choix scientifiques (Sénat).
- **Mishra A et MA Choudhuri. (1998)**. "Amelioration of lead and mercury effects on germination and rice seedling growth by antioxidants." *Biologia Plantarum* 41(3): 469-473.
- **Monna, F. (2008)**. Cycles biogéochimiques des éléments traces métalliques aux interfaces de l'environnement. Thèse de doctorat : Sciences de la terre et de l'environnement : université de Bourgogne, 181 p.
- **Montarges-Pelletier E., Chardot V., Echevarria G., Michot L.J., Bauer A., Morel J.-L. (2008)**. Identification of nickel chelators in three hyperaccumulating plants: An X-ray spectroscopic study, *Phytochemistry*, 69: 1695-1709.
- **Morel JL., MenchM et Guckert A ., (1986)**. A measurement of Pb, Cu, Cd binding with mucilage exudates from maize (*Zeamays L.*) roots. *Biology and Fertility of Soils* 2: 29-34

❖ N

- **Nriagu JO. (1978)**. The biogeochemistry of lead in the environment. Ed JO Nriagu, Elsevier Biomedical Press, Amsterdam.

❖ O

- **Olson, M., and Carlquist, S. (2001)**. "Stem and root anatomical correlations with life form diversity, ecology, and systematics in *Moringa* (Moringaceae)." *Botanical Journal of the Linnean Society*, 135(4), 315-348.

❖ P

- **Panda S.K., Horie T., Kaneko T., Sugimota G., Sasano S., Shibasaka M., Katsuhara M. (2008)**. Mechanisms of Water transport mediated by PIP aquaporins and their regulation via phosphorylation events under salinity stress in barley roots. *Oxford Journals: Plant and Cell Physiology*. Vol 52 Issue 4. P.663-675.

- **Parys E., Romanowska E., Siedlecka M., Poskuta JW., (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.
- **Pereira LB, Tabaldi LA, Goncalves JF, Jukoski JO et Pauletto MM (2006).** Effect of aluminium on inolevulinic acid dehydratase (ALAD) and the development of cucumber (*Cucumis sativus*). *Environ Exp Bot* 57 : 106-115.
- **Phang IC, Leung DWM, Taylor HH, Burritt DJ. (2011).** Correlation of growth inhibition with accumulation of Pb in cellwall and changes in response to oxidative stress in *Arabidopsis thaliana* seedlings. *Plant Growth Regulation*. 64, 17-25.
- **Pichard A.(2002)** .Plomb et ses dérivés. Fiche INERIS
- **PILON-SMITS E. (2005).** «Phytoremediation », *Annual Review of Plant Biology*, Vol. 56, pp. 15-39.
- **Pourrut B.(2008).** Implication du stress oxydatif dans la toxicité du plomb sur une plante modèle, *Vicia faba* L.. Thèse doctorat, université de Toulouse. P 61- 67- 69- 84.
- **Potisate, Y., Phoungchandang, S., and Kerr, W. L. (2014).** "The effects of predrying treatments and different drying methods on phytochemical compound retention and drying characteristics of *Moringa* leaves (*Moringa oleifera* Lam.)." *Drying Technology*, 32(16), 1970-1985

#### ❖ Q

- Quartacci MF, Argilla A, Baker AJM et Navari-Izzo F (2006). Phytoextraction of metals from a multiply contaminated soil by Indian mustard. *Chem*. 63: 918-925.

#### ❖ R

- **Raskin I., Kumar P.B.A.N., Dushenkov S., Salt D.E. (1994).** Bioconcentration of heavy metals by plants. *Curr. Opin. Biotechnol.* 5: 285-90.
- **Rudolph J.(2010)** . La phytoremédiation une technique «écologique» alternative aux techniques conventionnelles? La reconversion de friches industrielles et la dépollution

des sols contaminés. Mémoire de fin de formation. Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Lyon. 32 P.

❖ S

- **Salt, D.E., Blaylock, M., Kumar, N., Dushenkov, V., Ensley, B.D., Chet, I. et Raskin, I., (1995).** Phytoremediation: A novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants. *Biotechnology*, Vol. 13:486-474.
- **Salt, D.E., Smith, R.D. and Raskin, I. (1998).** Phytoremediation. *Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 49, 643–68.
- **Saifullah E, MeersQadir M, de Caritat P, Tack FMG, Du Laing G et Zia MH (2009).** EDTA-assisted Pb phytoextraction. *Chemosphere.* 74: 1279-1291.
- **Sánchez-Martín, J., González-Velasco, M., and Beltrán-Heredia, J. (2009).** "Acacia mearnsii de wild tannin-based flocculant in surface water treatment." *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 29(2), 119-135.
- **Scippa G., Di Michel M., Onelli E., Patrignani G., Chitante R et Bray E. (2004).** The histone- like protein HI- S and the reponse of tomate leaves to water deficit. *Exp. Bot.* 55: 99- 100.
- **Seregin IV et Ivaniov VB., (2001).** Physiological aspects of cadmium and lead toxic effects on higher plants. *Russian Journal of Plant Physiology* 48: 523-544 et 606-630.
- **Shahid M, Pinelli E, Pourrut B, Silvestre J et Dumat C (2011).** Lead-induced genotoxicity to *Vicia faba* L. roots in relation with metal cell uptake and initial speciation. *Ecotoxicology Environ Safety.* 74 (1): 78-84.
- **Sharma P., Dubey RS., (2005).** Lead toxicity in plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology* 17 (1): 35-52.
- **Smits EAHP et Freeman JL (2006).** Environmental cleanup using plants : Biotechnological advances and ecological considerations. *Front Eco Environ.* 4: 203-210.
- **Sposito G, Lund LJ et Chang AC (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 SociAme J.* 46 (2): 260-264.
- **Sterckeman T., Douay F., Proix N et Fourrier H., (2000 ).** Vertical distribution of Cd, Pb, and Zn in soils near smelters in the North of France. *Environmental Pollution* 107: 377-389.

- **Stoeckli F., Lavanchy A., Hugi-Cleary D.; In: Meunier F (1998).**Editor, «Fundamentals of Adsorption. FOA-6», Paris : Elsevier, 75-80.

❖ **T**

- **TRC.(2001).**interstate technology and Regulatory cooperation work Group , phytotechnology technical and regulatory Guidance Document phytotechnology teams p .124.

❖ **W**

- **Wierzbicka M. (1998).** Lead in the apoplast of *Allium cepa* L. root tips ultrastructural studies. *Plant Sci.* 133 (1) : 105-119.

❖ **X**

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

❖ **Z**

- **Zheng LJ, Liu XM, Lütz-Meindl U et Peer T (2011).**Effects of lead and EDTA-assisted lead on biomass, lead uptake and mineral nutrients in *Lespedeza chinensis* and *Lespedeza davidii*. *Water Air Soil Poll.* 220 (1-4): 57-68.

## ❖ Etude statistique à l'aide du logiciel R

**Tableau 1 :** Analyse de variance de la longueur des parties aériennes de *Moringa oleifera* L.

	Df	Sum Sq	Mean Sq F	value	Pr (>F)
pb\$Plomb	4	2525	631.3	5.169	<b>0.00502</b>
Residuals	20	2442	122.1		

**Tableau 2 :** Corrélacion entre les doses de plomb et ses effets sur la longueur des parties aérienne des plantes *Moringa oleifera* L.

	diff	lwr	upr	p adj
3mM-0mM	0.3	-20.61411	21.214108	0.9999992
5mM-0mM	-13.5	-34.41411	7.414108	0.3336737
7mM-10mM	-16.3	-37.21411	4.614108	0.1758930
10mM-0mM	-25.9	-46.81411	-4.985892	0.0108572
5mM-3mM	-13.8	-34.71411	7.114108	0.3133255
7mM-3mM	-16.6	-37.51411	4.314108	0.1631810
10mM-3mM	-26.2	-47.11411	-5.285892	0.0098726
7mM-5mM	-2.8	-23.71411	18.114108	0.9941262
10mM-5mM	-12.4	-33.31411	8.514108	0.4147746
10mM-7mM	-9.6	-30.51411	11.314108	0.6505541

**Tableau 3 :** Analyse de variance de la longueur des parties racinaires de *Moringa oleifera* L.

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr (>F)
pb\$Plomb	4	140.2	35.06	4.276	<b>0.0116</b>
Residuals	20	164.0	8.20		

**Tableau 4 :** Corrélacion entre les doses de plomb et ses effets sur la longueur des parties racinaires de *Moringa oleifera* L.

	diff	lwr	upr	p adj
3mM-0mM	-1.4	-6.819421	4.0194208	0.9354456
5mM-0mM	-4.6	-10.019421	0.8194208	0.1211415
7mM-0mM	-5.2	-10.619421	0.2194208	0.0638971
10Mm- 0mM	-6.2	-11.619421	-0.7805792	0.0201449
5mM-3mM	-3.2	-8.619421	2.2194208	0.4187509
7mM-3mM	-3.8	-9.219421	1.6194208	0.2592713
10mM-3mM	-4.8	-10.219421	0.6194208	0.0984271
7mM-5Mm	-0.6	-6.019421	4.8194208	0.9971755
10mM-5mM	-1.6	-7.019421	3.8194208	0.8996642
10mM-7mM	-1.0	-6.419421	4.4194208	0.9804001

**Tableau 5 :** Analyse de variance du poids frais de la partie aérienne (PFT) de *Moringa oleifera* L.

	Df	Sum Sq	Mean Sq	Fvalue	Pr (>F)
pb\$Plomb	4	1087	271.7	0.937	<b>0.463</b>
Residuals	20	5800	290.0		

**Tableau 6 :** Corrélation entre les doses de plomb et ses effets sur le poids frais de la partie aérienne (PFT) de *Moringa oleifera* L.

	diff	lwr	Upr	p adj
3Mm-0 Mm	-2.08	-34.3085	30.1485	0.9996605
5Mm-0 Mm	-5.70	-37.9285	26.5285	0.9832356
7 Mm-0 Mm	-7.30	-39.5285	24.9285	0.9590012
10Mm-0Mm	-18.94	-51.1685	13.2885	0.4233353
5Mm-3 Mm	-3.62	-35.8485	28.6085	0.9970128
7Mm-3 Mm	-5.22	-37.4485	27.0085	0.9879171
10Mm-3 Mm	-16.86	-49.0885	15.3685	0.5348179
7Mm-5 Mm	-1.60	-33.8285	30.6285	0.9998801
10 Mm-5 Mm	-13.24	-45.4685	18.9885	0.7349502
10 Mm-7 Mm	-11.64	-43.8685	20.5885	0.8141443

**Tableau 7:** Analyse de variance du poids frais des racines (PFR) de *Moringa oleifera* L.

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr (>F)
pb\$Plomb	4	1120	280.0	2.138	<b>0.114</b>
Residuals	20	2619	130.9		

**Tableau 8:** Corrélation entre les doses de plomb et ses effets sur la matière fraîche (PFR) des plantes *Moringa oleifera* L.

	diff	Lwr	Upr	p adj
3Mm-0 Mm	-1.20	-22.8569	20.456904	0.9998145
5Mm-0 Mm	-7.46	-29.1169	14.196904	0.8382151
7Mm-0 Mm	-9.90	-31.5569	11.756904	0.6539468
10Mm-0 Mm	-18.56	-40.2169	3.096904	0.1157389
5Mm-3 Mm	-6.26	-27.9169	15.396904	0.9062922
7Mm-3 Mm	-8.70	-30.3569	12.956904	0.7501910
10Mm-3 Mm	-17.36	-39.0169	4.296904	0.1565284
7Mm-5 Mm	-2.44	-24.0969	19.216904	0.9969773
10 Mm-5 Mm	-11.10	-32.7569	10.556904	0.5538469
10 Mm-7 Mm	-8.66	-30.3169	12.996904	0.7532505

**Tableau 9:** Analyse de variance de la matière sèche de la partie aérienne (PST) de *Moringa oleifera* L.

	Df	SumSq	MeanSq	F value	Pr (>F)
pb\$Plomb	4	58.98	14.746	2.396	<b>0.0846</b>
Residuals	20	123.11	6.155		

**Tableau 10:** Corrélation entre les doses de plomb et ses effets sur la matière sèche (PST) de la partie aériennes de *Moringa oleifera* L.

	diff	Lwr	Upr	p adj
3Mm-0 Mm	-0.58	-5.275416	4.1154161	0.9956873
5Mm-0 Mm	-1.06	-5.755416	3.6354161	0.9594804
7Mm-0Mm	-2.02	-6.715416	2.6754161	0.7016261
5Mm-3Mm	-0.48	-5.175416	4.2154161	0.9979284
7Mm-3Mm	-1.44	-6.135416	3.2554161	0.8867272
10Mm-3Mm	-3.80	-8.495416	0.8954161	0.1502281
7Mm-5Mm	-0.96	-5.655416	3.7354161	0.9715322
10Mm-5Mm	-3.32	-8.015416	1.3754161	0.2521337
10Mm-7Mm	-2.36	-7.055416	2.3354161	0.5717478

**Tableau 11 :** analyse de variance de la matière sèche (PSR) de *Moringa oleifera* L.

	Df	Sum Sq	Mean Sq	Fvalue	Pr (>F)
pb\$Plomb	4	73.69	18.422	3.957	<b>0.0159</b>
Residuals	20	93.11	4.656		

**Tableau 12:** Corrélation entre les doses de plomb et ses effets sur la matière sèche (PSR) des plantes du *Moringa oleifera* L.

	diff	Lwr	Upr	p adj
3Mm-0 Mm	-0.34	-4.423511	3.74351146	0.9990723
5Mm-0 Mm	-3.14	-7.223511	0.94351146	0.1856239
7Mm-0 Mm	-3.70	-7.783511	0.38351146	0.0875442
10Mm-0 Mm	-4.02	-8.103511	0.06351146	0.0549741
5 Mm-3 Mm	-2.80	-6.883511	1.28351146	0.2787250
7Mm-3 Mm	-3.36	-7.443511	0.72351146	0.1396799
10Mm-3 Mm	-3.68	-7.763511	0.40351146	0.0900584
7Mm-5 Mm	-0.56	-4.643511	3.52351146	0.9935615
10 Mm-5 Mm	-0.88	-4.963511	3.20351146	0.9656282
10 Mm-7 Mm	-0.32	-4.403511	3.76351146	0.9992692

## ❖ Etude statistique à l'aide du logiciel Statbox

**Tableau 13** : Analyse de variance de la teneur en **chlorophylle a** du *Moringa oleifera* L.

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	129,574	24	5,399				
VAR.FACTEUR 1	32,746	4	8,186	1,691	<b>0,1908</b>		
VAR.RESIDUELLE 1	96,829	20	4,841			2,2	36,14%

**Tableau 14** : Analyse de variance de la teneur en **chlorophylle b** du *Moringa oleifera* L.

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	293,225	24	12,218				
VAR.FACTEUR 1	50,763	4	12,691	1,047	<b>0,40888</b>		
VAR.RESIDUELLE 1	242,462	20	12,123			3,482	39,99%

**Tab 15**: Analyse de variance de la teneur en **chlorophylle total a+b** *Moringa oleifera* L.

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	649,439	24	27,06				
VAR.FACTEUR 1	128,59	4	32,148	1,234	<b>0,32812</b>		
VAR.RESIDUELLE 1	520,848	20	26,042			5,103	34,49%

