

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
MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Présenté par

KORFI Aida

Pour l'obtention du diplôme de

MASTER EN BIOLOGIE

Spécialité: Biodiversité et environnement

*Thème réalisé au laboratoire de biodiversité et conservation des eaux et des sols,
Université de Mostaganem*

Thème :

**Impacte du plomb sur la cinétique du taux de germination et la
longueur des radicules et des tigelles de *Moringa oleifera* L.**

Date de soutenance : 08/07/2019

Devant le Jury

Mme. SAKKAL F	Président	Université de Mostaganem
M. TAHRI M	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

Remerciements

*Tout d'abord, je voudrais remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux
qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce travail*

En second lieu, je tiens à remercier mon encadreur

*Mr Reguieg Yssaad H. A pour ses appréciations, ses précieux conseils et
surtout pour m'avoir fait confiance et m'accepté dans son laboratoire.*

*Mes sincères gratitudee à Mlle Hamad H pour son attention de tout instant
sur mon travail, pour ses conseils avisés, son écoute qui ont été
prépondérants pour la bonne réussite de ce travail.*

*Mon vifs remerciements A M SAKKAL F pour m''avoir fait l'honneur de
présider le jury.*

A M TAHRI M d'avoir accepté d'examiner ce modeste travail

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

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

✓ *Ma mère et mon père*

✓ *A mes sœurs et mes frères*

✓ *Tous mes ami(e) s les plus chers.*

Résumé

Un des problèmes majeurs en environnement est la contamination de l'atmosphère, des eaux et des sols par de nombreux éléments et composés toxiques comme le plomb, qui est un élément nocif et qui ne présente aucun avantage biologique.

Cela nécessite d'exploiter une technique alternative de dépollution des sols contaminés est la « Phytoremédiation » qui consiste à utiliser des plantes et/ou des micro-organismes pour la décontamination de ces sols.

Les plantes sont plus sensible au stade de germination, car il est la premier phase du développement des plantes et qui ce présente est une étape critique de l'évolution de ces derniers dans un milieu contaminé par le plomb.

Ce présent travail à pour objet de déterminer l'impacte des concentrations croissantes de Pb (0, 3, 5, 7 et 10mM) sur la cinétique du taux de germination et l'élongation des radicules et des tigelles de *Moringa oleifera* L. Les graines ont été mise à germer dans des boites de Pétri, à raison de 10 graines par boites et cinq répétitions pour chaque traitement, qui sont ensuite placées à l'obscurité dans une étuve, à une température de 27°C, pendant quinze jours. On a prélevé chaque jour le nombre des graines germées et les longueurs des radicules et des tigelles tous les deux jours.

Les résultats obtenus montrent que le plomb exerce un effet négative sur la germination des graines de *Moringa oleifera* L., qui se traduit par une diminution du taux de germination des graines traitées par le plomb par rapport au témoin où on a enregistré un taux de germination de 100% en absence du Pb, ainsi que une diminution importante dans l'élongation des radicules et des tigelles de *Moringa oleifera* L., au niveau des graines traités avec des concentrations élevé en plomb (7 et 10 mM).

Mots clés: Plomb, *Moringa oleifera* L., Cinétique du taux de germination, Cinétique de l'élongation de la radicule et de la tigelle.

الملخص

من بين المشاكل الرئيسية في البيئة هي تلوث الجو والماء والتربة بعدة عناصر ومركبات سامة مثل الرصاص، الذي يعتبر عنصر سام وليس له فائدة بيولوجية.

يتطلب هذا استخدام تقنية بديلة لعلاج التربة الملوثة وهي " المعالجة بالنبات"، والتي تتمثل في استخدام نباتات و / أو كائنات حية دقيقة لإزالة تلوث هذه التربة.

تكون النباتات أكثر حساسية في مرحلة الإنبات، لأنها المرحلة الأولى من تطور النبات وهي خطوة حاسمة في تطور النباتات في بيئة ملوثة بالرصاص.

يهدف هذا العمل إلى تحديد تأثير التراكيز العالية من الرصاص (0، 3، 5، 7 و 10ملي مول) على حركية معدل الإنبات واستطالة الجذير و السويقة لنبات المورينجا أوليفيرا، تم وضع البذور للإنتاش أطباق بتري، بمعدل 10 بذور لكل طبق وخمس تكرارات لكل علاج، ثم تم وضعها في الظلام في فرن على درجة حرارة 27 درجة مئوية، لمدة خمسة عشر يوما. تم أخذ يوميا عدد البذور المنبئة، وطول الجذور والسيقان كل يومين.

أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن الرصاص له تأثير سلبي على إنبات البذور لنبات المورينجا أوليفيرا، مما أدى إلى انخفاض في معدل إنبات البذور المعالجة بالرصاص مقارنةً بالشاهد حيث تم تسجيل معدل إنبات بنسبة 100 ٪ في غياب الرصاص، وكذلك انخفاض كبير في استطالة الجذير و السويقة لنبات المورينجا أوليفيرا على مستوى البذور المعالجة بتراكيز عالية من الرصاص (7 و 10 ميلي مول).

الكلمات المفتاحية: الرصاص، المورينجا أوليفيرا، إل، حركية معدل الإنبات، حركية استطالة الجذير والسويقة.

Abstract

One of the major environmental problems is the contamination of the atmosphere, water and soil by many toxic elements and compounds such as lead, which is a harmful element and has no biological advantage.

This requires the use of an alternative technique for the decontamination of contaminated soils, called "Phytoremediation", which consists of using plants and/or micro-organisms to decontaminate these soils.

Plants are more sensitive to the germination stage because it is the first phase of plant development and this is a critical step in the evolution of plants in a lead-contaminated environment.

The purpose of this work is to determine the impact of increasing concentrations of Pb (0, 3, 5, 7, 7 and 10mM) on the kinetics of the germination rate and the elongation of the roots and tigelles of *Moringa oleifera* L. The seeds were put to germinate in Petri dishes, at a rate of 10 seeds per dish and five repetitions for each treatment, which are then placed in the dark in an oven, at a temperature of 27°C, for fifteen days. The number of sprouted seeds and lengths of roots and tigels were collected daily every other day.

The results obtained show that lead has a negative effect on the germination of *Moringa oleifera* L. seeds, which results in a decrease in the germination rate of lead-treated seeds compared to the control where a germination rate of 100% was recorded in the absence of Pb, as well as a significant decrease in the elongation of *Moringa oleifera* L. roots and tigelles, at the level of seeds treated with high lead concentrations (7 and 10 mM).

Keywords: Lead, *Moringa oleifera* L., Kinetics of germination rate, Kinetics of radicle and tigella elongation.

Liste des abréviations

ADN	: acide désoxyribonucléique.
ALD	: Aminolevulinate déshydratase.
Cd	: cadmium
CO	: Carbone organique
Cu	: cuivre
°C	: degré Celsius
EDDS	: Ethylène diamine dissuccinate
EDTA	: Ethylène diamine tétra-acétate
ERO ou ROS	: Espèces réactives de l'oxygène ou Réactive Oxygen Species
ETM	: Eléments traces métalliques.
Fe	: Fer
Hg	: Mercure
Mg	: Milligramme
Mo	: Molybdène
Ni	: Nickel
Pb	: Plomb
ppm	: Part per million
Ph	: PH-mètre.
SCHS	: Service Communal d'Hygiène et de Santé.
TCE	: Trichloréthylène
Zn	: Zinc

Liste des tableaux

Tableau 1 : Tableau périodique des éléments de Mendeleïev.....	03
Tableau 2 : Conditions environnementales de <i>Moringa oleifera</i> L.	22

Liste des figures

Fig.1: Origines des métaux lourds dans le sol.....	04
Fig. 2 : Les principales de techniques de phytoremédiation	12
Fig.3 : Processus de phytoextraction, absorption des contaminants présents dans le sol..	12
Fig. 4 : Phytoextraction naturelle.....	14
Fig. 5 : Phytoextraction induites par les chélateurs	14
Fig. 6 : Représentation de la phytostabilisation.....	14
Fig. 7 : Mécanisme de rhizodégradation	15
Fig. 8 : Processus de la rhizofiltration	16
Fig.9 : la répartition de <i>Moringa oleifera</i> L.au monde	19
Fig. 10 : <i>Moringa oleifera</i> L.	20
Fig. 11 : Feuilles de <i>Moringa oleifera</i> L.....	21
Fig. 12 : Fleurs de <i>Moringa oleifera</i> L.....	21
Fig. 13: Fruits de <i>Moringa oleirefa</i> L. : gousse sèche (a) et gousse fraîche (b), graines (c) graines décortiquées (d).....	22
Fig. 14 : Etapes de la germination	26
Fig. 15 : Site expérimental de l'université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem.....	28
Fig. 16 : Graines de <i>Moringa Oleifera</i> L.	28
Fig. 17 : lavage des graines de <i>Moringa oleifera</i> L. avec l'hypochlorite de sodium.....	29
Fig. 18 : Rinçage des graines de <i>Moringa oleifera</i> L. avec l'eau distillée.....	29
Fig. 19 : Trempage des graines dans de l'eau distillée tiède.....	29
Fig. 20 : Germination des graines <i>Moringa Oléifira</i> L.....	29
Fig. 21: Effet du plomb sur la cinétique du taux de germination des graines de <i>Moringa oleifera</i> L.....	31
Fig. 22: Effet du plomb sur la cinétique de la longueur des racicules de <i>Moringa</i> <i>oleifera</i> L.....	32
Fig. 23: Effet du plomb sur la cinétique de la longueur des tiges de <i>Moringa</i> <i>oleifera</i> L.....	33

TABLE DE MATIERE

Remerciement

Dédicaces

Résumé

Liste des abréviations

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction générale	01
-----------------------------	----

Partie bibliographique

Chapitre I : Plomb

I.1. Généralités sur les métaux lourds	03
I.2. Définition des métaux lourds	03
I.3. Origine de la contamination des sols par les métaux lourds.....	04
I.3.1. Origine naturelles.....	04
I.3.2. Origine anthropiques	05
I.4. contamination des sols par le plomb.....	05
I.4.1. Propriétés du plomb	05
I.4.2. Origines de la pollution par le plomb	06
I.5. Le plomb dans le sol	07
I.5.1. Mobilité	07
I.6. Le plomb dans la plante	07
I.6.1. Phytodisponibilité.....	07
I.7. Impact du plomb sur les végétaux	08
I.8. Effets sur la germination et la croissance	09
I.9. Effet sur la Photosynthèse.....	09

Chapitre II : Phytoremédiation

II.1. Généralité sur la phytoremédiation	11
II.2. Définition de la phytoremédiation	11
II.3. Techniques de la phytoremédiation.....	11
II.3.1. Phytoextraction.....	12
II.3.2. La phytostabilisation.....	14
II.3.3. Phytodégradation	14
II.3.4. La phytovolatilisation.....	15
II.3.5. La rhizofiltration.....	15
II.4. Avantages et limites de la phytoremédiation.....	16
II.4.1. Avantages.....	17
II.4.2. Limites	17

Chapitre III : *Moringa oleifera* L

III .1. Généralités sur <i>Moringa oleifera</i> L.....	19
III. 2. Origine.....	19
III.3. Classification de <i>Moringa oleifera</i> L.....	20
III.4. Morphologie et caractéristiques	20
III.5. Description écologie de la plante	22
III.6. Utilisations de <i>Moringa oleifera</i> L.....	22
III.6.1. Culture	22
III.6.2. Assainissement des eaux usées et purification de l'eau	23
III.6.3. Nutritionnel	23
III.6.4. Médecine et pharmacologie	23

Chapitre IV : Germination

IV.1. Morphologie et physiologie de la germination.....	24
IV.1.1. Définition	24
IV.1.2. Types de germination.....	24
IV.1.3. Morphologie de la germination	24
IV.1.4. Physiologie de la germination	24
IV.1.5. Conditions de la germination	24

IV.1.5.1. Conditions internes.....	24
IV.1.5.2. Condition externes	25
IV.1.6. Phases de la germination.....	25
IV.2. Dormances des graines.....	26
IV.2.1. Définition de la dormance.....	26
IV.2.2. Type de dormance.....	26

Partie expérimentale

Chapitre I : Matériel et méthodes

I.1. Site d'étude.....	28
I.2. Choix de l'espèce végétale	28
I.3. Protocole expérimental.....	29
I.4. Préparation de solution stressante.....	30
I.5. paramètres étudiés.....	30
I.5.1. Cinétique du taux de germination	30
I.5.2. Cinétique de la longueur des racines et des tiges.....	30
I.6. L'étude statistique.....	30

Chapitre II : Résultats et discussion

II.1. Effet du plomb sur la cinétique du taux de germination des graines de <i>Moringa oleifera</i> L.....	31
II.2. Effet du plomb sur la cinétique d'élongation des racines de <i>Moringa</i> <i>oleifera</i> L.....	32
II.3. Effet du plomb sur la cinétique d'élongation des tiges de <i>Moringa</i> <i>oleifera</i> L.....	33
II.4. Discussion générale.....	34
Conclusion.....	36
Référence.....	38
Annexe.....	50

Introduction général

The text 'Introduction général' is rendered in a bold, sans-serif font. Each letter is filled with a different color from a rainbow spectrum, starting with purple for 'I', transitioning through red, orange, yellow, green, and ending with blue for 'l'. The text is presented in a 3D perspective, with a soft, grey shadow cast beneath it, giving it a sense of depth and making it appear to float above the white background.

Un des problèmes majeurs en environnement est la contamination de l'atmosphère, des eaux et des sols par de nombreux éléments et composés toxiques comme le plomb. Le plomb, est l'un des contaminants les plus répandus dans l'environnement (**Jarup, 2003 ; hernandez- Ochea et al., 2005**), et le plus utilisé par l'homme dans des secteurs très variés de puis des siècles (**Cecchi, 2008**). Sa teneur n'a cessé d'augmenter en raison des activités anthropiques. Il est toxique même à faible concentration (**Jarup, 2003**). De plus, il n'est pas biodégradable, il est persistant et s'accumule dans les sols. Une fois le sol contaminé, il pénètre dans la plante et perturbe les mécanismes de celle-ci (**Seregin et Ivanov, 2001**).

La solution pour pallier à ce problème est de traiter les sols contaminés afin d'en retirer les éléments métalliques ou, au moins, de ramener leur concentration à des niveaux acceptables pour la viabilité de l'écosystème. Une des ces méthodes de traitement, apparue au début des années 1990, consiste en l'utilisation de plantes capables de croître sur des sols à forte teneur en métaux et susceptibles d'en mobiliser ou absorber une quantité appréciable. Cette technique, appelée phytoremédiation (**Kumar et al., 1995**). La phytoremédiation a un impact positif sur l'opinion publique en tant que "dépollution verte". En effet, elle respecte et restaure l'environnement et représente une alternative aux méthodes classiques trop destructrices et polluantes. Elle tend surtout à être utilisée pour les composés chimiques présentant un risque pour l'environnement (**Meagher, 2001**).

Moringa oleifera L. Cette plante très répandue dans le monde à usages multiple, était connue depuis longtemps et était utilisée traditionnellement à des fins thérapeutiques et alimentaires et prouvés scientifiquement (**Koul et Chase, 2015**), la découverte de son rôle dans la dépollution des eaux et des sols, comme un procédé biologique respectueux de l'environnement n'a été prouvé que récemment (**Vrushali et al., 2018**).

La germination est un stade critique dans le cycle de vie et du développement de plusieurs plantes désertiques. Elle assure la reproduction et, par conséquent, contrôle la dynamique des populations (**Radosovich et al., 1997**). La tolérance est testée durant les trois étapes de la germination : imbibition des graines, percée du tégument par la radicule et croissance de celle-ci car ces étapes conditionnent largement l'établissement de la plante, surtout dans des environnements extrêmes (**Kranner et Colville, 2011**).

Ce travail consiste à étudier l'effet du plomb sur la cinétique du taux de germination et l'élongation des radicules et des tigelles de *Moringa oleifera L.*

Dans ce cadre le travail est organisé comme suit :

Partie bibliographique incluant quatre chapitres

- ✓ Premier chapitre est focalisé sur quelques notions générales la pollution par le plomb.
- ✓ Deuxième chapitre visent à étudier la phytoremédiation et ces techniques.
- ✓ Troisième chapitre présente le *Moringa oleifera* L.
- ✓ Quatrième chapitre donne un aperçu général sur la germination des semences.

Partie expérimentale

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

Enfin, la dernière partie constitue la conclusion générale.

Partie expérimentale



Chapitre I

Plomb

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 géo-génétiques (**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 métaux lourds désigne les éléments métalliques naturels, métaux ou dans certains cas métalloïdes, caractérisés par une forte masse volumique supérieure à 5g/cm³ (**Adriano, 2001**).

Tableau 1 : Tableau périodique des éléments de Mendeleïev (**Roggo, 2003**).

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

On distingue deux types en fonction de leurs effets physiologiques et toxiques : métaux essentiels et métaux toxiques.

➤ **Les métaux essentiels ou oligo-éléments** sont des éléments indispensables à l'état de trace pour de nombreux processus cellulaires et qui se trouvent en proportion très faible dans les tissus biologiques (**Loué, 1993**). Certains métaux lourds peuvent devenir toxiques lorsque la concentration dépasse un certain seuil ; c'est le cas du cuivre (Cu), du nickel

(Ni), du zinc (Zn) et du fer (Fe). Par exemple, le zinc (Zn), à la concentration du millimolaire, est un oligo-élément qui intervient dans de nombreuses réactions enzymatiques (déshydrogénases, protéinase, peptidase) et joue un rôle important dans le métabolisme des protéines, des glucides et des lipides (**Kabata-Pendias et Pendias, 2001**).

➤ **Les métaux toxiques** ont un caractère polluant avec des effets toxiques pour les organismes vivants même à faible concentration. Ils n'ont aucun effet bénéfique connu pour la cellule. C'est le cas du plomb (Pb), du mercure (Hg), du cadmium (Cd) (**Loué, 1993**).

I.3. Origine de la contamination des sols par les métaux lourds

La pollution métallique des sols due à des activités humaines (agricoles, domestiques et industrielles). Cependant, les métaux existent naturellement dans les sols car ils sont présents dans la roche mère qui subit notamment des phénomènes d'érosion et d'altération. Les métaux lourds comme le plomb, le cadmium, le cuivre et le mercure ne peuvent pas être biodégradés et donc persistent pendant de longues périodes dans le sol ; ce qui constitue un sérieux problème (**Robert et Juste, 1999**).

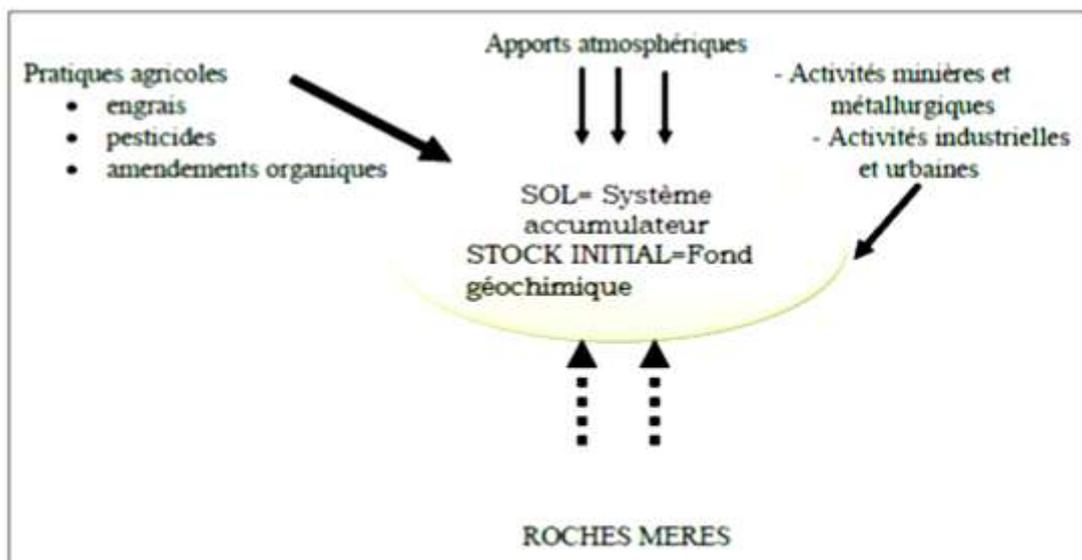


Fig.1: Origines des métaux lourds dans le sol (**Robert et Juste, 1999**).

I.3.1. Origine naturelles

En dehors de toute intervention de l'homme, les sols ont une concentration naturelle en métaux provenant de l'altération de la roche-mère. Ces processus géochimiques associés à d'autres phénomènes, en particulier biologiques, sont désignés

sous le terme de différenciation des sols. Elle s'effectue sur une échelle de temps de l'ordre de plusieurs milliers d'années et est la source principale de contamination naturelle du sol en métaux. Ainsi, une roche-mère riche en arsenic, donnera un sol riche en arsenic, bien que cette corrélation soit plus marquée pour certains métaux (Cr, Zn) que pour d'autres (Co, Mo, Pb, Se) dont l'abondance dans le sol peut être plus fortement liée au cycle biogéochimique (**Marc et Gautheyrou, 2003**).

I.3.2. Origine anthropiques

Les sols sont soumis à des apports de métaux lourds plus ou moins importants résultant de l'activité humaine. Au cours des décennies dernières, l'apport de métaux lourds au sol dans le monde s'est étendu. De nos jours, on l'estime à 22000 tonnes de cadmium, 939000 tonnes de cuivre, 783000 tonnes de plomb et 1350000 tonnes de zinc (**Singh et al., 2003**). Les principaux types de pollutions anthropiques responsables de l'augmentation des flux de métaux, sont la pollution atmosphérique (rejets urbains et industriels), la pollution liée aux activités agricoles et la pollution industrielle (**Singh et al., 2003**).

➤ Les apports en métaux lourds peuvent venir de l'agriculture de par les impuretés présentes dans les engrais, les amendements calcaires, les fumiers, les lisiers (**Franklin et al., 2005**). Ces apports peuvent aussi résulter d'une activité urbaine, industrielle (déchets d'entreprises agro-alimentaires, boues de stations d'épuration, composts, déchets urbains) ou minière. Selon **IFEN (2002)**.

➤ Les pollutions atmosphériques sont représentées par les apports diffus aériens d'origine lointaine. Il s'agit des poussières et aérosols provenant des chauffages, des activités industrielles, des moteurs automobiles (**Sezgin et al., 2004**).

➤ Les apports industriels en métaux lourds proviennent des produits chimiques divers (industrie chimiques), les matières radioactives (centrales nucléaires, traitements des déchets radioactifs) et la métallurgie (**Godin et al., 1985**).

I.4. contamination des sols par le plomb

I.4.1. Propriétés du plomb

Le plomb est un métal gris bleuâtre malléable. Il en existe quatre isotopes naturels 204 Pb, 206 Pb, 207 Pb et 208 Pb. Les principaux minerais sont la galène (sulfure), la

cérusite (carbonate) et l'anglésite (sulfate). Le plomb élémentaire a une faible conductivité électrique et sa masse élevée lui confère un important pouvoir d'absorption des rayonnements X, et électromagnétiques (**Garnier, 2005**).

I.4.2. 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 (**Nriagu, 1978; Baize, 2002**).

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

Dans l'air, les émissions de plomb provenant de poussières volcaniques véhiculées par le vent sont reconnues d'importance mineure (**Pichard, 2003**), 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. (**Brunet, 2008**).

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, 2003**).

I.5. Le plomb dans le sol

Le comportement du plomb dans un sol dépend de différents facteurs comme sa dynamique propre mais également des caractéristiques pédologiques et physico-chimiques du sol (**Baize, 1997**). Il peut être soit sous forme liée aux particules de terre soit dans la phase aqueuse. Dans les sols contaminés, la forme chimique initiale et la teneur en polluant apportée ont également une influence (**Hinsinger, 1996, Dumat et al., 2001 ; Ferrand et al., 2006**).

I.5.1. Mobilité

Le Pb introduit dans le sol ne subit que peu de transformation et migre relativement peu à travers les différents horizons. Etant peu mobile, il reste généralement fixé à la partie supérieure du sol. Il n'est pas entraîné en profondeur par le lessivage, il en résulte un gradient de concentration selon la profondeur (**Pais et Benton, 2000 ; Pacyna, 1984**). Le Pb serait le micropolluant métallique le moins mobile dans le sol. Ainsi dans la gamme de pH de 5 à 9 et à concentration totale identique le Pb serait 100 fois moins mobile que le Cd. La grande affinité de la matière organique vis-à-vis de ce métal expliquerait l'accumulation préférentielle de ce métal dans les horizons de surface (**Sanders et al., 1986**). Ceci fait qu'il est très difficile de distinguer ce qui provient des retombées atmosphériques lointaines et ce qui provient du seul cycle biogéochimique naturel. En règle générale l'horizon de surface humifère est l'horizon le plus riche en Pb au sein d'un même solum. Lorsque le solum dans son ensemble est vraiment très chargé en Pb (anomalie pédogéologique) l'horizon de surface n'est plus forcément celui qui montre la concentration maximale au sein du solum. Une texture légère et un pH acide (4,1 à 4,3) provoqueraient un lessivage important et une contamination en profondeur. Le degré d'oxydation du Pb est de Pb^{+2} , mais on connaît aussi des formes d'oxydation Pb^{4+} . Le Pb forme de nombreux composés insolubles dans l'eau (**Pais et Benton, 2000**).

I.6. Le plomb dans la plante

I.6.1. Phytodisponibilité

La notion de phytodisponibilité découle directement de la notion de biodisponibilité définie comme « l'aptitude d'un élément à être transféré d'un

compartiment du sol vers un organisme vivant (bactérie, végétal, animal, homme) » (Baize, 1997).

La phytodisponibilité des ETM est fortement corrélée à la concentration d'espèces ioniques dans la solution du sol (Kabata-Pendias et Pendias, 1992). Elle est également largement dépendante des propriétés du sol, de l'espèce végétale considérée et de l'élément en question. La phytodisponibilité va donc dépendre des différents paramètres permettant le transfert de la phase solide du sol vers le végétal (Hinsinger *et al.*, 2005) :

- La disponibilité ou mobilité chimique
- L'accessibilité ou mobilité physique
- L'assimilation ou mobilité biologique

I.7. Impact du plomb sur les végétaux

La toxicité du plomb dépend de sa concentration dans le milieu, de sa spéciation, des propriétés du sol, et enfin de l'espèce végétale concernée. Les plantes mettent en place diverses barrières physiques pour se protéger, quand le plomb a réussi à passer à travers ces barrières de protection, il peut affecter de nombreux processus physiologiques de la plante. Les premiers effets ne provoquent pas de symptômes visibles, ceux-ci ne se manifestant qu'en cas de toxicité avancée (Cecchi, 2008).

Le premier effet des métaux lourds observable chez les végétaux est une inhibition de la croissance. Celle-ci s'accompagne très souvent de nombreux autres indices de dysfonctionnement : chlorose foliaire, importantes lésions nécrotiques, jaunissement progressif, repliement ou dessèchement du feuillage, les bases moléculaires de ces perturbations sont encore mal connues, mais on admet généralement qu'elles résultent d'un stress oxydatif, dû à la production d'espèces réactives de l'oxygène (ERO) ou « Réactive Oxygen Species » (ROS). Qui altèrent toute une série de substrats biologiques importants, et modifient les domaines fonctionnels des biomolécules pouvant conduire à la mort cellulaire (Cheng, 2003).

I.8. Effets sur la germination et la croissance

A l'échelle macroscopique, le plomb entraîne des effets néfastes sur les plantes. En premier lieu, la germination est fortement inhibée par les ions plomb (Pb^{2+}) à très faibles concentrations (**Mishra et al., 1998 ; Tomulescu et al. 2004**). De plus fortes doses conduisent à une inhibition totale de la germination chez les espèces végétales, comme l'haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) (**Wierzbicka et al., 1998**).

Le plomb réduit également fortement le développement de la plantule et des racines (**Mishra et Choudhuri, 1998**). Un traitement à de faibles concentrations en plomb inhibe la croissance des racines et des parties aériennes (**Makowski et al., 2002 ; An, 2006**). Cette inhibition est plus importante pour la racine, ce qui peut être corrélé à plus forte teneur en plomb de cette dernière. (**Obroucheva et al., 1998**).

L'accroissement de biomasse végétale est diminué par de fortes doses de plomb (**Xiong et al., 2006**). Sur de longues durées, les traitements au plomb, même à des doses non-létales, peuvent conduire à l'apparition de nécroses au niveau des apex racinaires et des feuilles, ainsi que des chloroses foliaires (**Liu et al., 2000**). L'ensemble des perturbations macroscopiques observées est la résultante :

- De l'interaction du plomb avec les différents composants cellulaires et les macromolécules (protéines, ADN...).
- De la perturbation de nombreux processus physiologiques comme la régulation du statu hydrique, la nutrition minérale, la respiration ou la photosynthèse.

I.9. Effet sur la Photosynthèse

Chez les plantes, l'exposition au Pb conduit à une forte inhibition de la photosynthèse, du rendement photosynthétique, et à une limitation du taux d'assimilation de CO_2 . Le rendement photosynthétique, très sensible, peut chuter de plus de 50% (**Bazzaz et al., 1975 ; Poskuta et al., 1987**). Cette inhibition s'explique par la diminution des teneurs en chlorophylle et en caroténoïdes généralement constatée (**Chen et al., 2007 ; Gopal et al., 2008**).

La chlorophylle b semble plus sensible que la chlorophylle a (**Wozny et al., 1995 ; Vodnik et al., 1999**). Toutefois, ces effets varient en fonction des espèces végétales. Les

mécanismes de réduction de la teneur pigmentaire sont, en partie, élucidés. Le plomb induit l'activité chlorophyllase dans les feuilles (**Drazkiewicz, 1994**), mais le mécanisme principal semble être l'inactivation de la synthèse de ces pigments. Le plomb interagit à ce niveau de deux façons :

➤ D'une façon directe, en se substituant aux ions divalents liés aux métalloenzymes. C'est notamment le cas avec l'-aminolevulinate déshydratase ou ALAD qui est à la base de la synthèse des chlorophylles et dont l'ion zinc (Zn^{2+}) est remplacé par plomb (Pb^{2+}) (**Foy et al., 1978**).

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

Chapitre II
Phytoremédiation

II.1. Généralité sur la phytoremédiation

Le développement de techniques efficaces pour décontaminer les sites pollués est devenu indispensable (**Mench *et al.*, 2010**). Les récentes technologies envisagées pour la dépollution des sols sont basées sur l'utilisation de voies biologiques, comme les micro-organismes et/ou les plantes. Ces méthodes devraient réduire nettement les coûts et les dommages pour l'environnement. De plus, elles sont parfois plus simples à mettre en place même sur de grandes surfaces. La bio-dépollution repose ainsi sur un ensemble de techniques consistant à augmenter la biodégradation d'un polluant dans un sol (**Vidali, 2001**).

La phytoremédiation a un impact positif sur l'opinion publique en tant que "dépollution verte". En effet, elle respecte et restaure l'environnement et représente une alternative aux méthodes classiques trop destructrices et polluantes. Elle tend surtout à être utilisée pour les composés chimiques présentant un risque pour l'environnement (**Meagher, 2001**).

II.2. Définition de la phytoremédiation

Le terme phytoremédiation vient du préfixe grec « phyto » (plante) et du mot latin remedium (corriger ou éliminer un mal) (**Ghosh et sing, 2005**).

La phytoremédiation ou la bioremédiation est une nouvelle technologie qui utilise les plantes vertes et/ou des microorganismes associés (ex. bactéries, champignons) (**Smits et Freeman, 2006; Lamb *et al.*, 2010**) pour décontaminer l'environnement et/ou minimiser les risques dans les relations sources – exposition - récepteurs. Elle est basée sur les fonctions des plantes et de leurs microorganismes qui permettent de dégrader ou séquestrer des polluants organiques et inorganiques. Elle peut être utilisée pour des substrats solides, liquides et gazeux et mise en œuvre pour des sols et des eaux polluées (grâce aux plantes aquatiques) ou pour filtrer l'air à l'aide de plantes fixatrices (**Pilon-Smits, 2005**).

II.3. Techniques de la phytoremédiation

La phytoremédiation regroupe différentes méthodes qui se veulent toutes des techniques d'amélioration des sols et de l'eau contaminés par l'établissement d'un couvert végétal, soit la phytostabilisation, la phytodégradation, la rhizodégradation, la

phytovolatilisation, la rhizofiltration et la phytoextraction. Elles seront appliquées en fonction du type de contamination et des objectifs de remédiation à atteindre (Pivetz, 2001)

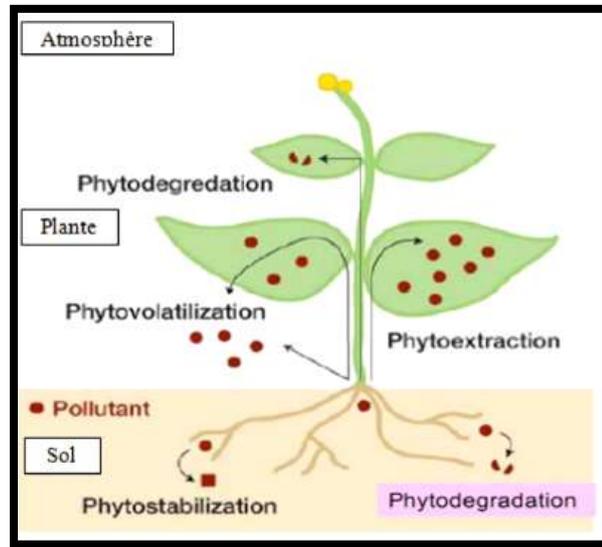


Fig.2: Les principales de techniques de phytoremédiation (Pilon-Smits, 2005).

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 (Alkorta *et al*, 2004).

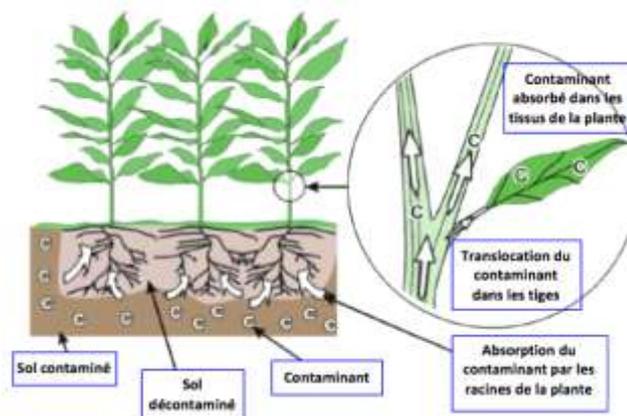


Fig. 3 : Processus de phytoextraction, absorption des contaminants présents dans le sol (ITRC, 2001).

Deux stratégies sont proposées pour une phytoextraction réussite des sols contaminés par les métaux lourds et autres polluants :

- **Phytoextraction naturelle** (dépendante uniquement des capacités physiologiques ou génétiques des plantes). La phytoextraction continue est basée sur les capacités génétiques et physiologiques des plantes spécialisées dans l'absorption, la translocation et la tolérance des métaux lourds. On parle de « plante hyperaccumulatrice » ont utilisé le terme « hyperaccumulateur = hyperaccumulatrice » la première fois pour décrire des plantes avec une teneur en nickel supérieure à 0,1% de leur matière sèche, ce qui correspond à une valeur nettement plus élevée que celle rencontrée chez les plantes non accumulatrices (**Brooks et al. 1977**). Aussi, selon **Baker et Brooks (1989)**, les plantes hyperaccumulatrices devraient avoir une valeur seuil d'accumulation de métaux lourds dans leur partie aérienne à 1% pour Zn, Mn, 0,1% pour Pb, Cu et Al, 0,01% pour Cd et Se et 0,001% pour Hg de leur matière sèche. Actuellement, environ 400 espèces hyperaccumulatrices ont été répertoriées (**Baker et al. 1999**).

- **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, l'EDTA et l'EDDS. Ils sont appliqués soit directement sur le sol ou en condition hydroponiques (**Saifullah et al., 2009; Shahid et al., 2011; Zheng et al., 2011**) soit en pulvérisation foliaire (**Meers et Tack, 2004**). C'est ainsi que l'EDTA a permis d'améliorer la mobilisation et le transport subséquent du Cd, Cr, Cu, Ni, Pb et Zn par la moutarde indienne et le tournesol. Cependant, la haute solubilité dans l'eau de certains complexes chélateurs-toxique peut résulter dans leur déplacement vers les couches plus profondes du sol et ceci consiste un risque potentiel important de contamination de l'eau et des estuaires (**Ann-Peer et al., 2003**).

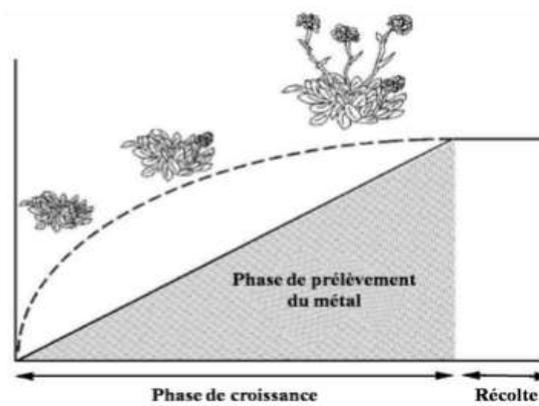


Fig. 4 : Phytoextraction naturelle (salt *et al.*, 1998).

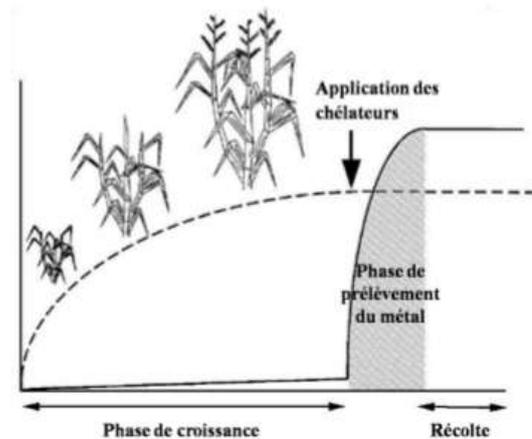


Fig. 5 : Phytoextraction induites par les chélateurs (salt *et al.*, 1998).

II.3.2. Phytostabilisation

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

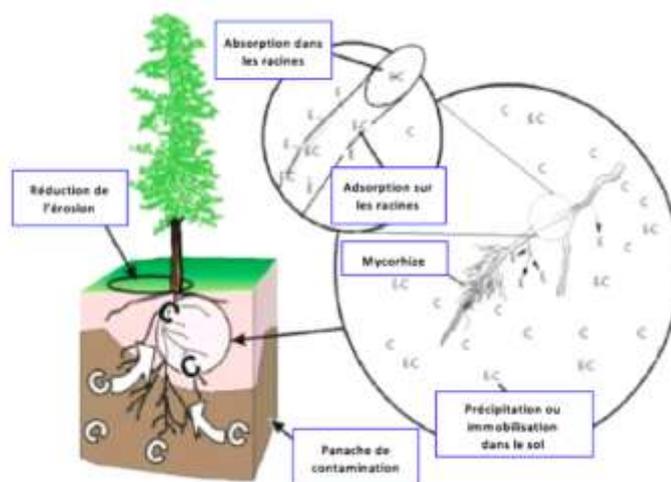


Fig. 6: Représentation de la phytostabilisation (ITRC, 2001).

II.3.3. Phytodégradation

La phytodégradation ou rhizodégradation, correspond à la dégradation des polluants organiques dans la plante elle-même ou grâce aux microbes associés aux plantes dans leur rhizosphère ou dans leurs racines (mycorhizes, endophytes bactériens). Les plantes peuvent

dégrader elles-mêmes des composés organiques grâce à leurs enzymes. Elles les catabolisent en composés inorganiques ou les dégradent en des formes plus stables qu'elles pourront stocker. Les enzymes les plus fréquentes sont des déhalogénases, oxygénases, peroxydases, peroxygénases, laccases, carboxylesterases, nitrilases, phosphatases et nitroréductases. La dégradation peut avoir lieu dans les parties aériennes et les racines. (Pilon-Smits, 2005; Puschenreiter et Wenzel, 2005; Remon, 2006).

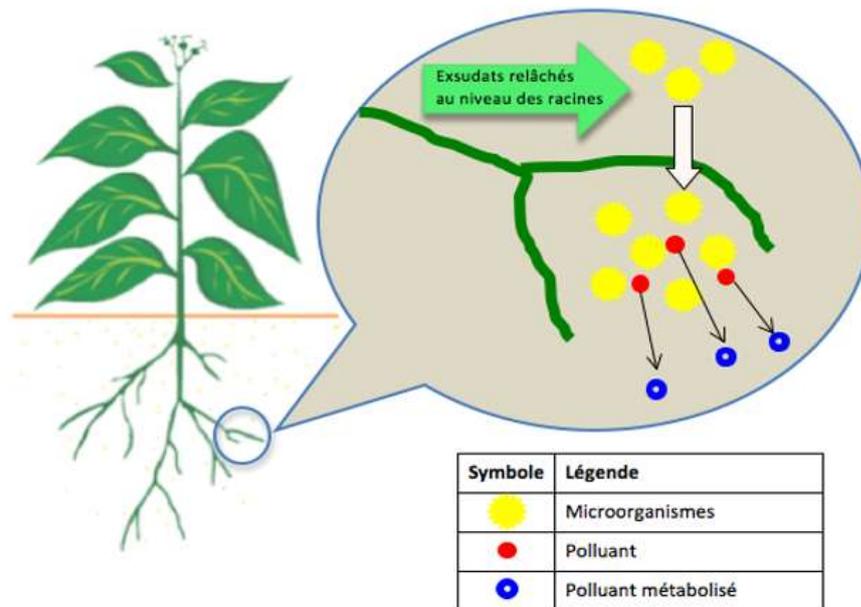


Fig. 7 : Mécanisme de rhizodégradation (Vila, 2006).

II.3.4. Phytovolatilisation

La phytovolatilisation, permet la transformation des contaminants par les plantes en formes plus volatiles puis leur relargage dans l'atmosphère pour les composés organiques volatils, le TCE, le MTBE, et des inorganiques comme Se ou Hg (Pilon-Smits, 2005 ; Puschenreiter et Wenzel, 2005 ; Remon, 2006).

II.3.5. Rhizofiltration

La rhizofiltration est l'utilisation des racines des plantes pour extraire les contaminants des eaux. Elle est basée sur la capacité des systèmes racinaires de certains végétaux à prélever et/ou dégrader les polluants dans un milieu liquide. Cette méthode s'applique dans les zones humides, construites ou naturelles, et pour des plantes dont les racines supportent la vie en milieu aquatique et anaérobie (Chaney *et al.*, 1997; Wong, 2003; Remon, 2006).

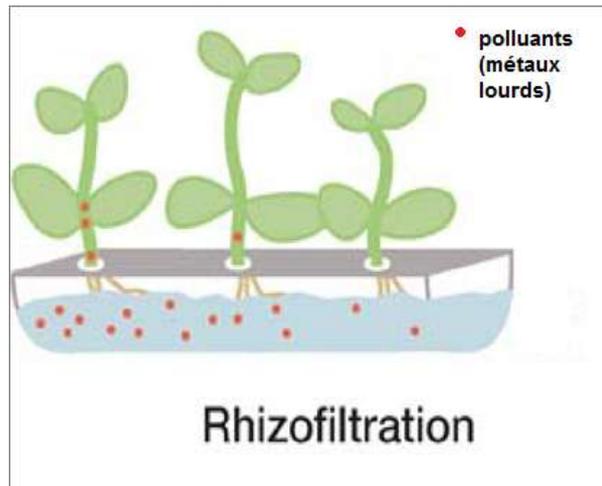


Fig. 8: Processus de la rhizofiltration (colombon *et al.*, 2010).

II.4. Avantages et limites de la phytoremédiation

II.4.1. Avantages

La phytoremédiation exige beaucoup moins d'investissement (Labrecque, 2014). 13 environ 10 fois moins que les méthodes de décontamination basées sur l'ingénierie, entre autres parce qu'elle fonctionne naturellement à l'énergie solaire (Glass, 1999) mais aussi parce que les travaux nécessitent moins de transport des sols excavés (Pilon-Smits, 2005) et que les coûts peuvent être amortis sur plusieurs années. La décontamination du plomb, sur un terrain de 0.4 ha peut coûter entre 50 et 65 % moins cher par phytoextraction et traitement de la biomasse (150 000-250 000\$ US 2000) comparativement à l'excavation et l'enfouissement (500 000\$ US 2000) (EPA, 2000). Selon une autre étude, pour un site contaminé au plomb avec des dimensions similaires, la décontamination traditionnelle (incluant l'excavation sur 50 cm de profondeur) peut coûter entre 400 000 et 1 700 000\$ US, tandis que la phytoremédiation peut coûter entre 60 000 et 100 000\$ US (2004) (Khan, 2004).

La remédiation de solvants dans l'eau souterraine, sur un terrain de 1 ha pendant 3 ans, peut coûter 50 % moins cher par la phytodégradation et le contrôle hydraulique effectué par des plantes qui assèchent les sols ou font baisser la nappe phréatique (200 000\$ US d'installation et de maintenance initiale) qu'un système de pompage et de traitement (700 000\$ US de coût d'opération annuels; estimé en 2000) (EPA, 2000).

Enfin, l'enlèvement des hydrocarbures pétroliers, sur un terrain de 0.4 ha, peut coûter 80 % moins cher par la phytodégradation *in situ* (50 000-100 000\$ US 2000) que par l'excavation et l'incinération (500 000\$ US 2000) (**EPA, 2000**).

Un des principaux avantages de la phytoremédiation est sa grande versatilité (**Glass, 1999**). En effet, plusieurs types de contaminants peuvent être éliminés dans divers types d'environnements, grâce à la multitude de plantes qui existent et à leurs diverses adaptations. De plus, la phytoremédiation étant généralement pratiquée *in situ*, cela permet de conserver la structure et les propriétés des sols, de limiter l'érosion et le déplacement des polluants (**Pilon-Smits, 2005**). Certes, dans les projets de phytoextraction, il faut traiter les végétaux contaminés, mais comme ceux-ci concentrent les métaux, seuls de petits volumes de biomasse sont déplacés (jusqu'à 95 % moins de volume) (**Ghosh, 2005**), comparativement à des tonnes de sol avec les méthodes conventionnelles *in situ* (**Delisle, 2011**). Enfin, la phytoremédiation étant une méthode basée sur les plantes, ces dernières rendent généralement divers services éco systémiques en plus de permettre la décontamination d'un site. Elles contribuent ainsi à assainir l'air, séquestré du dioxyde de carbone et à enrichir la biodiversité des sites dégradés (**Labrecque, 2014**).

II.4.2. Limites

Comme **Forget (2004)** l'a si bien dit dans un de ses articles : « comme toute technique de décontamination des sols, la phytoremédiation comporte certaines limites avec lesquelles il faut composer ». Une des premières limitations est le contact entre rhizosphère et les contaminants présent dans le milieu à décontaminer (**EPA, 2000**). La capacité des plantes à atteindre une profondeur de par leurs racines dépend de l'espèce végétale et des conditions géomorphologiques et climatiques (**EPA, 2000**). Par exemple certain espèce d'arbre comme le peuplier ont des racines qui potentiellement peuvent atteindre une profondeur de 15 pieds dans les sols tandis que celles des arbustes vont être plus superficielles (**EPA, 2000**). Enfin, la phytoremédiation doit se restreindre aux sites présentant une contamination peu profonde et dont les concentrations sont relativement faibles pour que les plantes soient en mesure de croître de façon convenable afin de capter tous les contaminants (**Ghosh et Singh, 2005**). Ces contaminants absorbés par les végétaux peuvent aussi présenter un risque potentiel pour l'environnement puisqu'ils peuvent se retrouver dans la chaîne alimentaire si les animaux ingèrent des plantes contaminés (**Gouvernement, 2008**). D'ailleurs, plusieurs études ont démontré que certains

animaux et insectes ne consommaient pas les plantes contaminées puisqu'elles avaient un mauvais gout (**Chaney et al.,2000**).

Finalement, bien que certaines plantes soient reconnues pour accumuler des quantités élevées de contaminants, le choix des plantes en phytoremédiation doit être réfléchi. Cela dit, il est préférable de ne pas opter pour des plantes qui ne sont pas natives au site où la décontamination in situ a lieu et d'éviter celles qui sont envahissantes. Ces précautions vont contribuer au maintien de la biodiversité déjà en place (**Ghosh et singh, 2005**).

Chapitre III

Moringa olifera L.

III .1. Généralités sur *Moringa oleifera* L.

Moringa oleifera Lam. (Synonyme: *Moringa pterygosperma* Gaertner) appartient à la famille monogénérique des arbustes et arbres des Moringaceae qui comprend environ 13 espèces (Foidl *et al.*, 2001). Il est qualifié «d'arbre de vie», «d'arbre miracle» ou plante divine (Fuglie, 2001; Olson, 2001) du fait de ses nombreuses potentialités nutritives, médicinales et industrielles. Il porte différents noms selon les régions : mouroungue, moringa ailé, benzolive, pois quénique et néverdié (pays francophones) ; malunggay ou meilleure amie des mères (aux Philippines), Radish Tree, Never die tree, Drumstick tree, (pays anglophones), ben ailé, noix de behen, moringoa ou moringa, etc. (Boullard, 2001 ; Foidl *et al.*, 2001; Price, 2007).

III. 2. Origine

Moringa Oleifera L. est originaire de l'Inde, dans les vallées au Sud de l'Himalaya. Aujourd'hui, on le retrouve tout le long de la zone tropicale et subtropicale (Price, 2007; Panchal *et al.*, 2010; Aberra, 2011), dans plusieurs pays africains, en Asie et en Amériques (Olson, 2002).



Fig. 9 : la répartition de *Moringa oleifera* L. au monde (Trees For Life, 2013).

III.3. Classification de *Moringa oleifera* L (Foidl et Makkar, 2001).

Règne : Plantae

Sous règne : Tracheobionta

Division : Magnoliophyta

Classe : Magnoliopsida

Sous classe : Dilleniidae

Ordre : Cappareales

Famille : Moringaceae

Genre : *Moringa*

Espèce : *oleifera*

III.4. Morphologie et caractéristiques

Selon **Rajangam et al (2002)** *Moringa oleifera* L. est une plante qui a l'aspect d'un arbuste dont la hauteur peut atteindre 4 à 5 m. Le diamètre du tronc varie entre 20 et 40 cm (**Foidl et al., 2001**). Le tronc est généralement droit, mais il est parfois très peu développé. En général, il se ramifie lorsque la hauteur atteint 1,5 à 2m. Les branches poussent de manière désorganisée et la canopée est en forme de parasol. (**Morton, 1991**).



Fig. 10: *Moringa oleifera* L. (www.moringa news.org).

- **Feuilles** : Les feuilles alternes et bi ou tripennées, se développent principalement dans la partie terminale des branches. Elles mesurent 20 à 70 cm de long, elles ont un long pétiole avec 8 à 10 paires de pennes composées chacune de deux paires de folioles opposés, plus un à l'apex, ovales ou en forme d'ellipse, et mesurant 1 à 2 cm de long (Morton, 1991).



Fig. 11 : Feuilles de *Moringa oleifera* L. (Price, 2007).

- **Fleure** : Les fleurs sont blanches ou couleur crème, avec des points jaunes à la base (Olson, 2001). Elles mesurent 2,5 cm de large et se présentent sous forme de panicules axillaires et tombantes de 10 à 25 cm. Elles sont généralement abondantes et dégagent une odeur agréable (Foidl *et al.*, 2001).



Fig. 12 : Fleurs de *Moringa oleifera* L. (Roloff *et al.*, 2009).

- **Fruits** : Les fruits forment des gousses à trois valves, mesurant 10 à 50 cm de long. Chaque gousse contient entre 12 et 35 graines (Foidl *et al.*, 2001).

- **Graines** : Les graines sont rondes, avec une coque marron. La coque présente trois ailes blanches. Un arbre peut produire 15000 à 25000 graines par an. Une graine pèse en moyenne 0,3 g et la coque représente 25% du poids de la graine (Foidl *et al.*, 2001).

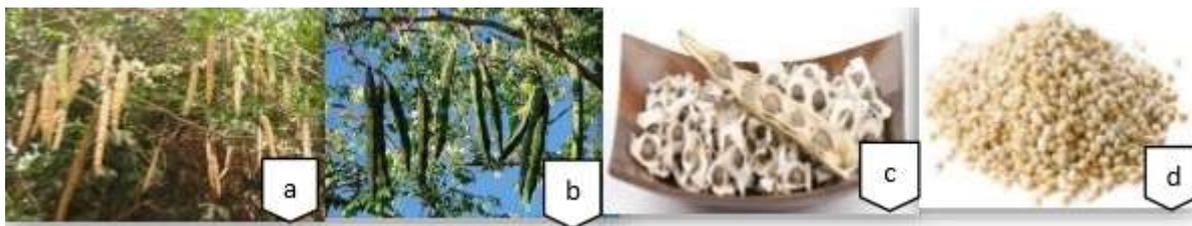


Fig. 13 : Fruits de *Moringa oleifera* L. : gousse sèche (a) et gousse fraîche (b), graines (c) et graines décortiquées (d) (www.moringa-news.org).

III.5. Description écologie de la plante

Moringa oleifera L. est un arbre qui est particulièrement résistant à de nombreuses conditions de cultures différentes (**Kafuku et Mbarawa, 2010**).

Tableau 2: Conditions environnementales de *Moringa oleifera* L. (**De Saint Sauveur et Broin, 2010**).

Paramètres	Valeur (Fourchette)
Climat	Tropical ou subtropical
Altitude	0-2000 m
Température	25-35 °c
Pluviométrie	250 mm-2000 mm Irrigation nécessaire pour la production de feuilles si pluviométrie < 800 mm
Type de sol	Limoneux, sableux ou sablo-limoneux
pH du sol	Légèrement acide à légèrement alcalin (pH: 5 à 9)

III.6. Utilisations de *Moringa oleifera* L.

III.6.1. Culture

La culture du *Moringa oleifera* L. se prête à l'agroforesterie et à l'agriculture. L'arbre pousse de 3 à 4 mètres par an et présente donc un grand intérêt pour le reboisement et pour la protection des sols contre l'érosion. Et d'après **Foidl et al (2001)** *Moringa oleifera* L. joue un rôle dans l'accélération de croissance végétale.

III.6.2. Assainissement des eaux usées et purification de l'eau

Les graines de *Moringa oleifera* L. sont utilisées pour traiter l'eau, grâce à sa richesse en polyélectrolytes cationiques actifs (**Poumaye et al., 2012**) utilisés comme polypeptides naturels non toxiques qui neutralisent les matières colloïdales et provoquent la sédimentation des particules minérales et organiques (**Foidl et al., 2001**).

III.6.3. Nutritionnel

Les jeunes feuilles sont comestibles et sont couramment consommées cuites, comme des épinards, ou préparées en soupe ou en salade (**Olson, 2001**). Elles sont exceptionnellement riches en provitamine A, en vitamines du groupe B et C, en minéraux (en particulier en fer) et en acides aminés méthionine et cystéine, sources de soufre. La composition en acides aminés des protéines contenues dans les feuilles est équilibrée pour l'alimentation humaine. Les jeunes gousses vertes sont très goûteuses et peuvent être consommées bouillies comme des haricots (**Makkar et Becker, 1996**).

Les graines doivent être consommées vertes et les graines sèches peuvent être réduites en poudre et utilisées pour assaisonner les sauces. Les racines des jeunes plants peuvent également être séchées et réduites en poudre pour relever l'assaisonnement (**Delaveau et Boiteau, 1980**). Les fleurs peuvent être consommées après avoir été blanchies ou crues comme ingrédient d'une salade. La résine issue du tronc peut encore être utilisée pour épaissir les sauces (**Delaveau et Boiteau, 1980**).

III.6.4. Médecine et pharmacologie

De nombreuses vertus thérapeutiques sont attribuées à *Moringa oleifera* L. utilisé en médecine traditionnelle pour le traitement de maladies inflammatoires, infectieuses, parasitaires, tumorales et prévention contre les dommages oxydatifs (**Tahiliani et Kar, 2000; Ferreira et al., 2007; Kumbhare et al., 2012**). Des études sur l'utilisation des extraits de feuilles de *Moringa oleifera* L. ont confirmé les propriétés hypoglycémiantes chez des patients atteints de diabète de type II et d'autres maladies cardiovasculaires (**Jaiswal et al., 2013 ; Anwar et al., 2007**).

Chapitre IV
Germination

IV.1. Morphologie et physiologie de la germination

IV.1.1. Définition

La germination est un processus qui traduit le passage de la vie ralentie d'une graine ou d'un gland sec à sa vie active dans des conditions optimales de germination (Côme, 1970). Elle est régulée par des caractéristiques génotypiques mais aussi par des conditions environnementales et en particulier par la disponibilité de l'eau dans le sol et la présence du sel (Gutterman, 1993 in Ndour et Danthu, 2000).

IV.1.2 Types de germination

Il existe deux catégories de germination (Ammari, 2011):

- ✓ **Germination épigée** : les cotylédons sont soulevés par la croissance de la tige.
- ✓ **Germination hypogée** : la tigelle ne se développe pas et les cotylédons restent dans le sol.

IV.1.3. Morphologie de la germination

Pour une germination il faut que la graine s'imbibe d'eau et se gonfle, le tégument se fend et la radicule émerge et s'oriente vers le milieu (sol) selon un géotropisme positif. Ensuite, la tigelle émerge et s'allonge vers le haut (le ciel). Les téguments de la graine se dessèchent et tombent (Meyer *et al*, 2004).

IV.1.4. Physiologie de la germination

La graine se réhydrate et consomme de l'oxygène pour oxyder ses réserves en vue d'acquérir l'énergie nécessaire. Selon Michel (1997), la perméabilité du tégument et le contact avec les particules du sol conditionnent l'imbibition et la pénétration de l'oxygène. Les réserves de toute nature sont digérées.

IV.1.5. Conditions de la germination

IV.1.5.1. Conditions internes

La germination est influée par la maturité et la longévité des semences :

- **La maturité** : c'est l'état complet de la morphologie et la physiologie des semences. Lorsque toutes ses parties constitutives sont différenciées, il y a des

semences, bien que vivantes et morphologiquement mures ne germent pas, même en présence des conditions favorables pour la germination, parce qu'elles ne sont pas physiologiquement mures (**Chaussant et Deunff, 1975**).

- **La longévité** : c'est la durée dont laquelle les semences restent vivantes et capables de garder leur pouvoir germinatif. Elle varie selon l'espèce et la variété (**Heller, 1990**).

IV.1.5.2. Conditions externes

❖ L'imbibition (l'eau)

D'après **Côme (1970)**, l'imbibition se fait par contact avec l'eau qui est nécessaire. La germination exige obligatoirement de l'eau qui doit être apportée à l'état liquide (**Chaussat et Deunff, 1975**).

❖ L'oxygène

Les semences germent parfaitement dans des atmosphères appauvries en oxygène (2 à 5%) (**Côme, 1970**).

❖ La température

La température optimale de la germination est fonction des exigences des espèces. Son importance est telle que chez certaines d'entre elles, une variation de l'ordre de 1°C peut mettre la germination (**Panetta, 1979**). Elle est à deux actions soit directe par l'augmentation de la vitesse des réactions biochimiques (**Mazliak, 1982**), soit indirecte par l'effet sur la solubilité de l'oxygène dans l'embryon (**Chaussat et al., 1975**).

❖ La lumière

Elle agit de manière différente sur les espèces. Elle inhibe la germination des graines à photosensibilité négative et stimule celles à photosensibilité positive (**Anzala, 2006**). Les espèces indifférentes à la photosensibilité sont rares (**Heller et al., 1990**).

IV.1.6. Phases de la germination

La germination comprend trois phases successives :

➤ **Phase d'imbibition**. C'est un phénomène d'entrée rapide et passive d'eau. Elle pénètre par capillarité dans les enveloppes (**Chaussant et Deunff, 1975**).

➤ **Phase de germination** (stricto sensu). C'est une phase très importante car elle conditionne la croissance ultérieure (**Côme, 1982**).

➤ **Phase de croissance.** Elle est caractérisée par une augmentation de la respiration et l'entrer d'eau (figure 8).

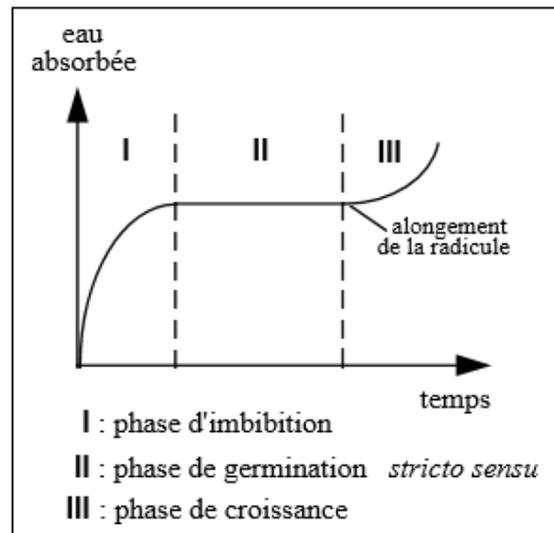


Fig. 14 : Etapes de la germination (Meyer *et al.*, 2004)

IV.2. Dormances des graines

IV.2.1. Définition de la dormance

La dormance est un état provisoire dans lequel des semences viables ne peuvent pas germer même dans des conditions favorables. Selon **Hilhorst (2007)**, la dormance est caractérisée par une absence virtuelle d'activité métabolique et par le manque virtuel de développement et de croissance.

Les semences qui ne germent pas dans les différentes conditions de milieu, sont des semences dites «dormantes», et leur dormance peut concerner soit les téguments (inhibition tégumentaire), soit l'embryon (dormance au sens strict), soit les deux à la fois (**Soltner, 2001**).

IV.2.2. Type de dormance

❖ Inhibitions tégumentaires

L'imperméabilité à l'eau ou à l'oxygène cause des dormances tégumentaires, c'est le cas des graines dures (**Soltner, 2001**). D'après **Mazliak (1982)**, les inhibitions tégumentaires peuvent être facilement définies par : les semences ont des enveloppes ; totalement imperméable à l'eau, les enveloppes séminales ne sont pas suffisamment perméables à l'oxygène.

❖ **Dormances embryonnaires**

Selon **Baskin et Baskin (1998)**, la dormance embryonnaire est due à la présence d'un embryon « sous-développé » au moment de la dissémination des graines.

Il existe deux types de dormance embryonnaire : la dormance primaire où l'embryon peut être dormant au moment de la récolte des semences et la dormance secondaire dont laquelle l'embryon est capable de germer mais il perd cette aptitude sous l'influence des facteurs défavorables à la germination (**Chaussat *et al.*, 1975**).

Partie bibliographique

The image features the text 'Partie bibliographique' in a bold, sans-serif font. Each letter is filled with a different color from a rainbow spectrum, starting with purple on the left and transitioning through red, orange, yellow, green, and blue to purple on the right. The text is presented in a 3D perspective, with a soft, grey shadow cast beneath it onto the white background.

Chapitre I

Matériel et méthodes

V.1. Site d'étude

Cette expérimentation a été réalisée au niveau de laboratoire de biodiversité et conservation des eaux et des sols de l'université Abdelhamid ibn Badis, Mostaganem.

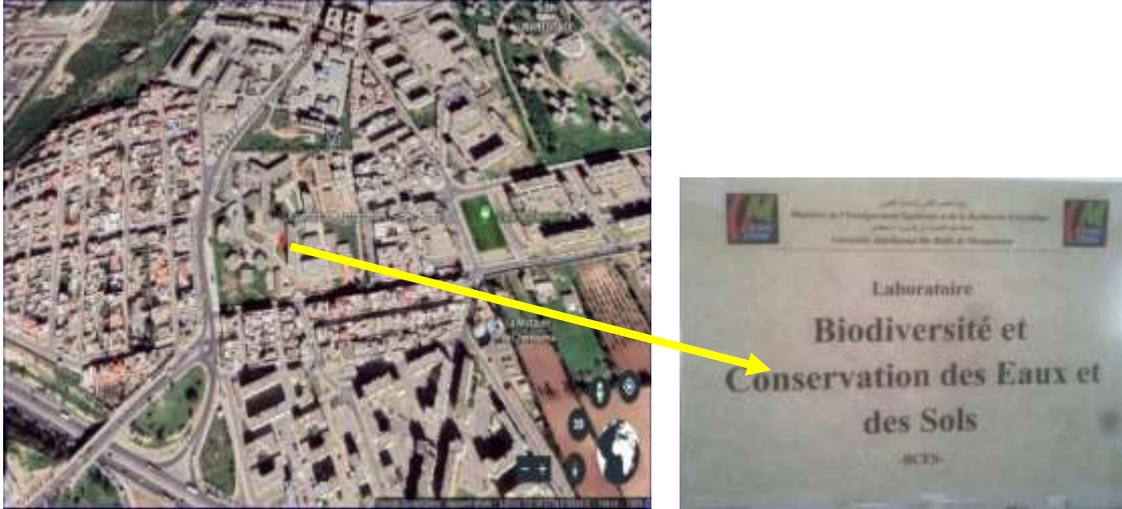


Fig. 15: Site expérimental de l'université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem.

V.2. Choix de l'espèce végétale

Les graines utilisées dans cette expérimentation sont des semences de *Moringa oleifera* L. d'origine de la wilaya de Ghardaïa, Algérie.



Fig. 16 : Graines de *Moringa Oleifera* L.

V.3. Protocole expérimental

Les grains de *Moringa oleifera* L. sont lavés avec l'hypochlorite de sodium de 8° pendant cinq minutes pour éliminer toute contamination fongique, puis rincées abondamment avec l'eau distillée pour supprimer toutes traces de l'hypochlorite de sodium. Pour faciliter leur germination, les grains sont trempés dans de l'eau distillée tiède pendant 48 heures, et mises à germer dans des boîtes de Pétri en plastique stériles de 9 cm de diamètre et de 1 cm d'épaisseur, tapissées avec deux couches de papier filtre stérile à raison de dix grains par boîte et cinq répétitions par traitement. Chaque boîte a reçu 10 ml de l'eau distillée pour grains témoins et le même volume de solution stressante (3, 5, 7 et 10 mM de Pb) pour les grains traitées avec le Pb. Ensuite, Les boîtes sont placées à l'obscurité dans une étuve réglée à une température de 27°C. Les semences sont suivies toutes les 24 h durant quinze jours.



Fig. 17 : lavage des graines avec l'hypochlorite de sodium



Fig. 18 : Rinçage des graines avec l'eau distillée



Fig. 19 : Trempage des graines dans de l'eau distillée tiède

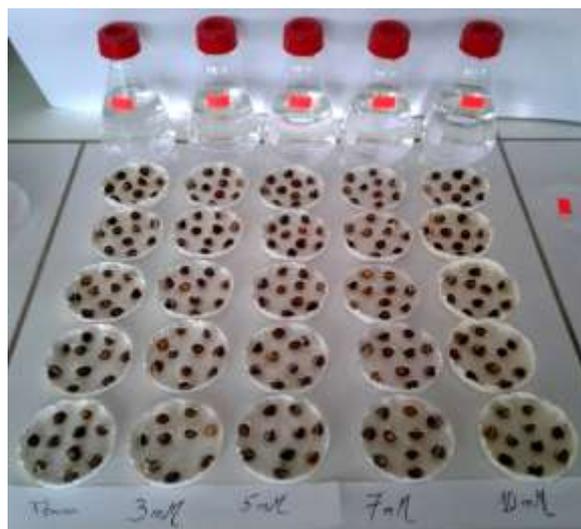


Fig. 20 : Germination des graines *Moringa Oléifira* L.

V.4. Préparation de solution stressante

Le plomb utilisé dans cette étude est sous forme de nitrate de plomb ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$) à cinq doses différentes (0, 3, 5, 7 et 10 mM).

- Dose 1 : 0 mM → 0 ppm
- Dose 2 : 3 mM → 993.6 ppm
- Dose 3 : 5 mM → 1656 ppm
- Dose 4 : 7 mM → 2318 ppm
- Dose 5 : 10 mM → 3312 ppm

V.5. paramètres étudiés

Durant cette expérimentation, on a étudié :

V.5.1. Cinétique du taux de germination

Il est exprimé par le pourcentage de graines germées chaque jour par rapport au nombre total de graines par boîte de Pétri (%) (**Mazliak, 1981**).

En effet le taux de germination est calculé selon la formule suivante :

$$TG (\%) = \frac{Gx}{Gt} * 100$$

Où :

TG : Taux moyen de germination en (%).

Gx : Nombre de graines germées.

Gt : Nombre total de graines mises à germer.

V.5.2. Cinétique de la longueur des racines et des tiges

La longueur des racines et des tiges des plantules de *Moringa oliéfira* L. est mesurée à partir de 4^{ème} jour à l'aide d'une règle graduée en (cm) à raison de 6 graines par boîte.

V.6. L'étude statistique.

Les résultats obtenus ont fait l'objet d'une analyse statistique du logiciel R version 3.5.3 (2019-03-11).

Chapitre II

Résulta et discussion

II.1.Résultats

II.1.1. Effet du plomb sur la cinétique du taux de germination des graines de *Moringa oleifera* L.

Les résultats obtenus montrent que les graines de *Moringa oleifera* L. commencent à germer à partir du 4^{ème} jour, où le taux de germination est supérieur à 88% pour les ensembles des doses du Pb (0, 3, 5, 7 et 10 mM) (Figure 21).

La germination des graines témoin commence à germer à partir du quatrième jour de la mise en germination où le taux de germination est 94%, puis elle s'achève au septième jour avec un taux de germination maximal qui est égale 100%. Alors que le taux de germination chez les graines traitées avec 3, 5 et 10 mM de Pb, est atteint un taux maximal de 98% au cinquième jour pour les graines traitées avec 3 mM et au septième jour pour les semences traitées avec 5 et 10 mM. Cependant le taux de germination le plus bas est remarqué chez les graines traitées avec 7 mM qui atteint 96% après cinq jours de la mise des semences en germination. Le taux de germination reste constant pour l'ensemble des doses de plomb jusqu'au la fin de l'expérimentation (Figure 21).

L'analyse statistique du taux de germination montre une diminution non significative où la probabilité est égale 1 ($P > 0.05$).

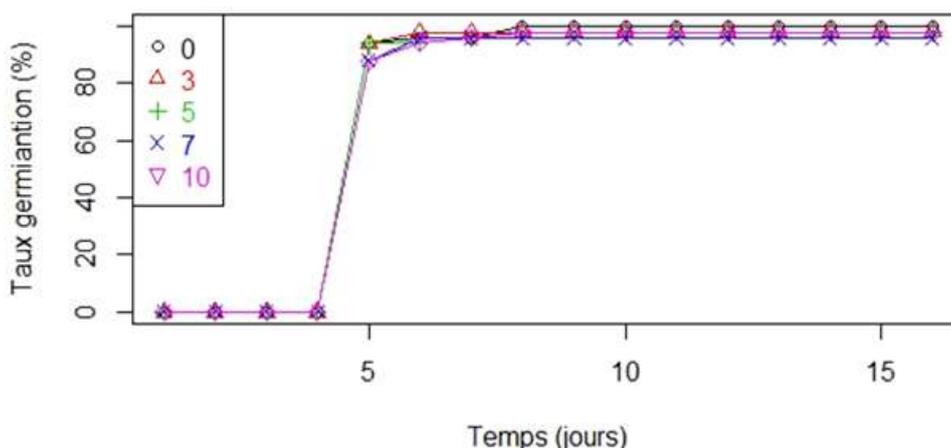


Fig. 21: Effet du plomb sur la cinétique du taux de germination des graines de *Moringa oleifera* L.

II.1.2. Effet du plomb sur la cinétique de la longueur des racicules de *Moringa oleifera* L.

Les résultats obtenus montrent que la longueur des racicules de *Moringa oleifera* L. diminue au fur et à mesure que les doses du plomb appliquées augmentent (Figure 22). L'élongation des racicules de *Moringa oleifera* L. se poursuit jusqu'au treizième jour pour se stabiliser jusqu'à la fin de l'expérimentation pour l'ensemble des doses de Pb appliquées. En absence du plomb, et chez les plantes témoins, la longueur des racicules au treizième jour est atteinte une valeur maximale de 29,70 mm, alors qu'en présence de plomb et chez les graines traitées avec 3, 5, 7 et 10 mM, on enregistre une diminution importante des longueurs des racicules des plantules spécialement chez les graines traitées avec 10mM par rapport au témoin, où on a enregistré les longueurs de 28.77, 26.33, 20.70 et 12,77 mm respectivement avec les doses de 3, 5, 7 et 10 mM du Pb appliquées. (Figure 22).

L'analyse statistique de la cinétique de la longueur des racicules de *Moringa oleifera* L. montre une diminution non significative où la probabilité est égale 0.188 ($P > 0.05$).

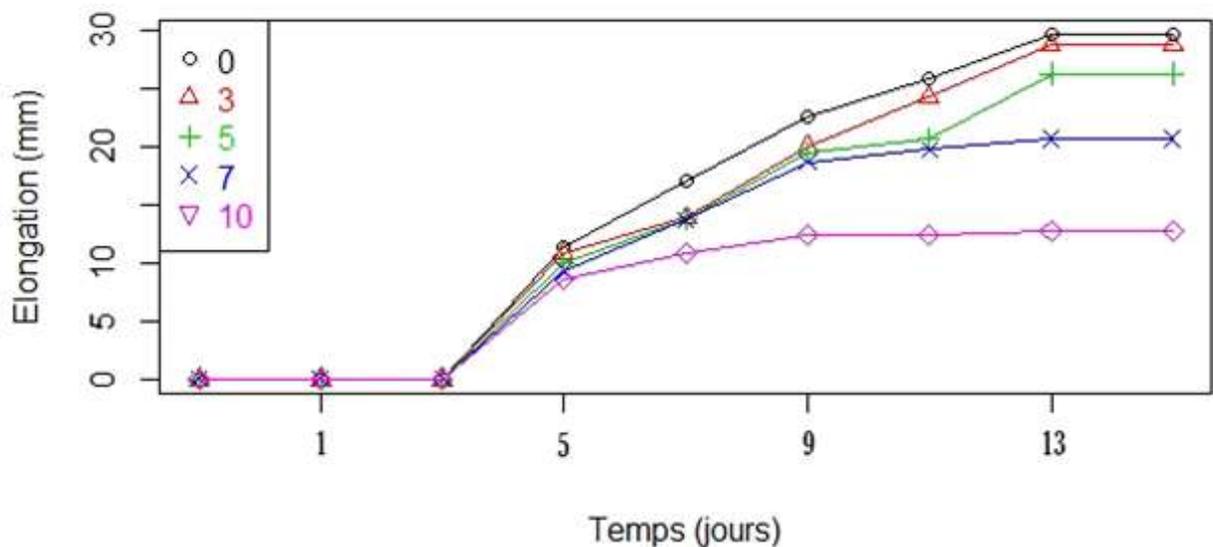


Fig. 22: Effet du plomb sur la cinétique de la longueur des racicules de *Moringa oleifera* L.

II.1.3. Effet du plomb sur la cinétique d'élongation des tiges de *Moringa oleifera* L.

Les résultats obtenus montrent que les élongations maximales sont enregistrées au niveau des plantes témoins et les plus petites sont remarquées chez les plantes traitées avec 10 mM. L'élongation des tiges se poursuit jusqu'au onzième jour pour se fixer au treizième jour pour les différents traitements du plomb. La longueur des tiges de *Moringa oleifera* L. diminue en fonction de l'accroissement des doses du plomb appliquées par rapport au témoin, où cette réduction est plus importante pour les différentes doses où on a enregistré des longueurs de : 124.16, 119.66, 117.33 et 92.83 mm respectivement avec les doses 3, 5, 7 et 10 mM du Pb par rapport au témoin où l'élongation des tiges est maximale et qui est égale 138.2 mm (Figure 23).

L'analyse statistique de la cinétique de la longueur des parties aériennes de *Moringa oleifera* L. montre une diminution non significative où la probabilité est égale 0.885 ($P > 0.05$) en fonction des doses croissantes du plomb appliquées.

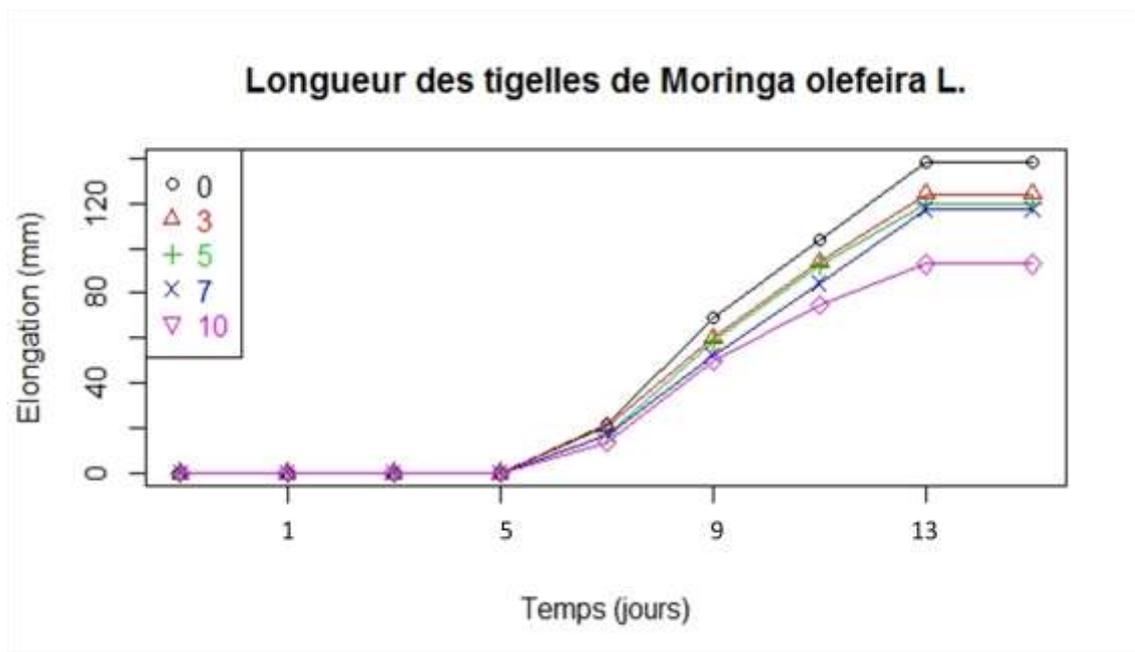


Fig. 23: Effet du plomb sur la cinétique de la longueur des tiges de *Moringa oleifera* L.

II.2. Discussion :

L'augmentation du taux des métaux non essentiels dans les plantes exerce une toxicité (**Prasad, 199**), affectant plusieurs étapes de développement, de la germination à la formation des feuilles.

II.2.1. Effet du plomb sur le taux de germination des graines de *Moringa oleifera* L.

Le plomb exerce un effet négatif sur la faculté germinative des graines de *Moringa oleifera* L., en effet les doses croissantes du plomb induit une diminution du taux de germination de graines de *Moringa oleifera* L. par rapport au témoin, où on a remarqué que le taux de germination maximal est enregistré chez les graines témoins et qui est de 100%. Le tégument garantit une protection très élevée contre les stress abiotiques, et les fortes variations interspécifiques des morphologies de ces téguments peuvent affecter leur perméabilité aux métaux (**Moise et al., 2005**). Alors que le plomb à faibles doses peut inhiber la germination des semences qui ont des enveloppes perméables comme le petit pois (**Seregin et Ivanov, 2000**). Cependant, les fortes doses du plomb conduisent à une inhibition totale de la germination chez l'haricot, dont le tégument de la graine ne limite pas assez la pénétration de ces ions. (**Wixrbicka et obidzinska, 1998**).

Nos résultats sont identiques avec les résultats obtenus par **Rouibi (1992)** qui a enregistré que la concentration 10 mM inhibe la germination des graines du blé et de l'haricot, et déshydrate les tissus. Alors que **Xiong (1997)** a remarqué que la concentration 1000 µg /ml réduit à 43,33% le pourcentage de la germination de *Brassica peknensis*. Les concentrations élevées de plomb entraînent une diminution du taux de germination des semences d'*Oryza sativa* (**Verma et Dubey, 2003**). **Aoumeur, (2012)** est montré que la dose de 1000 mg/l affecte la plante *raphanus sativus* L. par une inhibition de croissance, une diminution du taux de germination jusqu'à 75%.

II.2.1. Effet du plomb sur l'élongation des racines et des tiges de *Moringa oleifera* L.

Les résultats obtenus montrent une diminution importante de la longueur des tiges et la longueur des racines des plantes stressées par le plomb à différentes concentrations (3, 5, 7 et 10 mM) par rapport à la plante témoin. Ces résultats sont concordants avec ceux de **Brunet (2008)**, qui présentent chez les plantes contaminées par le plomb, un ralentissement de leur développement et une inhibition de la croissance des racines et des

parties aériennes. Le ralentissement du développement racinaire est la première réponse des plantes cultivées dans un milieu contaminé par le Pb (**Potters et al., 2007**). En générale les racines sont les plus sensibles aux métaux lourds par rapport à d'autres organes végétaux, parce qu'elles sont les premières cibles de passage et d'accumulation de ces métaux (**Seregin et Ivanov, 2000**), particulièrement, les racines primaires qui sont plus sensibles que les racines latérales (**Obrouscheva et al., 1998**). Ceci est due probablement à l'inhibition de la division des cellules racinaires (**Eun et al., 2000**), et de l'élongation des cellules (**Seregin et Ivanov, 1997 ; Obrouscheva et al., 1998 ; Malkowski et al., 2002**) comme il a été montré chez *Lemna minor* (**Samardakiewicz et Wozny, 2005**). Chez plusieurs espèces, comme *Triticum sativum* (**Dey et al., 2007 ; Kaur et al., 2013**), *Zea mays* L. (**Kozhevnikova et al., 2009**), *Pisum sativum* (**Malecka et al., 2009**) et *Sedum alfredii* (**Gupta et al., 2010**). Le Pb a également inhibé l'allongement des racines et des tiges et l'expansion des feuilles chez l'ail, l'orge et le radis noir (**Nagajyoti et al., 2010**). **Verma et Dubey (2003)** ont également montré que la croissance des racines du riz est inhibée de manière significative avec l'augmentation du plomb. La concentration 1000µg/ml inhibe l'élongation radriculaire et réduit la biomasse de *Brassica pekinensis* (**Xiong, 1997**).

Le plomb réduit également fortement le développement de la plantule et des radicelles (**Mishra et Choudhuri, 1998**). Un traitement à de faibles concentrations en plomb inhibe la croissance des racines et des parties aériennes (**Makowski et al., 2002 ; An, 2006**). Cette inhibition est plus importante pour la racine, ce qui peut être corrélé à plus forte teneur en plomb de cette dernière. (**Obrouscheva et al., 1998**).

Conclusion

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'elle, la phytoremédiation qui exploite les propriétés de certaines plantes à tolérer et accumuler de grandes quantités de métaux lourds.

La germination des graines est un ensemble de processus métaboliques aboutissant à l'émergence de la radicule. Ce stade de développement est considéré comme une étape critique dans l'établissement des semis et ainsi la détermination d'une production agricole réussie.

Ce travail a porté donc sur l'étude des effets du plomb sur cinétique du taux de germination et l'élongation des racines et des tigelles des graines de *Moringa oleifera* L., car la germination est la première étape du développement des plantes dans des milieu contaminé par ce métal.

Les résultats obtenus indiquent que l'exposition des graines du *Moringa oleifera* L., à différentes doses du plomb affecte son processus germinatif, qui se traduit par une diminution non significative du taux de germination des graines traités par le plomb à différentes concentrations (3, 5, 7 et 10 mM) par rapport au témoin où le taux de germination est égale 100%.

L'excès de plomb exerce un effet négatif sur la croissance de la plante du *Moringa oleifera* L., qui entraîne une réduction de la croissance et l'allongement des parties aériennes des plantules ainsi que la taille des racines et la densité des poils absorbants ce qui conduit au développement de racines plus courtes mais plus compactes spécialement au niveau des plantes traités avec 10 mM de plomb.

D'après ces résultats, nous pouvons déduire que *Moringa oleifera* L., a une forte potentialité vis-à-vis au stress métallique.

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'étudier l'effet du plomb (3, 5, 7 et 10 mM) sur différents paramètres (morpho-

physiologique, biochimique ..) de la plante de *Moringa oleifera* L. ainsi que le dosage du plomb dans les différentes parties de la plantes, pour savoir qu'elle est ou qu'elles sont les parties responsables de l'accumulation de ce métal. Il serait intéressant d'étudier l'effet génotoxique du plomb.

Référence

- **Aberra M., Workinesh T., et Tegene N., (2011).** Effects of feeding *Moringa stenopetala* leaf meal on nutrient intake and growth performance of Rhode Island Red chicks under tropical climate. *Trop. Subtrop. Agroecosyst.* 14: 485-492.
- **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.
- **Anwar, F., Latif, S., Ashraf, M., Gilani, A.H., (2007).** "Moringa oleifera: A Food Plant with Multiple Medicinal Uses." *Phytotherapy Research* 21: 17-25.
- **An Y J., (2006).** "Assessment of comparative toxicities of lead and copper using plant assay." *Chemosphere* 62 :1359-1365.
- **Anzala F.J., (2006).** Control de la vitesse de germination chez le maïs (*Zea mays*) : étude de la voie de biosynthèse des acides aminés issus de l'aspartate et recherche de QTLs. Thèse de Doctorat Université d'Angers. 148p.
- **Ammari S., (2011).** Contribution à l'étude de germination des graines des plantes sahariennes broutées par le dromadaire. Mémoire d'ingénieur, 46p.
- **Aoumeur H., (2012).** "Phytoremediation potential of *Raphanus sativus* L. for lead contaminated soil". *Acta Biologica Szegediensis* 56 :43-49.
- **Baize D., (1997).** Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France). Références et stratégies d'interprétation. INRA Éditions, Paris. 410 pp.
- **Baize D., (2002).** "Les éléments traces métalliques dans les sols. INRA éditions.
- **Baker, A.J.M., McGrath, S.P., Reeves, R.D., Smith, J.A.C., (1999).** Metal hyperaccumulator plants: a review of ecology and physiology of a biological resource for phytoremediation of metal polluted soils. Ed. Terry N and Banuelos G. Lewis Publishers Boca Raton, London, New York, Washington, 85-107.
- **Baskin C.C et Baskin J.M., (1998).** Seeds: Ecology, biogeography and evolution of dormancy and germination. Academic Press, San Diego. C A.
- **Bazzaz FA, Carlson RW, Rolfe GL., (1975).** "Inhibition of Corn and Sunflower photosynthesis by lead." *physiologia plantarum* 34 :326-329.
- **Berti WR., (1997).** Phytostabilization of metals. In: I. Raskin and B.D. Ensley eds. Phytoremediation of toxic metals: using plants to clean-up the environment. New

- York, John Wiley & Sons, Inc. p. 71-88.
- **Boullard B., (2001).** Plantes médicinales du monde: Réalités et Croyances. Paris : ESTEM editions.
 - **Brooks, R.R., Lee, J. Reeves, R.D. and Jaffré, T., (1977).** Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium specimens of indicator plants. *Journal of Geochemical Exploration* 7, 49-57.)
 - **Brunet J, Reppelin A, Varralult 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.
 - **Blaylock MJ, Salt DE, Dushenkov S, Zakharova O, Gussman C, Kapulnik Y, Ensley BD et Raskin I., (1997).** Enhanced accumulation of Pb in Indian mustard by soil-applied chelating agents. *Environmental Science and Technology* 31 : 860-865.
 - **Blaylock MJ, Huang JW., (2000).** Phytoextraction of metals. In I Raskin, BD Ensley, eds, *Phytoremediation of toxic metals: using plants to clean up the environment*. John Wiley and Sons, New York, p 53–70.
 - **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.226P.
 - **Chaney RL, M Malik, YM Li, SL Brown, EP Brewer, JS Angle et AJM Baker., (1997).** Phytoremediation of soil metals. *Environmental Biotechnology* 8, 279-284.
 - **Chaussant R, Le Deunff Y., (1975).** La germination des semences .Ed. Bordars, Paris, 232p.
 - **Cheng C, Motohashi R, Tsuchimoto S, Fukuta Y, Ohtsubo H, Ohtsubo E., (2003).** Polyphyletic origin of cultivated rice: based on the interspersed pattern of SINEs. *Mol.*
 - **Chen J, Zhu C, Li LP, Sun ZY et XB., (2007).** "Effects of exogenous salicylic acid on growth and H₂O₂-metabolizing enzymes in rice seedling under lead stress." *Journal of Environmental Sciences* 19 :44-49.
 - **Colombano,s,saada,A,Guerin, V, Bataillard, p., Bellenfant, G., Beranger, S., Hube,D., Blanc,C. et Zornig, c.and Girardeau, I., (2010).** Quelles techniques pour quels traitements-Analyse coûts-bénéfices (Rapport final BRGM1RP-58609-FR). bureau de recherches géologiques et minières (BRGM), 403.
 - **Côme D., (1970).** Les obstacles à la germination (monographie et physiologie végétale). Ed. Masson et Cie (Paris), 162p.

- **Côme D., (1982)** - Influence de la réfrigération et de la congélation sur la qualité et l'aptitude à la germination des graines. *Revue Internationale du Froid* 5(6) :33-336.
- **Delaveau, P. and P. Boiteau., (1980)**. "Huiles à intérêt pharmacologique, cosmétologique et diététique. IV. Huiles de *Moringa oleifera* Lamk. et de *M. drouhardii* Jumelle." *Plantes médicinales et phytothérapie*.
- **De Saint Sauveur A. Broin M., (2006)**. L'utilisation des feuilles de *Moringa oleifera* contre les carences alimentaires : un potentiel encore peu valorisé, 8p. Disponible sur <http://www.moringanews.org>. Consulté le 12/10/2013.
- **Dey S. K., Dey J., Patra S., Pothal D., (2007)**. Changes in the antioxidative enzyme activities and lipid peroxidation in wheat seedlings exposed to cadmium and lead stress. *Braz. Journal of Plant Physiology*.19, 53–60.
- **Drazkiewicz M., (1994)**. "Chlorophyll-occurrence, functions, mechanism of action, effects of internal and external factors." *Photosynthetica* 30 : 321-331.
- **Dugé de Bernonville T., (2009)**. Caractérisations histologique, moléculaire et biochimique des interactions compatible et incompatible entre *Erwinia amylovora*, agent du feu bactérien, et le pommier (*Malus x domestica*). Thèse de Doctorat Univ d'Angers. 216P.
- **Dumat C, Chiquet A, Goody D, Aubry E, Morin G, Juillot F, Benedetti M., (2001)**. Metal ion geochemistry in smelter impacted soils and soil solutions. *Bulletin de la Société Géologique de France* 172: 539-548.
- **Eun SO, Shik Youn H, Lee Y., (2000)**. "Lead disturbs microtubule organization in the root meristem of *Zea mays*." *Physiologia Plantarum* **110**: 357-365.
- **EPA., (2000)**. Etats-Unis. United States Environmental Protection Agency (EPA). Introduction to phytoremediation. Cincinnati, OH, 104 p.(EPA/600/R-99/107)
- **Ferreira P.M.P., Carvalho A.F.F.U., Sousa D.F., Ferreira J.M., Martins A.R., Martins A.M.C., et Queiroz M.G.R., (2007)**. Water extract of *Moringa oleifera* seeds: a toxicological approach. *Revista Eletrônica Pesquisa Médica*. 1 (4): 45 - 53.
- **Ferrand E, Dumat C, Leclerc-Cessac E et Benedetti M., (2006)**. Phytoavailability of zirconium in relation to its initial added form and soil characteristics. *Plant Soil* **287**: 313-325.
- **Franklin, R.E., Duis, L., Brown, R., Kemp, T., (2005)**. Trace element content of selected fertilizers and micronutrient source materials. *Communications in Soil Science*

and Plant Analysis 36, 1591-1609.

- **Foidl N., Makkar H.P.S. et Becker K., (2001).** The potential of *Moringa oleifera* for agricultural and industrial uses (45-76). In: Fuglie L. J (editor). The miracle tree: the multiple attributes of *Moringa*.-Wageningen : CTA; Dakar: CWS.-177p.
- **Foidl N., Makkar H.P.S., et Becker K., (2001).** Potentiel de *Moringa Oleifera* en agriculture et dans l'industrie. Potentiel de développement des produits du *Moringa*. 29 octobre - 2 novembre 2001.Dar es Salaam, Tanzanie.
- **Foy CD, Chaney RL et White MC., (1978).** "The Physiology of Metal Toxicity in Plants. " Annual Review of Plant Physiology 29 :511-566.
- **Fuglie L.J., (2001).** Introduction to the multiple uses of *Moringa* (7-10) In: Fuglie L J (editor). The miracle tree: the multiple attributes of *Moringa*.-Wageningen : CTA; Dakar: CWS.-177p.
- **Fuglie L. J., (2002).** Noms vernaculaires du *Moringa oleifera* (163-167) In : L'arbre de la vie, Les multiples usages du *Moringa*.-Wageningen : CTA; Dakar: CWS.-177p.
- **Garbisu C et Alkorta I., (2001).** Phytoextraction: a cost-effective plant-based technology for the removal of metals from the environment. *Bioresource Technology* 77 : 229-236.
- **Garnier R., (2005).** Toxicité du plomb et de ses dérivés, EMC (Elsevier Masson SAS) Pathologie Professionnelle et de l'Environnement; p. 67-88.
- **Ghosh, M.; Singh, S., (2005).** A review on phytoremediation of heavy metals and utilization of it's by products. *Asian J Energy Environ*, 6, (4), 18.
- **Godin, P.M., Feinberg, M.H., Ducauze, C.J., (1985).** Modelling of soil contamination by airborne lead and cadmium around several emission sources. *Environmental Pollution Series B: Chemical and Physical* 10, 97-114.
- **Gopal R et Rizvi AH., (2008).** "Excess lead alters growth, metabolism and translocation of certain nutrients radish. " *Chemosphere* 70 :1539-1544.
- **Gupta D, Huang H, Yang X, Razafindrabe B, Inouhe M., (2010).**The detoxification of lead in *Sedum alfredii* H. is not related to phytochelatins but the glutathione. *Journal of Hazardous Materials*. 177(1-3), 437-444.
- **Gutteridge J.M.C. et Halliwell B., (1990).** The measurement and mechanism of lipid peroxidation in biological systems. *Trends Biochem. Sci.* 15: 129-135.
- **Heller R ; ESNAULT S et LANCE C., (1990)**-Physiologie Végétale. *Masson paris* p 16.

- **Heller R., (1990).** - Physiologie végétale. Tome 2: Développement. 4^{ème} édition. Paris, Masson, 266p.
- **Hernandez-Ochao, I., Garcia- Vargas, G., Lopez- Carrillo L., Rubio-Andrade M., Moran- Martinez J., Cebrian M.E., Quintanilla- Vege B., (2005).** Low lead environmental exposure alters semen quality and sperm chromatin condensation in northern Mexico. *Reproductive Toxicology*. 20 (2): 221-228.
- **Hilhorst, H.W., (2007).** Definitions and hypotheses of seed dormancy. In *Seed development, dormancy and germination*, K.Bradford and H.Nonogaki, Eds (Oxford, UK: Blackwell Publishing), 50-67.
- **Hinsinger P., (1996).** Mobilisation of phosphates rock and alumina-sorbed phosphate by roots of ryegrass and clover as related to rhizosphere pH. *European Journal of Soil Science* 47: 53-544.
- **Hinsinger P, Schneider A et Dufey JE., (2005).** "Le sol : ressource en nutriments et biodisponibilité." In « Sols et Environnement », Dunod (ed), Paris, 285-305.
- **Interstate Technology et Regulatory Cooperation Work Group (ITRC) ., (2001).** Emerging technologies for the remediation of metals in soils. Washington, D, C., ITRC and phytotechnologies Teams, 124p.PHYTO-2.
- **Jaiswal D., Rai P. K., Kumar A., Mehta Sh., et Watal G., (2009).** Effect of Moringa oleifera lam. Leaves aqueous extract therapy on hyperglycemic rats. *Journal of ethnopharmacology*. 123 (3): 392-396.
- **Jarup, L., (2003).** Hazards of heavy metal contamination. *Br Med Bul.* 68(1) :167-182.
- **Kabata-Pendias A et Pendias H., (1992).** "Trace elements in soils and plants." CRC Press, Boca Raton, Florida, 2nd Edition, 209 p.
- **Kabata-Pendias A et Pendias H., (2001).** "Trace elements in soils and plants." CRC Press, Boca Raton, Florida, 2nd Edition, 209 p.
- **Kafuku G., et Mbarawa M., (2010).** L'huile de Moringa oleifera est une source engageante pour la production de biodiesel. Alkaline catalyzed biodiesel production from Moringa oleifera oil with optimized production parameters. *Applied Energy*. 87: 2561–2565.
- **Kaur G, Singh HP, Batish D R, Kohli R K., (2013).** Lead (Pb)-induced biochemical and ultrastructural changes in wheat (*Triticum aestivum*) roots. *Protoplasma*. 1, 53-62.

- **Kosobrukhov A, I Knyazeva et Mudrik V., (2004).** "Plantago major plants responses to increase content of lead in soil: Growth and photosynthesis." *Plant Growth Regulation* **42** : 145-151.
- **Kozhevnikova A D, Seregin I V, Bystrova E I, Belyaeva A I, Kataeva M N, Ivanov VB., (2009).** The effects of lead, nickel, and strontium nitrates on cell division and elongation in maize roots. *Russian Journal Plant Physiology.* 56, 242-250.
- **Kumar PBAN, Dushenkov V» Motto H» Raskin I., (1995).** Phytoremediation : the use of plant to re/move heavy metals from soil. *Environ. Sci. Technol.* 29 : 1232-1238.
- **Kumbhare MR., Guleha V., et Sivakumar T., (2012).** Estimation of total phenolic content, cytotoxicity and in-vitro antioxidant activity of stem bark of *Moringa oleifera*. *Asian Pacific Journal of Tropical Disease.* 144-150.
- **Lamb D.T., Ming H., Megharaj M et Naidu R., (2010).** Phytoextraction and accumulation of lead in Australian native vegetation *Arch Environ Contamin Toxicol.* 58 (3) : 613-621.
- **Liu D, Jiang W, Liu C, Xin C, Hou W., (200).** "Uptake and accumulation of lead by roots, hypocotyls and shoots of Indian [*Brassica juncea* (L.)]. " *Bioresource Technology* 71 :273-277.
- **Loué A., (1993).** *Oligo-Éléments en Agriculture.* SCPA, Nathan, Paris, P 577.
- **Makkar, H. et K. Becker., (1996).** "Nutritional value and antinutritional components of whole and ethanol extracted *Moringa oleifera* leaves." *Animal feed science and technology* 63(1-4): 211-228.
- **Makowski E, Kita A, Galas W, Karcz W, Kuperberg JM., (2002).** "Lead distribution in corn seedlings (*Zea mays* L.) and its effect on growth and the concentration of potassium and calcium." *Plant Growth Regulation* 37 :69-76.
- **Malecka A, Piechalak A, Morkunas I et Tomaszewska B., (2009).** "Accumulation of lead in root cells of *Pisum sativum*." *Acta Physiologiae Plantarum.*
- **Marc, P. and Gautheyrou, J., (2003).** *L'analyse du sol. Minéralogique, organique et minérale.* Springer, 998 p.
- **Mazliak P., (1982).** – *Croissance et développement. Physiologie végétale II.* Hermann Ed, Paris, Collection Méthodes, 465p.
- **McGrath, S., (1998).** Phytoremediation for soil remediation. In *Plants that hyperaccumulate heavy metals: their role in phytoremediation, microbiology,*

archaeology, mineral exploration and phytomining, Brooks, R., Ed. CAB International: New York,; pp 261-288.

- **Meagher RB., (2001)** Pink water, green plants and pink elephants. *Nature Biotechnology* 19, 1120-1121.
- **Meers E et Tack F., (2004)**. The potential of foliar treatments for enhanced phytoextraction of heavy metals contaminated soil. *Remed J.* 14 : 111-123.
- **Mench, M. Lepp, V. Bert, J.P. Schwitzguébel, S. Gawronski, P. Schröder, J. Vangronsveld., (2010)**. *Journal of Soils and Sediments*, 10, 1039-1070.
- **Meyer S, Reeb C, Bosdeveix R., (2004)**. *Botanique, biologie et physiologie végétale*. Ed. Moline, Paris, 461p.
- **Michel V., (1997)**. *La production végétale, les composantes de la production*. Paris, Ed. Danger, 478p.
- **Mishra A et Choudhuri MA., (1998)**. " Amelioration of lead and mercury effects on germination and rice seedling growth by antioxidants. " *Biologia plantarum* 41 :469-473.
- **Morton JF., (1991)**. The horseradish tree, *Moringa Pterygosperma* (Moringaceae) –A Boon to Arid Lands. *Economic Botany*, 45: 318-333.
- **Moise, J.A., Han, S., Gudynaite-Savith, Johnson ,D.A., Miki, B.L.A., (2005)**. Seed cots : structure, développement, composition, and biotechnology, *In Vitro Cell. Dev. Biol.Plant*,41 : 620-644.
- **Nagajyoti PC, Lee KD, Sreekanth TVM., (2010)**. Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: *Environmental Chemistry Letters*. 8, 199-216.
- **Nriagu JO., (1978)**. *The biogeochemistry of lead in the environment*. Ed JO Nriagu, Elsevier Biomedical Press, Amsterdam.
- **Obroucheva NV, Bystrova EI, Ivanov VB, Antipova OV, Seregin IV., (1998)**. "Root growth responses to lead in young maize seedling. " *plant and soil* 200 :55-61.
- **Olson M.E., (2001)**. Introduction to *Moringa* family (11-28). In: Fuglie L.J (editor). *The miracle tree: the multiple attributes of Moringa*.-Wageningen : CTA; Dakar: CWS.177p.
- **Olson, M. E., (2002)**. "Intergeneric relationships within the Caricaceae-Moringaceae clade (Brassicales) and potential morphological synapomorphies of the clade and its families." *International Journal of Plant Sciences* 163(1): 51-65.

- **Pacyna. J.M., (1984).** Estimation of atmospheric emissions of trace elements from anthropogenic sources in Europe, *J. Atmos. Environ.* 18 :41-50.
- **Pais I and J Benton Jones., (2000).** "The handbook of Trace Elements". Boca Raton, FL, St. Lucie Press 223 p.
- **Panchal M. A., Murti K., Lambole V., et Gajera V., (2010).** Pharmacological properties of *Moringa oliefera* lam. A review. *Pharmacologyonline.* 2: 768-775.
- **Panetta A., (1979).** Germination and seed survival in the woody weed, groundsel bush (*Baccharis halimifolia*L) *Aust. J. Agric. Res.*, 30(60) :1067-1077.
- **Pichard A., (2003).** Plomb et ses dérivés. Fiche INERIS.
- **Pilon-Smits E., (2005).** Phytoremediation. *Annual Review of Plant Biology* 56, 15-39.
- **Pivetz, B.E., (2001).** Phytoremediation of Contaminated Soil and groundwater at hazardous waste sites. *Ground Water Issue*, United States Environmental Protection Agency, Office of Research and Development and Office of Soil Waste and Emergency Response, EPA/540/S-01/500, 36 p. [En ligne] http://clu.in.org/download/remed/epa_540_s01_500.pdf (Page consultée le 16 janvier 2004).
- **Poumayea N., Mabingua J., Lutgenb P., et Biganc M., (2012).** Contribution to the clarification of surface water from the *Moringa oleifera*: Case M'Poko River to Bangui, Central African Republic. *Chemical engineering research and design.* 90: 2346–2352.
- **Poskuta JW, Parys E et Romanowska E., (1987).** The effects of lead on the gaseous exchange and photosynthetic carbon metabolism of pea seedlings. *Acta Soc. Bot. Pol* 56 : 127-137.
- **Potters G, De Gara L, Asard H et Horemans N., (2007).** "Ascorbate and glutathione: guardians of the cell cycle, partners in crime?" *Plant Physiology and Biochemistry* 40: 537-548.
- **Puschenreiter M, et WW Wenzel., (2005).** Rhizosphere processes involved in phytoremediation of contaminated soils. in H.-K. Galazka, editor. *Current developments in remediation of contaminated lands*, Pulawy, Poland.
- **Price M. L., (2007).** Le *Moringa*. In Note technique- ECHO (revue en 2000, en 2002 et en 2007). [En ligne] Accès Internet : <http://www.echonet.org/tropicalag/technotes/Moringa.pdf> (Page consultée le 14 Octobre 2010).

- **Price., (2007).** Le Moringa. Note technique- ECHO (revue en 2000, en 2002 et en 2007). 22p.
- **Rajangam, J., Azahakia Manavalan, R., Thangaraj, T., Vijayakumar, A., et Muthukrishan, N., (2002).** Production et utilisation du Moringa en Inde du sud: la situation actuelle.
- **Remon E., (2006).** Tolérance et accumulation des métaux lourds par la végétation spontanée des friches métallurgiques : vers de nouvelles méthodes de bio-dépollution. Université Jean Monnet, Saint Etienne.
- **Robert M. et Juste C., (1999).** Dynamiques des éléments traces de l'écosystème sol. Dans: Association ECRIN éd., Spéciation des Métaux dans le Sol, Les cahiers des clubs CRIN, Club CRIN Environnement et Ministère de l'Environnement, Paris. 15-37.
- **Roggo, Y., (2003).** Détermination de la qualité de la betterave sucrière par spectroscopie proche infrarouge et chimométrie. Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille.
- **Rosillon, F., B. Savadogo, et al., (2012).** "Estimation of the nitrates contents in waters by using reagent strips: An environment education exercise in the Sourou valley in Burkina Faso." Vertigo 12(2).
- **Rouibi, A., (1992).** Etude des effets du nitrate de plomb sur la germination et la productivité primaire nette chez *Phaseolus vulgaris*. Thème de Magister en Ecotoxicologie Université d'Annaba Algérie.
- **Saifullah E., Meers Qadir M., Caritat P., Tack F.M.G., Du Laing G. et Zia M.H., (2009).** EDTA- assisted Pb phytoextraction. Chemosphere. 74 : 1279-1291.
- **Salt, D.E., Smith, R.D. and Raskin, I., (1998).** Phytoremediation. Plant Physiol. Plant Mol. Biol. 49, 643–68.
- **Samardakiewicz S, Wozny A., (2005).** Cell division in *Lemna minor* roots treated with lead. Aquatic Botany. 83, 289-295.
- **Sanders, J.R. S.P McGrath and T.M. Adams., (1986).** Zinc, copper and nickel concentrations in ryegrass grown on sewage sludge-contaminated soils of different pH, J. Sci. Food Agr. 37. 961-968.
- **Sereguine I et Ivanov V., (1998).** "Histochemical Investigation of Cadmium and Lead Distribution in Plants." Russian Journal of Plant Physiology 44 : 791-796.
- **Seregin I et Ivanov V., (2000).** "Histochemical Investigation of Cadmium and

- Lead Distribution in Plants." Russian Journal of Plant Physiology **44** : 791-796.
- **Seregin IV et Ivaniov V.B., (2001).** Physiological aspects of cadmium and lead toxic effects on higher plants. Russian Journal of Plant Physiology 48: 606-630.
 - **Seregin IV, Shpigun LK et Ivanov VB., (2004).** "Distribution and Toxic Effects of Cadmium and Lead on Maize Roots." Russian Journal of Plant Physiology **51** : 525-533.
 - **Sezgin, N., Ozcan, H.K., Demir, G., Nemlioglu, S., Bayat, C., (2004).** Determination of heavy metal concentrations in street dusts in Istanbul E-5 highway. Environment International 29, 979-985.
 - **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 Ecotoxicol Environ Safety. 74(1) : 78-84.
 - **Shalini, R.S., (2003).** Lead toxicity induces lipid peroxidation and the activities of antioxidant enzymes in growing rice plants. Plant Science, 645-655.
 - **Singh R, Tripathi RD, Dwivedi S, Kumar A, Trivedi PK, Chakrabarty D., (2003).** Lead bioaccumulation potential of anaquatic macrophyte Najas indica are related to antioxidant system. Biores.Technol 101: 3025–3032.
 - **Smits E.A.H.P et Freeman J.L., (2006).** Environnemental cleanup using plants biotechnological advances and ecological consideration. Front Eco Environ. 4 : 203-210.
 - **Soltner D., (2001).** Les bases de la production végétale. Tome III la plante et son amélioration, 3ème édition Paris, 189p.
 - **Sharma P et Dubey RS., (2005).** "Lead toxicity in plants."Brazilian Journal of Plant Physiology 17 : 35-52.
 - **Tahiliani P., et Kar A., (2000).** Role of Moringa oleifera leaf extract in the regulation of thyroid hormone status in adult male and female rats. Pharmacological Research. 41 (3): 319-323.
 - **Tomulescu I, Radoviciu E,Merca V et Tuduce A., (2004).** "Effect of Copper , Zinc and Lead and Their Combinations on the Germination Capacity of Two Cereals" journal of agricultural sciences 15 : 39-42.
 - **Trees for Life., (2013).** [Accès le 02/10/13]. (www.treesforlife.org).
 - **Tung G et Temple PJ., (1996a).** "Histochemical detection of lead in plant tissues." Environmental Toxicology and Chemistry **15**: 906-914.

- **Verma S et Dubey RS., (2003).** "Lead toxicity induces lipid peroxidation and alters the activities of antioxidant enzymes in growing rice plants." *Plant Science* **164**: 645-655.
- **Vidali M., (2001)** Bioremediation. An overview. *Pure and Applied Chemistry* **73**, 1163-1172.
- **Vila, M., (2006).** Utilisation de plantes agronomiques et lacustres dans la dépollution des sols contaminés par le RDS et le TNT : approches en laboratoire. Docteur, Institut national polytechnique de Toulouse, Toulouse.
- **Vodnik D, Jentschke G, Fritz E, Gogala N et Godbold DL., (1999).** "Root-applied cytokinin reduces lead uptake and affects its distribution in norway spruce seedling. " *Physiologia Plantarum* **106** :75-81.
- **Wierzbicka M., (1987).** "Lead translocation and localization in *Allium cepa* roots." *Canadian Journal of Botany* **65**: 1851-1860.
- **Wierzbicka M et Obidzinska J., (1998).** " the effect of lead on seed imbibition and germination in different plant species. " *plant Science* **137** :155-171.
- **Wong MH., (2003).** Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soils. *Chemosphere* **50**, 775-780.
- **Wozng A, Schneider J et Gwozdz EA., (1995).** "The effects of lead and kinetin on greening barley leaves. " *Biologia Plantarum* **37** : 541-552.
- **www.moringa news.org.**
- **Xiong. Z. T., (1997).** Lead uptake and effects on seed germination and plant growth in a Pb hyperaccumulator *Brassica pekinensis* Rupr. Department of Environmental Science, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072. People's Republic of China. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* (1998) **60** :285-291.
- **Xiong Z, Zhao F et Li M., (2006).** "lead toxicity in *Brassica pekinensis* Rupr : Effect on nitrate assimilation and growth. " *Environment Toxicology* **21** :147-153.
- **Yang X, Feng Y, He Z et Stoffella PJ., (2006).** Molecular mechanisms of heavy metal hyperaccumulation and phytoremediation. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology* **18**: 339-353.
- **Zheljzakov VD, Craker LE et Xing B., (2006).** "Effects of Cd, Pb, and Cu on growth and essential oil contents in dill, peppermint, and basil." *Environmental and Experimental Botany* **58** : 9-16.

- **Zheng LJ, Liu XM, Lutz 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 : 57-68.

Annexe

Tableau 1 : Analyse de variance du taux de germination des graines de *Moringa oleifera* L.

	Df	Sum Sq	Mean Sq F	value	Pr (>F)
as.character(pbl\$Doses)	4	76	19	0.008	1
Residuals	145	337903	2330		

Tableau 2 : Corrélation entre les doses du taux de germination des graines de *Moringa oleifera* L.

	diff	lwr	upr	p adj
10mM-0 mM	-1.3333333	-35.76469	33.09802	0.9999701
3 mM -0 mM	0.6666667	-33.76469	35.09802	0.9999981
5 mM -0 mM	-0.3333333	-34.76469	34.09802	0.9999999
7 mM -0 mM	-1.0000000	-35.43135	33.43135	0.9999905
3 mM -10 mM	2.0000000	-32.43135	36.43135	0.9998496
5 mM -10 mM	1.0000000	-33.43135	35.43135	0.9999905
7 mM -10 mM	0.3333333	-34.09802	34.76469	0.9999999
5 mM -3 mM	-1.0000000	-35.43135	33.43135	0.9999905
7 mM -3 mM	-1.6666667	-36.09802	32.76469	0.9999272
7 mM -5 mM	-0.6666667	-35.09802	33.76469	0.9999981

Tableau 1 : Analyse de variance d'élongation des racines de *Moringa oleifera* L.

	Df	Sum Sq	Mean Sq F	value	Pr (>F)
as.character(pbl\$Doses)	4	487	121.77	1.561	0.188
Residuals	145	11308	77.99		

Tableau 2 : Corrélation entre les doses d'élongation des racines de *Moringa oleifera* L.

	diff	lwr	upr	p adj
10mM-0 mM	-9.3222222	-34.91915	16.27471	0.8522428
3 mM -0 mM	-3.2944444	-28.89138	22.30249	0.9965448
5 mM -0 mM	-4.2666667	-29.86360	21.33027	0.9906649
7 mM -0 mM	-6.7055556	-32.30249	18.89138	0.9507327
3 mM -10 mM	6.0277778	-19.56915	31.62471	0.9663048
5 mM -10 mM	5.0555556	-20.54138	30.65249	0.9823243
7 mM -10 mM	2.6166667	-22.98027	28.21360	0.9985940
5 mM -3 mM	-0.9722222	-26.56915	24.62471	0.9999723
7 mM -3 mM	-3.4111111	-29.00804	22.18582	0.9960459
7 mM -5 mM	-2.4388889	-28.03582	23.15804	0.9989336

Tableau 1 : Analyse de variance d'élongation des tiges de *Moringa oleifera* L.

	Df	Sum Sq	Mean Sq F	value	Pr (>F)
as.character(pb1\$Doses)	4	1489	372,3	0.289	0.885
Residuals	145	186750	1287.9		

Tableau 2 : Corrélation entre les doses d'élongation des tiges de *Moringa oleifera* L.

	diff	lwr	upr	p adj
10 mM -0 mM	-9.3222222	-34.91915	16.27471	0.8522428
3 mM -0 mM	-3.2944444	-28.89138	22.30249	0.9965448
5 mM -0 mM	-4.2666667	-29.86360	21.33027	0.9906649
7 mM -0 mM	-6.7055556	-32.30249	18.89138	0.9507327
3 mM -10 mM	6.0277778	-19.56915	31.62471	0.9663048
5 mM -10 mM	5.0555556	-20.54138	30.65249	0.9823243
7 mM -10 mM	2.6166667	-22.98027	28.21360	0.9985940
5 mM -3 mM	-0.9722222	-26.56915	24.62471	0.9999723
7 mM -3 mM	-3.4111111	-29.00804	22.18582	0.9960459
7 mM -5 mM	-2.4388889	-28.03582	23.15804	0.9989336