



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIC ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem



جامعة عبد الحميد بن باديس

مستغانم

كلية العلوم الدقيقة وعلوم الطبيعة و الحياة

Faculté des Sciences Exactes et Sciences de la Nature et de la Vie

Département de Biologie

Option

Phytotechnologie appliquée aux sols pollués

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master biologie

Effet du plomb sur les paramètres physiologies chez la fève (Vicia faba L.)

Laboratoire de la Biodiversité et Conservation des Eaux et des sols, université de Mostaganem.

Présenté par

TAHAR MEZEDEK Zahira

et

LAIDANI Souad

Devant le jury

Nom et prénom	Grade	Qualité	Appartenance administrative
ARBAOUI Mohamed	MAA	Président	Centre universitaire de Relizane
BOUZIANI El Hadj	MAA	Encadreur	Université des frères Mentouri Constantine
BENOUIS Slimane	MAA	Examineur	Centre de recherche scientifique et technique sur les régions Arides de Biskra

Année universitaire : 2015/2016



Remerciements

Au terme de ce travail, nous tenons à remercier Dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience pour achever ce travail.

*Nous tenons à adresser nos remerciements à Monsieur **REGUIEG YSSAAD Houcine**. A professeur à l'université de Mostaganem, responsable du laboratoire de la Biodiversité et Conservation des Eaux et des sols, université de Mostaganem.*

*Nous tenons à adresser également nos remerciements à l'encadreur Monsieur **BOUZIANI El Hadj** qui a bien voulu mettre incomparable savoir et expériences à notre disposition.*

*Nous tenons à adresser également nos remerciements à Monsieur **ARBAOUI Mohamed** qui a voulu présidé notre jury.*

*Nos remerciements spécialement à l'examineur Monsieur **BENOUIS Slimane**, pour toutes les informations et leur précieux conseils.*

Nos vifs remerciements vont spécialement aux membres du la serre du Mazagran.

Ainsi qu'à tous les employés du Laboratoire de la Biodiversité et Conservation des Eaux et des sols, université de Mostaganem.

Nos remerciements vont à tous les amis surtout mon ami Mohamed, Abir et Raouia merci pour les espoirs, les conseils et mes sœurs Salima . Fatiha

Sans oublier tous les employés de la bibliothèque de l'Ita pour leur aide et leur compréhension.

Nos remerciements vont à tous ceux qui ont contribué de prêt ou de loin à la réalisation de ma Mémoire.

*Nous adressons nos vifs remerciements à tous les membres du service de d'hôpital de Mesra , en particulier Mm **BENDENIA Wahiba** et tout les personelles de service pour leurs conseils et leurs grandes disponibilités.*

ZAHIRA et SOUAD.





Dédicace

-Je dédie mon travail :

-A Mes très chères : mon père et ma mère qui sont toujours présent pour m'encourager et me donner de la volonté pour continué et qui m'ont transmis la vie et l'amour.

-Que Dieu vous garde pour moi

-A mon frères Mohamed, a mes sœurs, et a mes cousins et cousines

-A tous mes amis surtout : Zahire, Abir, Raouia, Salima.

-A tous mes amis de la promotion Phytotechnologie appliquée aux sols polluée.

Souaad





Dédicace

-Je dédie mon travaille :

-A Mon très cher papa que il est toujours présent dans mon coure merci papa pour tout les courages et la volonté

-A celle qui m'a transmis la vie, l'amour, le courage, à toi maman toutes mes joies, mon amour et ma reconnaissance

-Que Dieu vous bénisse toujours-

-A mes frères et sœurs, A mes cousins et cousines

-A mon ami que je la remercie pour ces encouragement et sa compréhension et donnée toujours les conseils merci mon ami Mohamed et ma camarade Liadani Souaad .

-A tous mes amis surtout : Souaad, Abir , Raouia , Salima, et Zahia .Mouna, Attika, Amal

-A tous mes amis la promotion Phytotechnologie appliquée aux sols polluée.

Zahira



RESUME

Le plomb est l'un des métaux lourds les plus toxiques, il cause des dégâts considérables sur l'activité et le développement biologique des êtres vivants. Sa répartition à travers les différents compartiments de l'environnement reste majoritairement liée à l'action anthropique. Sur les plantes les effets néfastes de ce polluant peuvent s'exprimer au niveau racinaire et au niveau aérien, elles sont caractérisées par des symptômes vus à l'œil nu d'ordre morphologique et des autres d'ordre physiologiques internes détectables par des analyses au laboratoire. Le présent travail consiste à suivre le comportement de la fève (*Vicia faba* L.) face au stress de plomb. Cette plante est utilisée comme modèle dans les études écotoxicologiques grâce à sa biomasse importante et à son cycle végétatif court.

Pour la réalisation de notre travail, on a exposé les plante de la fève (variété Sidi Aïch) à différentes doses de plomb (0, 50, 100, 200, 500, 1000 et 2000 ppm) sous forme de nitrates $Pb(NO_3)_2$, ces doses ont été appliqué sur le substrat de culture avant le repiquage des graines. Plusieurs paramètres d'ordre physiologiques ont été testés tout le long de l'expérimentation afin d'étudier le comportement des plantes traitées face à ce stress.

Les résultats trouvés ont révélé des réductions notables pour l'ensemble des paramètres mesurés, la teneur en pigments chlorophylliens et la teneur en sucres solubles des feuilles sont les paramètres les plus affectés par l'augmentation de la dose de plomb appliquée dans le substrat de culture. Ces résultats suggèrent que la présence du plomb dans le milieu modifie le fonctionnement et le développement normal des plantes par des perturbations interne sur le plan physiologique et biochimiques.

MOTS C LES: Plomb, stress, évolution, doses, *Vicia faba*, paramètre physiologiques.

ABSTRACT

Lead is one of the most toxic heavy metals; it causes considerable damage on activity and biological development of living things. Its distribution across the various compartments of the environment remains largely related to human action. On plants the harmful effects of this pollutant can express the root level and air level, they are characterized by symptoms seen on morphological and physiological levels detectable by analysis at laboratory. This study is to monitor the behavior of the bean (*Vicia faba* L.) under lead stress. This plant is used as a model in eco-toxicology studies with its high biomass and its short growth cycle.

For the realization of our work, we exposed the plant bean (variety Sidi Aich) at different doses of lead (0, 50, 100, 200, 500, 1000 and 2000 ppm) in the form of Pb nitrate (NO₃)₂ these doses were applied to the growth substrate before transplanting the seeds. Several physiological order parameters were tested throughout the experiment to study the behavior of the treated plants deal with this stress.

The found results showed significant reductions for all measured parameters, the chlorophyll pigment content and soluble sugar content in leaves are the most affected by the increase of lead dose parameters applied in the culture substrate. These results suggest that the presence of lead in the environment modifies the operation and the normal development of plants by internal disturbances on the physiological and biochemical level.

THE WORDS C: Lead, stress, evolution, doses, *Vicia fabea. L.*, and physiological parameter.

ملخص

الرصاص هو أحد المعادن الثقيلة التي تسبب ضررا كبيرا علي النظام البيئي و التنمية البيولوجية وكذلك له أثرا خطيرا علي النباتات في المستوى الجذري والمستوى الهوائي هذه الأثار تتميز بأعراض يمكن رؤيتها بالعين المجردة وأخرى الداخلية وذلك عن طريق الإجهاد الرصاص. فهذا العمل من أجل مراقبة سلوك النبات قول تحت الإجهاد الرصاص ويستخدم هذا النبات نموذجا في الدراسات البيئية وتقييم سمية هذا المعدن.

تهدف دراستنا إلى تعريض نبات الفول (صنف سيدي العيش) إلى جرعات مختلفة (0 – 50 – 100 – 200 – 500 – 1000 – 2000 جزء في المليون) من الرصاص $Pb(NO_3)_2$ ، طبقت هذه الجرعات قبل زرع بذور الفول وقد تم تتبع العديد من العمليات الفيسيولوجية في كافة مراحل التجربة من أجل دراسة سلوك نبات الفول تحت هذا الإجهاد.

أظهرت النتائج تناقص كبير في جميع العمليات الفيسيولوجية، محتوى الكلوروفيل ومحتوى السكريات في أوراق الفول هي أكثر تضررا. هذه النتائج تشير إلى أن وجود الرصاص في الوسط، يعمل على إحداث اضطرابات داخلية فيسيولوجية وبيوكيميائية.

الكلمات المفتاحية : الرصاص, الإجهاد, معلمات الفيسيولوجية *L beafa Vicia* , تطور جرعات

LISTE DES ABREVIATIONS

% :	pourcent.
Ø:	Diamètre.
°C:	degré Celsius.
µg/g :	microgramme par gramme.
µm:	micromètre.
A470 :	absorbance à 470 nm.
A645:	absorbance à 645 nm.
A663 :	absorbance à 663 nm.
ALAD:	δ-aminolevulinate déshydratase.
BRGM:	Bureau de Recherche Géologiques et Minières.
CEC:	capacité d'échange cationique.
Chlr.a:	chlorophylle a.
Chlr.a+b:	chlorophylle a+b.
Chlr.b:	chlorophylle b.
Cm:	centimètre.
Cm ² :	centimètre carré.
CO ₂ :	bioxyde de carbone.
D.1:	dose une (témoin).
D.2:	dose deux.
D.3:	dose trois.
ETM:	éléments traces métalliques.
g :	gramme.
g/kg:	gramme par kilogramme.
H :	heure.
kt/an:	Kilotonnes par an.
mg/g:	milligramme par gramme.
ml:	millilitre.
mm:	millimètre.
mn:	minute.
MS:	matière sèche.
p :	probabilité.
Pi :	poids intaille.

Ps : poids sec.
Ppt : Poids en peul de turgescence
Ppm, p.p.m: partie par million.
PS PA: poids sec de la partie aérienne.
PS P R: poids sec de la partie racinaire.
P s: poids sec.
RWC: relative water content, contenu relatif en eau.
SS: sucres solubles.

Liste des figures

Fig n°01 : Cycle biogéochimique des éléments.....	12
Fig n°2 : Diagramme pH/Eh du système plomb-eau à 25°C.....	17
Fig n°3 : Distribution des espèces aqueuses du plomb en fonction du pH	17
Fig n° 04 : Interactions au niveau de la rhizosphère entre le sol, la plante et les microorganismes, influençant la phytodisponibilité	21
Fig n°05 : Les différentes parties de la fève <i>Vicia faba</i> L.....	30
Fig n° 06 . Fève, <i>Vicia faba</i> .L.....	31
Fig n°07 : Evolution des pigments photosynthétiques en fonction de la dose de Pb.....	49
Fig n° 08 : Evolution de la teneur en sucres dans les feuilles de <i>Vicia faba</i> L en fonction de la dose de Pb.....	52
Fig n°09 : Evolution de contenu relatif en eau des feuilles <i>Vicia faba</i> L en fonction de la dose de Pb.....	54
Fig n°10 : Evolution du poids sec de la racine de <i>Vicia faba</i> L en fonction de la dose de Pb.....	55

Liste des photos

Photo n° 01 : La serre expérimentale	37
Photo n°02 : Prélèvement du substrat (A) tamisage (B) et remplissage des pots (C).....	38
Photo n°03 : Préparation des pots de culture.....	38
Photo n°02 : Dispositif expérimental.....	39
Photo n°05 : Présentation la germination.....	40
Photo n°06 :des graines germées.....	41
Photo n°07 :Application du stress (01 préparation des concentrations,02 applications des différentes doses).....	41
Photo n°08 : Présentation le repiquage.....	42

Liste des tableaux

Tableau n°01: Valeur de teneurs limites en plomb dans les eaux de consommation et dans l'air.....	13
Tableau 02 : Valeurs règlement en vigueur dans les denrées alimentaires pour le plomb (Les teneurs s'appliquant à la partie comestible des denrées alimentaires mentionnées).....	14
Tableau n°3 : Composition chimique de la fève selon différents stades de maturité (en % de la Matière Sèche).....	34
Tableau n°4 : Composition élémentaire de la graine de fève.....	34
Tableau n°5 : Teneur de la fève en minéraux et en Vitamines (Vit) (En mg/100g).....	34
Tableau n°06 : Les principales maladies de la fève.....	36
Tableau n°07 : Propriété physico-chimique du substrat utilisé.....	38
Tableau n°08: Concentrations de Pb(NO ₃) ₂ appliquée par pot (en g).....	42
Tableau n°09: L'évolution de la teneur en chlorophylle A en fonction de la concentration en Plomb.....	45
Tableau n° 10: Analyse de la variance de la chlorophylle A de la plante <i>Vicia faba.L.</i>	45
Tableau n°11: L'évolution de la teneur en chlorophylle B en fonction de la concentration en Plomb.....	46
Tableau n°12 : Analyse de la variance de la chlorophylle B de la plante <i>Vicia faba.L.</i>	47
Tableau n°13: L'évolution de la teneur en chlorophylle A+B en fonction de la concentration en Plomb.....	47
Tableau n° 14: Analyse de la variance de la chlorophylle A+B de la plante <i>Vicia faba.L.</i>	48
Tableau n° 15: L'évolution de la Teneur en sucres solubles en fonction de la concentration en Plomb.....	51
Tableau n°16: Analyse de la variance de la teneur en sucres solubles des feuilles de la plante <i>Vicia faba L.</i>	50

Tableau n°17: L'évolution de contenu relatif en eau (CRE) en fonction de la concentration en Plomb.....	52
Tableau n°18 : Analyse de la variance de la teneur relative en eau des feuilles de la plante <i>Vicia faba</i> L.....	53
Tableau n°19: L'évolution du poids sec des racines en fonction de la concentration en Plomb.....	53
Tableau n° 20: Analyse de la variance du poids sec des racines de la plante <i>Vicia faba</i> L.....	54
Tableau n°21: Analyse de la variance du poids sec de la tige de la plante <i>Vicia faba</i> L.....	55
Tableau n° 22: L'évolution du poids sec de la tige en fonction de la concentration en Plomb.....	65

Sommaire

Liste des abréviations

Liste des figures

Liste des photos

Liste des tableaux

Introduction	3
1. La pollution des métaux lourds.....	5
1.2. Généralité sur les métaux lourds.....	5
1.2. Définition des métaux lourds.....	6
2. Généralité sur le plomb.....	6
2.1. Propriétés physiques du plomb.....	6
2.2. Propriétés chimiques du plomb.....	7
2.3. Propriétés mécaniques du plomb.....	7
2.4. Composés minéraux du plomb.....	8
2.5 Composés organiques du plomb.....	8
3. Origines dans l'environnement et utilisation du plomb.....	9
3.1. Source naturelle du plomb.....	9
3.2. Sources anthropiques.....	9
3.2.1. Histoire de l'utilisation du plomb.....	9
3.2.2. Différentes utilisation du plomb.....	10
3.2.3. Cycle biogéochimique du plomb.....	11
4. Toxicité du plomb pour l'homme.....	12
4.1. Voies d'exposition.....	12
4.2. Valeurs limites réglementaires.....	12
4. Effets du plomb sur l'environnement.....	14
5. Le plomb dans le système sol-plant.....	16
5.1. Le plomb dans le sol.....	16
5.1.1 Généralités et concepts de base.....	16
5.1.2. Spéciation en phase aqueuse.....	16
5.1.3. Complexes inorganiques.....	17
5.1.4 .Complexes organiques.....	18
5.2. Mobilité du plomb.....	18
5.2.1. Influence des paramètres physico-chimiques sur la spéciation du plomb.....	18
5.2.2. Influence des microorganismes sur la spéciation du plomb.....	20

5.2.3 Influence des plantes sur la spéciation du plomb.....	20
6. Le plomb dans la plante	20
6.1. Notion de phytodisponibilité	20
6.2. Facteurs influençant la phytodisponibilité du plomb.	21
7. Absorption.....	22
7.1. Mécanismes d'absorption du plomb.....	22
7.2. Transfert du plomb du sol vers les racines.....	22
7.3. Translocation du plomb des racines vers les parties aériennes.....	23
8. Phytotoxicité du plomb.	24
8.1. Effets sur la germination et la croissance	24
8.1.1 .La germination.	24
8.1.2.-La croissance	24
8.2. Effets sur les constituants cellulaires.	25
8.2.1. Effets sur les enveloppes cellulaires.	25
8.2.2.-Effets sur les protéines.	26
8.2.3. Action sur les activités enzymatiques.	26
8.2. Effets sur la nutrition minérale.	27
8.3. Stress hydrique.....	27
8.4. Photosynthèse.....	27
8.5. Génération de stress oxydant.	28
9. Présentation du model végétal.	30
9.1. Généralités.	30
9.2. Classification et caractères botanique (Description).	31
9.3. Les variétés des fèves.....	32
9.4. Exigence agro-écologiques de la fève	32
9.5. Importance nutritionnelle de la fève.	33
9.6. Situation phytosanitaire de la fève.	34
a)-Les virus :.....	34
b) -Les insectes :	34
c)-L'orobanche :	34
d)-Les nématodes :.....	34
e)- Les maladies fongiques :.....	35
1. Objectifs du travail	37
2. Site expérimentale	37

3. conduite de l'expérimentation.....	38
3.1. Préparation du substrat.	38
3.2. Dispositif expérimental.	39
3.3. Matériels végétal utilisé.....	39
3.3. Germination.....	39
4. Application du stress métallique.....	41
5. Eclaircissement.....	42
6. L'arrosage.....	42
7. Analyse effectuées.	42
7.1. Le contenu relatif en eau (CRE).....	42
7.2. Dosage des pigments chlorophylliens.....	43
7.3. Dosage des sucres solubles.....	43
7.4. Le poids sec.....	44
8. L'analyse statistique.....	44
1. Présentation des Résultats.....	45
1.1. Pigments Chlorophylle.....	45
1.1.1. Chlorophylle A.....	45
1.1.2. Chlorophylle B.....	46
1.1.3. Chlorophylle A+B.....	47
1.2. Teneurs en sucres solubles.....	49
1.3. Contenu relatif en eau.....	51
1.4. Les Poids sec.....	53
1.4.1. Poids sec de la racine.....	53
1.4.2. Poids sec de la tige.....	54
2. Discussion Générale.....	57
2.1. CRE.....	57
2.2. Effet du plomb sur les pigments chlorophylliens.....	57
2.3. Effet du plomb sur teneur en sucres solubles du Vicia faba.....	58
2. 4. Effet du plomb sur le teneur de poids sec.....	59
Conclusion.....	60
Références bibliographiques	
Annexes	

Introduction

Introduction

La toxicité du plomb est connue depuis l'Antiquité, Hippocrate (460-377 av .J.C) rapportait. Chez l'homme, Hippocrate a également décrit les symptômes d'un empoisonnement par le plomb : diarrhées, fatigue, perte d'appétit et de poids, pâleur et irritabilité. Malgré cela, et du fait de ses nombreuses potentialités d'utilisation, Le plomb a continué à être utilisé et à polluer de façon importante l'environnement (Singh et *al.*, 1997 ; Seregin et Ivanoc, 2001 ; Patra et *al.*, 2004 ; Sharma et Dubey, 2005).

Le plomb est l'un des contaminants les plus répandus dans l'environnement (Jarup, 2003; Hernández-Ochoa et al, 2005), toxique, même à faible concentration pour de nombreux organismes vivants (CITEPA, 2009). Leur accumulation dans l'environnement peut se répercuter sur la santé des êtres humains et des animaux (Wang et al, 2003). La contamination de l'environnement a été très peu considérée la majorité concernant des plantes cultivées en raison des risque de contamination de la chaine trophique et de baisse de rendements observée sur les parcelles par le plomb (Singh et *al.*, 1997 ; Seregin et Ivanoc, 2001; *Patra et al.*, 2004 ; Sharma et Dubey, 2005).

En fonction des conditions du milieu, les plantes peuvent absorber une partie du plomb présent dans le sol. Les ions Pb^{2+} diffusent dans la racine, mais sont bloqués par la barrière physique que représente l'endoderme, ce qui limite fortement leur translocation vers les parties aériennes. Bien que les plantes possèdent de nombreux systèmes de détoxification pour limiter l'interaction de ces ions avec les molécules biologiques, ces derniers induisent tout un éventail d'effets délétères pour les organismes. Le plomb perturbe ainsi les structures membranaires et pariétales, modifie le statu hydrique que, perturbe l'absorption et/ou la translocation des éléments minéraux essentiels (calcium, manganèse, zinc, fer...) ou encore réduit la photosynthèse (Seregin et Ivanov, 2001; Sharma et Dubey, 2005). A l'échelle macroscopique, l'exposition des plantes au plomb induit une réduction de la croissance, de la biomasse produite, des rendements et, lorsque le stress est trop sévère, conduit à l'apparition de nécroses racinaires et foliaires, de chloroses, voire à la mort de la plante (Seregin et Ivanov, 2001; Sharma et Dubey, 2005).

Le but de notre travail est d'étudier l'effet de la présence du plomb dans le milieu de culture sur la croissance de la fève (*Vicia faba*), et de suivre l'impact résultant de cette contamination sur le comportement physiologique de la plante testée.

L'étude est réalisée sous des conditions non contrôlées afin d'isoler et d'étudier l'unique effet de la présence du plomb dans le substrat de culture sur le fonctionnement physiologique et biochimique de la plante.

Le choix de la plante s'est naturellement porté sur la fève (*vicia faba.L*), une plante de plus en plus utilisée en écotoxicologie (Loudes ,2002 ; Pourrut,2003).

Quatre parties composent ce mémoire. La première partie est une synthèse bibliographique sur le Plomb dans l'environnement et son effet sur les plantes, l'interaction Plomb- plante et sol et sur la culture de fève *vicia faba L*. Une présentation du matériel végétal et des techniques utilisées pour répondre à nos objectifs est effectuée dans une seconde partie. La troisième partie présente nos résultats de l'étude physiologie, biochimique. La dernière partie du manuscrit, qui propose une synthèse et d'une discussion de l'ensemble de ces résultats.

Partie 01

Bibliographie

1. La pollution des métaux lourds.

1.2. Généralité sur les métaux lourds.

Il n'existe pas une généralité internationalement reconnue pour le terme « métaux lourds » car chaque discipline scientifique développe une approche qui lui est propre.

En chimie, les métaux lourds sont en générale définis sur la base de propriétés spécifiques (poids moléculaire, capacité à formes des cations poly valeurs ...): métaux dont la masse volumique est supérieure à 6g.ml^{-1} (parfois la définition donne une limite de 4.5 ou 5.0 g/ml), métal dont le numéro atomique est supérieur à 20 (Boulkrah,2008 ; Trennel-Schaud et feix,2005).

En science du sol, il est convenu de parler « d'éléments trace métallique » qui désignent des composés naturels présents à très faible concentration : cadmium, mercure, Plomb, cuivre, nickel, zinc, cobalt, manganèse, chrome (Zorrig, 2011).

En toxicologie, ils peuvent être définis come des métaux à caractère cumulatif (souvent dans les tissus graisseux) ayant essentiellement des effets très néfastes sur organismes vivants. En nutrition et en agronomie, ils peuvent même être assimilés à des oligo –éléments indispensables à certains organismes, en particulier par leur action catalytique au niveaux du métabolisme.

Dans les sciences environnementales , les métaux lords associés aux notions de pollution et de toxicité sont généralement : l'arsenic (As) , le cadmium (Cd), le chrome (Cr) , l'étain (Sn), et le zinc (Zn) (boulkrah , 2008), Les plus toxiques d' entre eux sont le cadmium , l'arsenic , le plomb et le mercure (Boulkrah , 2008, Zorrig2011.) Ces éléments peuvent se trouver dans l'eau, dans le sol et dans tout organisme vivant (Bliefert et Perraand, 2011).

Certains métaux ne sont pas nécessaires à la vie, mais ils perturbent souvent le cours normal des processus métaboliques, même à l'état de traces à l'exception de faibles doses tolérables, de tels métaux ont souvent un effet toxique (Claus et *al.* 2004). D'autres éléments métalliques ou oligo-éléments (Fe, Mn, Zn, Cu, Mo, Ni), présents à l'état de traces, sont essentiels pour l'organisme, l'accroissement de leur concentration peut représenter un danger pour les organismes vivants. (Marschner. D.C, 1995).

1.2. Définition des métaux lourds.

L'expression métal lourd désigne pour les chimistes des métaux de numéro atomique élevé (Jeannot et *al.*, 2001).

D'un point de vue physique, le terme « métaux lourds » désigne les éléments métalliques naturels, métaux ou dans certains cas métalloïdes (environ 65 éléments), caractérisés par une forte masse volumique supérieure à 05g.cm^{-3} (Adriano, 2001).

D'un point de vue biologique, on distingue deux types en fonction de leurs effets physiologique et toxiques : métaux essentiels et métaux toxiques (Huynh, 2009) :

- Les métaux essentiels 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 peuvent devenir toxiques lorsque la concentration dépasse un certain seuil. C'est le cas du cuivre (Cu), du Nickel(Ni), du Zinc (Zn), du fer (Fe). Par exemple, le Zinc (Zn), à la concentration du milli molaire, est un oligo-élément qui intervient dans de nombreuses réactions enzymatiques (déshydrogénases, protéinase, peptidase) et joue un rôle important dans le métabolisme des protéines, des glucides et des lipides (Kabata-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). (Huynh, 2009).

2. Généralité sur le plomb.

2.1. Propriétés physiques du plomb.

Le plomb (Pb) est un métal mou, gris bleu, cristallise dans le système cubique à faces centrées. Sa densité est de 11,3. C'est un métal lourd. Sa température de fusion est de $327\text{ }^{\circ}\text{C}$ et sa température d'ébullition est de l'ordre de $1740\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Certaines propriétés du plomb sont exceptionnelles et peuvent être soit recherchées, soit au contraire subies par l'utilisateur. Ainsi, la basse température de fusion est un avantage lorsque le métal est mis en forme par moulage (grilles d'accumulateurs, caractères d'imprimerie, soudure). La densité élevée permet de réaliser des masses et des matériaux insonorisants de faible encombrement, mais elle est le plus souvent ressentie comme un inconvénient dans les batteries. (B.Benadda.2002).

2.2. Propriétés chimiques du plomb.

Le plomb appartient au quatrième groupe de la classification périodique. Sa masse atomique est de 207,2 g et son nombre atomique est égal à 82.

Le plomb est loin d'être chimiquement inerte mais présente une remarquable résistance à la corrosion. Cette inertie apparente est due au fait que, dans de nombreux cas, les produits forment, à la surface du métal, un film insoluble, imperméable et adhérent qui ralentit ou arrête l'action agressive du milieu environnant.

Ainsi, le plomb résiste très bien à l'action des acides sulfuriques, phosphoriques, chromiques et à de nombreux autres produits chimiques industriels.

En revanche, sa résistance est imparfaite vis-à-vis de l'acide nitrique, des hydracides et des acides organiques, ainsi que les bases.

Le plomb est pratiquement insensible à la corrosion atmosphérique, grâce à la formation d'une pellicule protectrice d'oxyde, d'hydrate et de carbonate de plomb.. D'une façon générale, les eaux sont également sans effet sur le plomb. Cependant, un eau aérée et très faiblement minéralisée peut exercer un effet dissolvant si le métal n'est pas encore revêtu de sa couche protectrice.

Enfin, le plomb est un produit difficilement inflammable et explosible, sauf sous forme pulvérulente (poussières) exposée à la chaleur ou aux flammes. Dans ce cas, les agents d'extinction recommandés sont le sable sec, de la dolomite ou du graphite. (B.Benadda.2002).

2.3. Propriétés mécaniques du plomb.

Le plomb pur et particulièrement malléable et peu tenace, et cela d'autant plus que la température s'élève. En outre, il est sujet au fluage ; sa limite d'élasticité (1,4 MPa à 20°C) est très inférieure à sa résistance à la rupture (> 10 MPa à 20°C). Recristallisant à la température ordinaire, le plomb pur ne s'écrouit pas. Cette particularité facilite sa mise en oeuvre par déformation, mais peut aussi l'exposer à un risque de fragilisation sous l'effet de vibrations même de fréquence faible.

Enfin, le plomb est un médiocre conducteur électrique (13 fois moins que le cuivre) et thermique. (B.Benadda.2002).

2.4. Composés minéraux du plomb.

Parmi les dérivés du plomb, les oxydes de plomb et certains sels présentent un intérêt dans le cadre des sources d'intoxication (Pascal 1963), (INRS 1998) et (INSERM 1999) :

- **La litharge** : ou monoxyde de plomb (PbO), est rencontrée sous forme de cristaux jaunes ou jaunes rougeâtres et préparés industriellement par oxydation à l'air du plomb fondu. C'est aussi un produit intermédiaire de la métallurgie du plomb, ainsi que le produit de combustion du plomb tétraéthyle dans les moteurs de véhicules. La litharge est très peu soluble dans l'eau mais soluble dans les acides (nitrique et acétique dilué) et les bases mais à chaud.
- **Le bioxyde de plomb** : ou oxyde peuce (PbO_2), se présente sous la forme d'une poudre cristalline noire brunâtre qui se décompose lentement sous l'effet de la lumière. C'est un produit insoluble dans l'eau, soluble dans l'acide chlorhydrique et soluble à chaud dans les solutions de soude.
- **Le minium** : ou sesquioxyde de plomb (Pb_3O_4), caractérisé par des pigments rouge-orange brillant presque insoluble dans l'eau, soluble dans l'acide acétique et chlorhydrique à chaud.
- **La galène** : ou sulfure de plomb (PbS), est une forme naturelle du plomb qui se présente sous la forme d'une poudre noire. Elle est très peu soluble dans l'eau mais soluble dans l'acide nitrique dilué.
- **L'anglésite** : ou le sulfate de plomb (PbSO_4), est rencontré dans la nature sous la forme de cristaux blancs. Il est peu soluble dans l'eau, beaucoup plus soluble dans les acides et les bases concentrés mais insoluble dans l'éthanol. L'anglésite est un produit d'oxydation du sulfure que l'on rencontre sur les sols pollués par certaines usines de première fusion du plomb.
- **La cérusite** : le carbonate neutre du plomb (PbCO_3) est un composé naturel qui a l'aspect d'une poudre blanche, insoluble dans l'eau, l'éthanol, l'ammoniaque mais soluble dans l'acide nitrique et l'acide acétique dilués.
- **Le bichlorure de plomb** : le (PbCl_2) est un produit qui se présente sous la forme de cristaux blancs soluble dans l'eau et très solubles dans les solutions de potasse ou de soude.

2.5 Composés organiques du plomb.

Le plomb possède une aptitude remarquable à se lier au carbone pour donner des dérivés organiques. Le plomb tétraéthyle, $\text{Pb}(\text{C}_2\text{H}_5)_4$, utilisé comme antidétonant dans l'essence, est très volatil car il a un point d'ébullition de 200°C . Il est très soluble dans les graisses et les huiles. Sa combustion, par exemple dans un moteur à essence, conduit à la

formation d'oxyde de plomb PbO. Le plomb tétraméthyle, Pb(CH₃)₄, possède les mêmes propriétés de volatilité et de solubilité (Insermi1999. In Benadda. B, 2002).

3. Origines dans l'environnement et utilisation du plomb.

3.1. Source naturelle du plomb.

Le plomb est 36^{ème} élément le plus abondant dans l'écorce terrestre avec une concentration moyenne de 13 mg kg⁻¹. Dans la croûte (la galène), produit final de la désintégration de trois éléments naturellement radioactifs ; l'uranium, le thorium et l'actinium. Les teneurs naturelles de Pb dans les sols sont généralement inférieures à 50 mg kg⁻¹. En raison d'une relativement faible mobilité dans les sols, le plomb est généralement peu soluble et disponible pour les biogéochimie du plomb dans l'environnement.

On trouve en premier lieu le plomb :

- ✓ Dans les nombreux gisements dont les principaux se trouvent au Mexique , en Australie et en ex-URSS, en France, ou on trouve dans le massif central, en Bretagne et dans les Pyrénées.

3.2. Sources anthropiques.

3.2.1. Histoire de l'utilisation du plomb.

Le plomb est un métal connu depuis plus de 5000ans .En effet, par exemple en Egypte des composés de plomb étaient déjà utilisés lors de l'émaillage du travail de poterie , autour de 3000 ans av .JC .La métallurgie du plomb a donc démarré à cette époque. Sous l'empire romain, le plomb était utilisé pour la fabrication de canalisations, la production de monnaie ou bien de vaisselle, l'oxyde de plomb étant employé comme pigment .Ensuite son utilisation a été largement réponde aux XIX^{ème} XX^{ème} siècles, sa production atteignant 1Mt.an⁻¹ à l'ère industrielle .Pendant la première moitié du XX^{ème} siècle, le plomb a été utilisé dans l'industrielle, l'imprimerie et de peintures ;dans le seconde moitié du siècle, l'utilisation dominante était liée aux carburants automobiles, le plomb étant ajouté dans l'essence comme antidétonant.

Cependant, depuis les années 1970, le développement de nouvelles technologies ainsi que la pris en compte des problèmes environnementaux et santé publique ont conduit à la diminution ou à l'arrêt de certaines utilisations du plomb (canalisation, soudure, peinture, pesticides, anti-détonnant dans l'essence....).Actuellement, la consommation de plomb

continue, sa principale utilisation étant dans les piles et batteries. Par contre, la production secondaire (à la partir de la valorisation des déchets) progresse par rapport à la production primaire (à la partir de minerais).

3.2.2. Différentes utilisation du plomb.

La présence généralisée du plomb dans l'environnement est essentiellement due aux activités humaines. Cette origine anthropique est multiple car les utilisations passées ou présentes du plomb sont très nombreuse (Nriagu, 1978 modifié par Arnaud,2003) ;

- ✓ Activités métallurgiques : Elles comprennent la métallurgie de première fusion lors de laquelle le minerai de plomb subit différents traitements afin d'extraire de plomb et les autres métaux. Il existe aussi la métallurgie de 2^{ème} fusion ou recyclage, qui consiste à obtenir du métal par la récupération de déchets contenant du plomb.
- ✓ Production d'essence au plomb : Le tétra éthyle de plomb ($Pb(C_2H_5)_4$) était le principal constituant des agents antidétonants ajoutés à l'essence, pour augmenter le taux d'actanes. Cette utilisation est interdite depuis le 1^{er} janvier 1996. Avant son interdiction, le plomb utilisé dans l'essence représentait la majeure partie du plomb disséminé, à cause des émissions de fumées.
- ✓ Protection contre radiations : Du fait de sa densité importante, le plomb est utilisé pour la protection contre le rayonnement.
- ✓ Accumulation : Les batteries au plomb sont constituées de 2 électrodes, une positive ($PbO_2/PbSO_4$) et négative ($Pb / PbSO_4$) immergées dans une solution d'acide sulfurique (H_2SO_4). Une batterie contient environ 8.6kg de plomb. Les batteries restent la principale utilisation du plomb actuellement.
- ✓ Les émissions de plomb dans sols et l'eau peuvent également se produire suite à l'épandage des boues d'épuration ou lors du rejet d'effluents agricoles traités (Singh et Agrawal, 2010)
- ✓ Munitions (cartouches et grenailles de plomb) et lest de pêche. Des études (Baron, 2001) ont montré que cette utilisation était responsable du saturnisme des oiseaux. De plus, cela entraîne la dispersion d'environ $8000t.an^{-1}$, dont les $\frac{3}{4}$ sont dus à la chasse (BRGM,2004)
- ✓ Peintures, pigments, apprête : la cérusite ou blanc de plomb ont été utilisées dans les peintures pendant près de 2000 ans. Le plomb a également été utilisé

comme composante de nombreux pigments en peinture .Le minium Pb^3O_4 est appliqué sous forme d'une couche anti-rouille sur de l'acier (interdit comme peinture pour la coque des navires :submarine).Le stéarate de plomb ($Pb(C_{17}H_{35}COO)_2$) et l'acétate de plomb ($Pb(CH_3CO-O)_2$)sont ajoutés à la peinture ou aux vernis comme dessiccateurs .L'utilisation dans les peintures est arrêtées depuis 2002.

- ✓ Verre et cristal : Le plomb est utilisé pour abaisser la température de fusion et pour assurer une meilleure transparence. Une fois que le plomb est relâché dans l'atmosphère, il peut traverser des milliers de kilomètres, surtout si les particules sont submicroniques ou s'il est sous forme de composés organiques volatils.

3.2.3. Cycle biogéochimique du plomb.

Le plomb contenu dans les roches peut se retrouver dans les sols, par altération de ces dernières, à des teneurs variables selon la composition initiale de la roche mère. De même, il est présent dans tous les autres compartiments de l'environnement (eaux, air et même les êtres vivants). La localisation ou la forme chimique du plomb dans l'environnement peut varier selon des phénomènes naturels ou par l'intervention de l'homme. Il existe donc un véritable cycle biogéochimique du plomb (tout comme il existe un cycle pour les éléments majeurs et les autres éléments traces) qui peut être schématisé comme sur la Figure 1 et au cours duquel le plomb change de compartiment et de forme chimique sous l'influence de processus naturels ou anthropiques.

Tableau n°01: Valeur de teneurs limites en plomb dans les eaux de consommation et dans l'air (Pichard ,2002 et adapté par Bureau de Recherche Géologique et Minières (BRGM, 2004).

<i>Milieu</i>	<i>Texte de loi</i>	<i>Teneur en plomb</i>
Eaux de consommation		
France	-Décret n°2001-1220(20 décembre 2001) Puis décret 2003-461 et 2003-461 (21 mai 2003)	10ugL ^{-1a}
US	Directive 98/83/CE(03 novembre 1998)	10ugL ⁻¹
OMS	Directive de qualité pour l'eau de boisson (1996)	10ugL ⁻¹
Air		
France	Décret n°2002-1085(19 novembre 2002)	0.5ugL ^{-1b}
US	Directive 2004/107/CE (15 décembre 2004)	10ugL ^{-1a}
OMS	Directive de qualité de l'air (2002)	10ugL ^{-1a}

(^a) Cette limite était fixée à 50ug.L⁻¹ jusqu'en 2003.L'article R1321-65 du nouveau code de la santé publique (2003) rend la valeur limite de 10ug.L⁻¹ obligatoire à partir du 25 décembre 2013.(Selon les lois françaises)

(^b) Actuellement cette valeur est fixée à 0.9 ug.L⁻¹. La valeur limite de 0.5 ug.L⁻¹ établie dans le décret n°2002-1085 sera en vigueur le 01/01/2010.

Tableau 02 : Valeurs règlement en vigueur dans les denrées alimentaires pour le plomb (Les teneurs s'appliquant à la partie comestible des denrées alimentaires mentionnées). (INERIS ,2006).

Produit	Teneur maximale (mg.kg⁻¹de poids frais)	Texte source
-Lait de vache (lait cru, destiné à la consommation ou à la fabrication de produits à base de lait)	0.02	Règlement CE/446/2001.
-Préparations pour nourrissons	0.02	
-Viande bovine, de mouton, de porc, de volaille.	0.1	
-Abats comestibles de bovins, de moutons de porcs , de volailles.	0.5	
-Chair de poissons	0.2	Règlement CE/78/5005.
-Crustacés	0.5	
-Céréales, légumineuses, légumes à cosse.	0.2	Règlement CE/466/2001.
-Légumes (sauf légumes-feuilles, brassicées, fines herbes, champignons.	0.1	
-Légumes –feuilles, brassicées, fins herbes, champignons.	0.3	
-Fruits (sauf petites baies et petite fruits)	0.1	
-Petites baies et petits fruits	0.2	
-Huiles et matières grasses	0.1	
-Jus de fruits	0.05	
-vins	0.2	

4. Effets du plomb sur l'environnement.

La plupart des concentrations en plomb que l'on trouve dans l'environnement sont le résultat des activités humaines. Un cycle non naturel de plomb a été créé à cause de l'utilisation du plomb brûlé dans les moteurs des voitures, création des sels de plomb (chlorures, bromures, oxydes).qui pénètrent dans l'environnement par l'intermédiaire des fumées d'échappement. Les particules les plus grandes retombent au sol immédiatement et polluent les sols ou eaux de surface, les particules plus petites parcourent de longues distances dans l'air et restent dans l'atmosphère. Une partie de ce plomb retombe sur terre lorsqu'il pleut. D'autres activités telles que la combustion de combustibles des procédés industriels et la combustion des déchets solides, y contribuent aussi. Le plomb peut se retrouver dans l'eau et les sols lors de la corrosion des tuyauteries en plomb des systèmes de transport d'eau et lors de l'usure des peintures au plomb.. Le plomb s'accumule dans le corps des organismes

aquatiques et ceux du sol. Chez les crustacés ces effets se font ressentir même si de très petites concentrations de plomb sont présentes. Les fonctions des phytoplanctons peuvent être perturbées lorsque le plomb est présent. Les fonctions du sol sont perturbées par l'intervention du plomb. Spécialement près des autoroutes et des terres agricoles, ou des concentrations extrêmes peuvent être présentes. Le plomb est un produit chimique particulièrement dangereux car il peut s'accumuler dans des organismes individuels, mais aussi dans la chaîne alimentaire tout entière. (Emille, 1978).

5. Le plomb dans le système sol-plant.

5.1. Le plomb dans le sol.

5.1.1 Généralités et concepts de base.

Issu d'un processus d'altération, le sol est un milieu poreux, créé par des processus physiques, chimiques et biochimiques qui transforment des matériaux géologiques sous l'action comminée des êtres vivants et des solutions de percolation. Il est formé de minéraux primaires, hérités de la roche mère auxquels s'ajoutent des minéraux secondaires, issus de la transformation chimique des précédents. Les constituants organiques interfèrent fortement avec les constituants minéraux.

Le plomb est un élément minéral naturellement présent dans la croûte terrestre, en général à de faibles teneurs, son origine dans les sols étant liée à sa présence dans la roche mère. Ceci peut cependant conduire parfois à des teneurs sensiblement plus élevées dans certains gisements. Mais, ce sont surtout les dépôts continus de métaux et métalloïdes par les activités humaines qui ont conduit à leur accumulation dans les différents compartiments de l'environnement. Ceci surtout au voisinage des centres urbains et industriels, mais également dans des zones plus reculées. 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. En effet, de nombreux travaux ont montré que la spéciation avait une influence sur le devenir des ETM dans l'environnement (Ferrand *et al.*, 2006). Il est donc fondamental de déterminer la genèse, la répartition, la localisation la configuration des associations du plomb avec les différents constituants du sol.

5.1.2. Spéciation en phase aqueuse.

Les métaux sont libres (Pb^{2+}) ou complexés à des ligands inorganiques (hydroxydes ou chlorure) ou à des molécules organiques dans la phase liquide du sol (Sposito *et al.*, 1982). Comme pour l'ensemble des éléments chimiques, sa spéciation en phase aqueuse est fortement contrôlée par le pH et le potentiel redox (Figure 2), ainsi que par le type et la concentration en agents complexant présents dans la solution

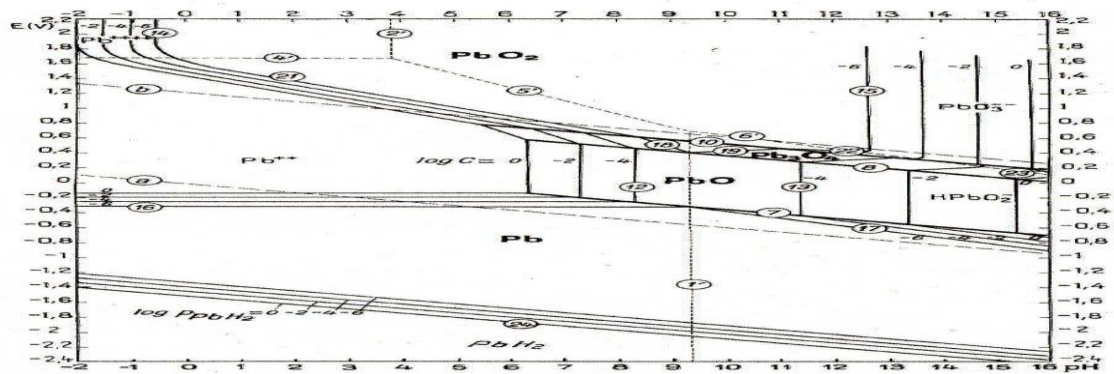


Figure n°2 : Diagramme pH/Eh du système plomb-eau à 25°C (d'après par Bureau de Recherche Géologique et Minières BRGM, 2004)

5.1.3. Complexes inorganiques.

Le plomb peut former des espèces aqueuses hydroxylées : $PbOH^+$; $Pb(OH)_2(aq)$ et $Pb(OH)_3^-$ (Baes et Mesmer, 1976). Il peut aussi former des complexes aqueux avec des ligands de type carbonates, chlorures, sulfates, nitrates et fluorures, même si $PbNO_3^+$, $PbCl^+$, $PbCl_2$ et $PbCl_3^-$ sont très peu stables en solution. Des calculs de spéciation dans des eaux de rivières (Hem, 1985) montrent que des complexes carbonatés apparaissent prédominants pour des valeurs de $pH > 6,5$ et que pour des valeurs de $pH < 6$ l'espèce Pb^{2+} devient dominante (Figure n°03).

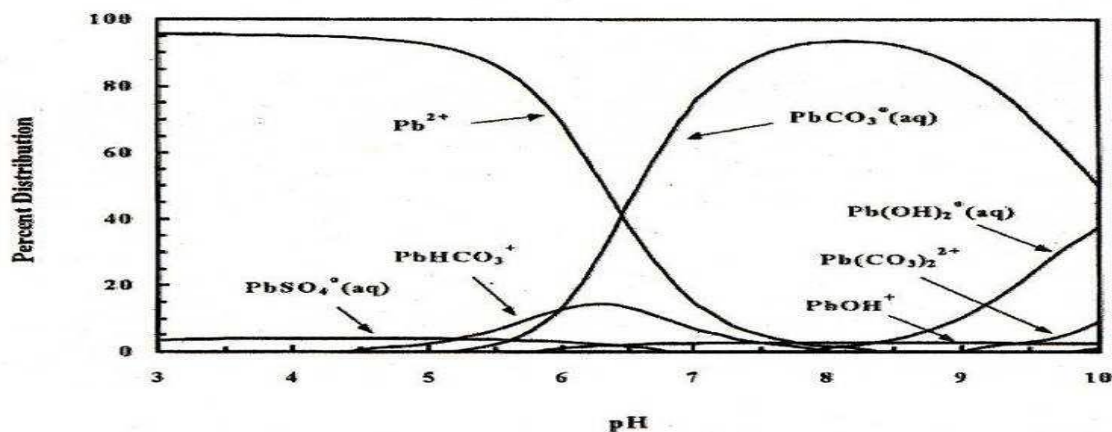


Figure n°3 : Distribution des espèces aqueuses du plomb en fonction du pH (d'apte par Bureau de Recherche Géologique et Minières BRGM, 2004)

5.1.4. Complexes organiques.

Dans certains sols, la formation d'espèces méthylées d'origine microbienne a déjà été évoquée (Rickard et Nriagu, 1978). Ces espèces sont beaucoup moins présentes que les complexes inorganiques, mais elles sont beaucoup plus toxiques. Il existe aussi des alkyls de plomb (qui étaient présents dans les essences) qui présentent une très forte toxicité, et qui s'accumulent dans des organismes marins (Mikac et *al.*, 2001 In Morie cechi. 2008).

Déterminer la spéciation des métaux dans la solution implique d'extraire la solution du sol, grâce à des dispositifs expérimentaux comme des lysimètres, des bougies poreuses ou bien grâce à des centrifugations du sol. Cependant, ils introduisent des artefacts dans la composition chimique de la solution extraite (Liator, 1988 In Morie Cechi. 2008), ce qui peut altérer la spéciation du métal identifié. Une fois extraite, la solution peut être analysée par des techniques spectrométriques (ICP-AES ou ICP-MS selon la gamme de concentration considérée).

5.2. Mobilité du plomb.

La mobilité d'un élément dans le sol est son aptitude à passer d'un compartiment où il est retenu à un compartiment où il est retenu avec une énergie moindre, le compartiment ultime étant la phase liquide ou éventuellement l'atmosphère du sol (Juste, 1988) La mobilité du plomb est principalement contrôlée par sa spéciation en phase aqueuse et par des processus d'adsorption/désorption ainsi que de dissolution/précipitation. Le rôle de certains paramètres tels que le pH, le potentiel redox, la composition minéralogique du sol ou du sédiment et la présence de ligands ou de colloïdes dans la phase va être déterminant. Le plomb étant en général considéré comme un élément peu mobile dans les milieux naturels, il a donc tendance à s'accumuler dans les horizons superficiels des sols. Les travaux de Sterckeman (2000) par exemple, démontrent que dans des profils de sol au voisinage de deux fonderies du Nord-pas de Calais, le plomb est essentiellement concentré dans les 30 premiers centimètres.

5.2.1. Influence des paramètres physico-chimiques sur la spéciation du plomb.

5.2.1.1. Influence du pH.

C'est le facteur qui influence le plus la mobilité et la biodisponibilité du plomb (Swaine, 1986 In Marie Cechi. 2008). Les risques de mobilité sont plus grands dans les milieux acides, alors que la solubilité diminue avec l'élévation du pH. A pH 5, le plomb semble majoritairement adsorbé aux oxydes et aux matières organiques , et une augmentation du pH a pour effet de rendre le plomb moins biodisponible. Zhang (1998) remarque que le

plomb est déplacé de la fraction sulfate $PbSO_4$ vers la pyromorphite sous l'effet du pH et en présence d'apatite. Martinez et Motto (2000) ont montré, dans différents types de sol, que la concentration des métaux dans la phase aqueuse augmentait quand le pH diminuait. Enfin, on peut mentionner le chaulage des boues utilisées en agriculture. Il entraîne une augmentation de pH qui permet de réduire considérablement la mobilité et la biodisponibilité des métaux contenus dans les boues (Doucet et al, 2000).

5.2.1.2 Influence du potentiel redox.

Le potentiel d'oxydoréduction (Eh) exprime le flux d'électrons des agents réducteurs vers les agents oxydants. Il est contrôlé par l'activité des électrons en solution (Sposito, 1983). Bien que le plomb garde globalement le même état d'oxydation dans les milieux naturels, sa mobilité va néanmoins être affectée par des variations de potentiels redox du milieu. Ces variations sont susceptibles de modifier la chimie de la phase aqueuse, pouvant entraîner des phénomènes de précipitation de minéraux contenant du plomb. A l'inverse, ces variations de potentiel redox peuvent entraîner la dissolution de phases porteuses de plomb. Evans (1989) montre qu'une diminution de la teneur en eau ou en matière organique favorise une augmentation du potentiel redox. Ces réactions d'oxydoréduction influencent fortement le devenir des ETM en solution. Observent une augmentation de la solubilité du plomb et du zinc lorsque le potentiel redox diminue. (Chuan et al.; 1996)

5.2.1.3 Influence de la composition minéralogique du sol.

Dans la mesure où la mobilité du plomb est majoritairement contrôlée par des phénomènes d'adsorption ou de précipitation/dissolution, elle va être dépendante de la composition minéralogique du sol, notamment de la teneur en phases adsorbante (matière organique, argile, oxydes...). La teneur en carbonates va également affecter la mobilité du plomb. En effet, dans les sols riches en carbonates, le plomb va pouvoir être piégé par simple adsorption à la surface de la calcite ou par précipitation minérale due aux pH élevés de ce type de sol. (Veeresh et al.; 2003) ont étudié l'adsorption de métaux lourds dont le plomb sur 3 types de sol : acides, neutres et alcalins.

5.2.1.4 Influence des ligands présents dans la phase aqueuse.

La teneur et le type de ligands contenus dans la phase aqueuse sont susceptibles de complexer le plomb, augmentant sa mobilité. Ainsi, la présence de matière organique dissoute va avoir tendance à favoriser la migration du plomb vers les horizons profonds du sol, par la

formation de complexes organo-minéraux, qui entraînent une limitation de l'adsorption du plomb sur les autres constituants du sol (Sterckeman et al, 2000)

5.2.1.5 Influence de la fraction colloïdale.

En milieu naturel, le plomb est fréquemment associé à la fraction colloïdale, qui peut être organique (composés humiques) ou inorganique (oxyhydroxydes métalliques). Cette fraction aura tendance à favoriser la mobilité du plomb et à modifier sa biodisponibilité.

5.2.2. Influence des microorganismes sur la spéciation du plomb.

Les microorganismes peuvent limiter la mobilité des métaux, par des phénomènes d'adsorption à l'interface solide/liquide, les bactéries jouant un rôle de transport des métaux dans la phase liquide. Elles peuvent aussi augmenter le lessivage et la dissolution des métaux en sécrétant des molécules organiques, qui entraînent une acidification du sol (Ernet, 1996). Le champignon *Aspergillus niger* est capable de solubiliser la pyromorphite et de la transformer en oxalate de plomb hydraté (Sayer et al., 1999).

5.2.3 Influence des plantes sur la spéciation du plomb.

Par delà tous les facteurs qui viennent d'être énumérés et qui influencent la mobilité du plomb, la plante joue un rôle aussi prépondérant. Cette thèse étant consacrée aux transferts du plomb dans le système sol-plante, le paragraphe suivant sera entièrement consacré à ces interactions entre le sol et les plantes. La suite de cette revue bibliographique détaillera donc tous ces mécanismes dus à l'activité racinaire. (B. benadda 2002)

6. Le plomb dans la plante

Les plantes peuvent absorber du plomb à partir des racines, mais également à partir des organes aériens, ou bien par l'intermédiaire des deux. Les quantités de métal absorbées par les racines dépendent de la concentration et de la spéciation du métal dans la solution du sol, mais également de ses capacités de migration du sol vers la surface des racines. Ensuite, la quantité de plomb présente dans les divers organes d'une plante dépend du transport de l'extérieur des racines vers l'intérieur, puis de sa translocation des racines vers les feuilles (Patra et al., 2004).

6.1. Notion de phytodisponibilité

La notion de phytodisponibilité découle de la biodisponibilité, qui peut être 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). Lorsque l'organisme vivant est une plante, on parle de phytodisponibilité (Tremel-Schaub et Feix, 2005). Selon Hinsinger et al. (2005), est biodisponible pour une plante, la fraction d'un élément qui est susceptible d'être absorbée par les racines. Pour Kabata- Pendias et Pendias (1992), la phytodisponibilité des éléments traces est fortement corrélée à la concentration d'espèces ioniques dans la solution du sol. Elle est également largement dépendante des propriétés du sol, de l'espèce végétale considérée et de l'élément en question. Toujours selon Hinsinger et al. (2005), la phytodisponibilité dépend des différents paramètres permettant le transfert de la phase solide du sol vers le végétal :

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

6.2. Facteurs influençant la phytodisponibilité du plomb.

-De nombreux facteurs influencent la solubilisation du plomb et son passage dans la solution de sol (Hinsinger, 2001; Lombi et al., 2001; Cecchi, 2008). Ces facteurs sont résumés dans la Figure.

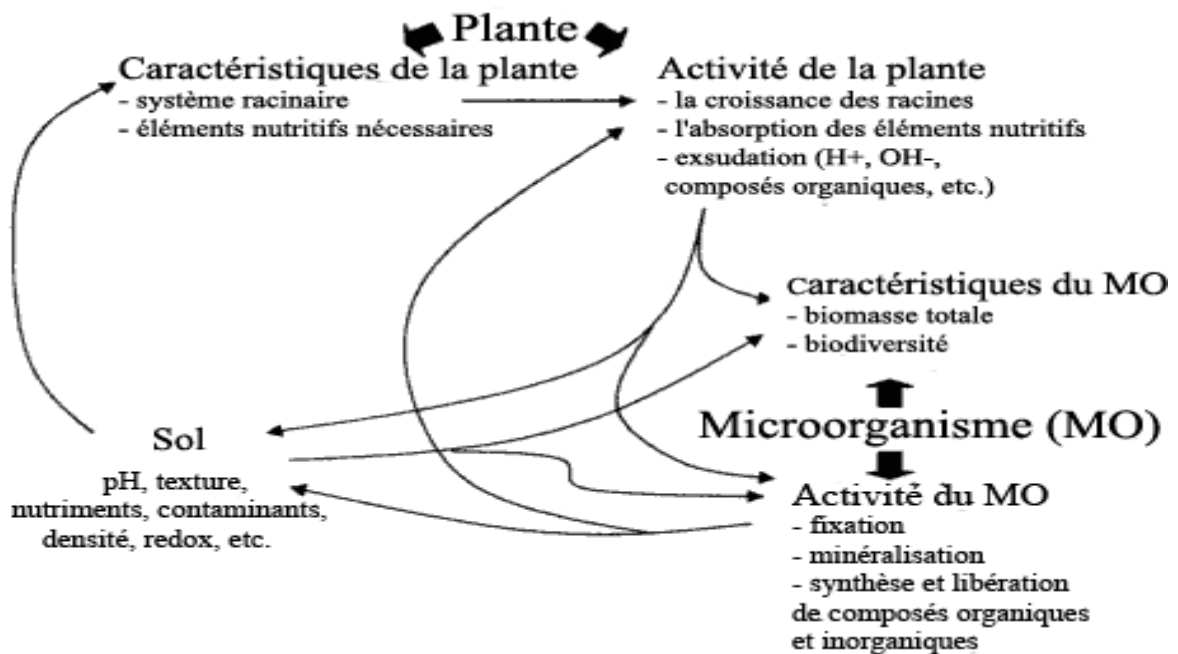


Figure n° 04: Interactions au niveau de la rhizosphère entre le sol, la plante et les microorganismes, influençant la phytodisponibilité (Lombi et al., 2001).

Les facteurs les plus importants dans la phytodisponibilité du plomb sont la teneur en MOS et le pH du sol. En effet, la disponibilité du plomb est fortement corrélée à la teneur en matière organique du sol (McBride et *al.*, 1997 ; Lee et *al.*, 1998,). La fraction minérale n'intervient de façon importante dans la mobilité du métal que lorsque le sol contient peu de matière organique et a une teneur importante en oxydes métalliques (Pulford et *al.*, 1982). De très nombreuses études ont également montré que l'autre paramètre important du sol est le pH. Il influence fortement la spéciation du métal, mais également les interactions entre celui-ci et les différents composants du sol. La mobilité du plomb est plus grande dans les milieux acides, alors que sa solubilité diminue avec l'élévation du pH (Yang et *al.*, 2006).

7. Absorption

7.1. Mécanismes d'absorption du plomb.

Au départ, le Pb^{2+} présent dans la solution du sol se lie aux groupements carboxyle de l'acide uronique composant le mucilage autour des racines (Sharma et Dubey, 2005). Ce mucilage permet donc de restreindre le passage du plomb à l'intérieur des cellules racinaires, et constitue ainsi une protection du système racinaire. Une fois adsorbé à la surface des racines, la voie apoplastique pourrait être une voie importante pour le plomb qui peut être immobilisé par les charges négatives des parois cellulaires (espace libre de Donnan). Il aurait donc tendance à s'accumuler dans l'espace libre, étant fortement lié aux groupements carboxyliques des composés pectocellulosiques des parois. Des études ont montré que le plomb était majoritairement présent dans l'apoplaste et que seule une faible proportion pénétrait dans l'endoderme (Patra et *al.*, 2004).

7.2. Transfert du plomb du sol vers les racines.

La pénétration d'un élément dans une plante peut être évaluée par le facteur de transfert sol/plante ou également appelé facteur de bioconcentration, noté FBC Il représente la possibilité de transfert d'un contaminant du sol vers les plantes, et il est généralement défini comme le ratio entre la concentration dans les plantes et celle dans le sol où ont poussé les plantes, et calculé comme suit (Cui et *al.*, 2004, Zheng et *al.*, 2007) :

$$FBC = \frac{[Pb] \text{ plante}}{[Pb] \text{ substrat de culture}}$$
 avec les concentrations exprimées en $mg.kg^{-1}$ et relatives aux masses sèches du sol et des plantes. Plus la plante absorbe facilement le plomb, plus le facteur de transfert est grand. Ce transfert du sol vers les plantes est fonction:
• de la nature du métal (Zheng et *al.*, 2007),

- de la nature des plantes (de l'espèce ou du cultivar) et également de leur âge (Yoon et *al.*, 2006),
- des caractéristiques des sols telles que le pH, la teneur en matière organique, ou la capacité d'échange cationique (Zheng et *al.*, 2007).

7.3. Translocation du plomb des racines vers les parties aériennes.

Après l'absorption par les racines, la translocation correspond au transfert des éléments traces métalliques vers les parties aériennes. Elle peut varier considérablement en fonction du métal, mais également de l'espèce végétale. Pour être conduits vers les parties aériennes, les éléments prélevés dans le sol par les racines doivent être transportés dans le cortex puis déversés dans les vaisseaux du xylème (par circulation de la sève brute). Ce flux d'ions métalliques dans le xylème nécessite leur chélation à des acides organiques (tels que le citrate) ou à des acides aminés (comme l'histidine) (Briat et Lebrun, 1999). Pour la plupart des espèces, la majorité du plomb absorbé par les plantes réside dans les racines, et seulement une faible proportion est transloquée vers les parties aériennes. Ce transport limité des racines vers les feuilles peut être expliqué par la barrière formée par l'endoderme des racines. Les bandes de Caspary peuvent en effet être un facteur majeur limitant le franchissement de l'endoderme jusqu'au cylindre central (Seregin et *al.*, 2004 ; Sharma et Dubey, 2005).

Pour illustrer ce propos, différents auteurs ont défini un facteur de translocation, qui est calculé comme suit (Marcato CE et *al.*, 2007): **[Pb]parties aériennes / [Pb]racines** Yong JY et al (2006) dans une étude des concentrations en métaux dans des plantes natives sur un site contaminé ont montré que dans 95% des cas, les concentrations en plomb dans les racines étaient beaucoup plus élevées que dans les feuilles, soulignant une faible mobilité du plomb des racines vers les parties aériennes et donc une immobilisation dans les racines.

8. Phytotoxicité du plomb.

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. Tout d'abord le mucilage sécrété au niveau de la coiffe, qui a la capacité de lier le plomb et donc de gêner son adsorption aux parois cellulaires. Mais pour pouvoir pénétrer dans la racine jusqu'au cylindre central, il doit également passer à travers la paroi cellulaire et la membrane plasmique qui possèdent de nombreux sites de fixation pour le plomb. Quand le plomb a réussi à passer à travers ces barrières de protection, 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.

8.1. Effets sur la germination et la croissance

8.1.1. La germination.

A l'échelle macroscopique, le plomb entraîne des effets néfastes sur les plantes. En premier lieu, la germination est fortement inhibée par les ions Pb^{2+} et ce, à de très faibles concentrations (Mishra et Choudhuri, 1998; Wierzbicka et Obidzinska, 1998; Tomulescu et *al.*, 2004). De plus fortes doses conduisent à une inhibition totale de la germination chez les espèces végétales, comme le haricot, dont le tégument de la graine ne limite pas assez la pénétration de ces ions (Wierzbicka et Obidzinska, 1998). Le plomb réduit également fortement le développement de la plantule et des racelles (Mishra et Choudhuri, 1998).

8.1.2.-La croissance

Un traitement à de faibles concentrations en plomb inhibe la croissance des racines et des parties aériennes (Garland et Wilkins, 1981; Mishra et Choudhuri, 1998; Wierzbicka, 1999; Makowski et *al.*, 2002; An, 2006). Cette inhibition est plus importante pour la racine, ce qui peut être corrélé à la plus forte teneur en plomb de cette dernière. Les racines primaires sont également plus sensibles que les racines latérales (Obroucheva et *al.*, 1998).

L'accroissement de biomasse végétale est diminué par de fortes doses de plomb. Toutefois, l'effet des faibles concentrations n'est pas clairement établi et l'inhibition de la croissance observée n'est pas forcément corrélée à une diminution de biomasse (Mishra et Choudhuri, 1998; Kosobrukhov et *al.*, 2004; Xiong et *al.*, 2006; Zheljazkov et *al.*, 2006). Makowski et collaborateurs (2002) ont même montré un accroissement de la biomasse dans

les zones racinaires contenant les plus grandes quantités de plomb, comme l'apex et la zone d'élongation. Cette augmentation de biomasse peut être attribuée à la synthèse de nouveaux composants pariétaux (Wierzbicka, 1998). Au niveau morphologique, une exposition à une faible concentration de plomb conduit au développement de racines plus courtes mais plus compactes. (Jopony et Young, 1994).

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 (Khan et Frankland, 1983 ; Liu et *al.*, 2000). Il faut cependant noter que, même aux plus fortes concentrations rencontrées dans l'environnement (sols miniers, usines de retraitement de batteries), le plomb induit rarement une mort des végétaux (Cobb et *al.*, 2000; Arshad et *al.*, 2008).

8.2. Effets sur les constituants cellulaires.

8.2.1. Effets sur les enveloppes cellulaires.

Comme précédemment évoqué, le plomb peut se fixer, en grandes quantités, sur les composants des parois ou des membranes. Cette fixation conduit notamment à une minéralisation de la paroi (Wierzbicka, 1998). Ce phénomène de minéralisation, défini comme un dépôt d'éléments minéraux au niveau de la paroi (Nultsch et *al.*, 1998), est surtout connu dans le cas de la calcification (dépôt de carbonate ou d'oxalate de calcium) et la silicification (dépôt d'oxydes de silice). La minéralisation pariétale entraîne un changement dans les propriétés physiques et chimiques de la paroi, et en particulier dans sa plasticité. Cette diminution de plasticité affecte de nombreux mécanismes cellulaires comme la division ou l'élongation. Le plomb ne perturbe pas seulement les enveloppes externes en se liant à elles, il va également désorganiser les réseaux de microtubules, même à de faibles doses (Wierzbicka, 1998; Eun et *al.*, 2000). Cette désorganisation a un impact très important, puisque les microtubules jouent un rôle majeur dans de nombreux processus tels que le trafic intracellulaire, la mitose et la morphogenèse, déterminant la polarité de croissance et la forme des cellules. La conséquence de cette interaction entre le plomb et les microtubules est l'apparition de formes cellulaires anormales et d'inégalités dans les épaisseurs de la paroi (Wierzbicka, 1998). De plus, il est intéressant de noter que cet effet sur les microtubules est caractéristique du plomb, et ne s'observe pas avec d'autres métaux comme le cuivre ou l'aluminium qui, pourtant, inhibent la croissance (Eun et *al.*, 2000).

Les membranes lipidiques subissent également les effets néfastes du plomb. Bien que les mécanismes d'action ne soient pas connus, le plomb induit de fortes modifications dans les compositions lipidiques des différentes membranes cellulaires (Stefanov *et al.*, 1992; Stefanov *et al.*, 1993; Stefanov *et al.*, 1995a; Stefanov *et al.*, 1995b). Par ailleurs, le plomb induit indirectement, via la production d'ERO, une peroxydation lipidique (Pang *et al.*, 2002; Reddy *et al.*, 2005; Wang *et al.*, 2007a). Ces modifications des lipides membranaires conduisent à l'apparition de structures cellulaires anormales, avec notamment des altérations au niveau de la membrane cellulaire (Islam *et al.*, 2008).

8.2.2.-Effets sur les protéines.

Comme les autres ETM, le plomb présent dans le cytoplasme interagit avec les protéines. L'action du plomb sur la concentration totale en protéine n'est pas claire, bien que de fortes concentrations puissent diminuer le pool protéique (Saxena *et al.*, 2003; Mishra *et al.*, 2006b). Cette diminution quantitative de la teneur en protéines totales apparaît comme la résultante de plusieurs conséquences de l'action du plomb :

- Modification de l'expression génique (Kovalchuk *et al.*, 2005) et augmentation de l'activité ribonucléasique (Gopal et Rizvi, 2008) ;
- Stimulation de l'activité protéasique (Jana et Choudhuri, 1982) ;
- Diminution de la teneur en acides aminés libres (Xiong *et al.* 2006), corrélée à une forte perturbation du métabolisme de l'azote. Cependant, on constate une augmentation de certains acides aminés comme la proline (Mohan et Hosetti, 1997; Qureshi *et al.*, 2007) qui semble jouer un rôle important dans la tolérance de la plante au plomb (Saradhi et Saradhi, 1991).

8.2.3. Action sur les activités enzymatiques.

Le plomb peut inhiber l'action de certaines enzymes, notamment celles qui possèdent un groupement -SH, ce dernier présentant une forte affinité pour le plomb. Dans la plupart des cas, l'inhibition se fait par interaction du plomb avec ce groupement qui est indispensable pour l'activité et le bon fonctionnement des enzymes. Le plomb affecte donc la conformation de nombreuses enzymes, les empêchant de fonctionner convenablement (Seregin et Ivanov, 2001). Parmi les enzymes fondamentales qui peuvent être inhibées par le plomb, se trouvent des enzymes impliquées dans la biosynthèse de la chlorophylle ou bien la RUBISCO qui permet la fixation du CO₂ (Seregin et Ivanov, 2001 ; Patra *et al.*, 2004). L'inhibition de ce type d'enzyme entraîne une forte perturbation de la photosynthèse. Ceci entraîne une

réduction de la teneur en chlorophylle ainsi que celle de tous les pigments photosynthétiques, et également une croissance réduite des feuilles. Une concentration plus élevée en plomb provoque une substitution de l'atome de magnésium au centre de la molécule de chlorophylle par un atome de plomb, provoquant un arrêt de la photosynthèse (Kupper et *al.*, 1996). La photosynthèse reste de ce fait un des mécanismes les plus affectés par la présence du plomb.

8.2. Effets sur la nutrition minérale.

Le plomb affecte également la nutrition minérale, en perturbant le prélèvement et le transport des nutriments par la plante, tels que Ca, Fe, Mg, Mn, P et Zn en bloquant leur entrée ou en se liant à eux, les rendant indisponibles pour les plantes (Xiong, 1997). Burzynski (1987) a montré que la présence de plomb entraînait une diminution du contenu en potassium dans tous les tissus du concombre, ainsi qu'une diminution du calcium dans les cotylédons et l'hypocotyle, mais aussi du fer dans les racines. Le plomb affecte aussi le métabolisme azoté en diminuant le prélèvement de nitrate et en perturbant le fonctionnement du nitrate réductase (Seregin et Ivanov, 2001).

8.3. Stress hydrique.

Le plomb peut également affecter l'état hydrique de la plante, en provoquant un stress hydrique, notamment par la fermeture des stomates. Cette fermeture des stomates a un impact sur processus dans la cellule, tel que la photosynthèse, en induisant une déficience en CO₂. Le stress hydrique s'exprime également par une réduction de la surface foliaire, ainsi que globalement de tous les organes sièges de la transpiration, afin de limiter les pertes en eau. On observe ensuite un flux transpiratoire diminué, une pression osmotique plus faible ou un potentiel hydrique réduit dans le xylème. Le plomb provoque une perte globale de turgescence et de plasticité, et enfin une réduction globale du contenu en eau de la plante (Parys et *al.*, 1998).

8.4. Photosynthèse.

Chez les plantes, l'exposition au plomb conduit à une forte inhibition de la photosynthèse, du rendement photosynthétique, et à une limitation du taux d'assimilation de CO₂. Le rendement photosynthétique, très sensible, peut chuter de plus de 50 % (Huang et *al.*, 1974; Bazzaz et *al.*, 1975; Poskuta et *al.*, 1987; 1988; Xiong et *al.*, 2006; Hu et *al.*, 2007; Liu et *al.*, 2008; Piotrowska et *al.*, 2009; Sing et *al.*, 2010; Cenkci et *al.*, 2010; Wang et *al.*, 2010). Cette inhibition s'explique par la diminution de la synthèse de chlorophylle, de

plastoquinone (Burzynski, 1987) des teneurs en chlorophylles et en caroténoïdes (Kosobrukhov et al., 2004; Qureshi et al., 2005; Chen et al., 2007; Gopal et Rizvi, 2008 ; Gajić et al., 2009). Toutefois, ces effets varient en fonction des espèces végétales. (in Bouziani. H. 2012)

Le plomb interagit en causant :

- la destruction de l'ultra- structure des chloroplastes (Choudhury et Panda, 2004; Sharma et Dubey, 2005; Elzibietta et Mirosława 2005; Islam et al., 2007),
- diminue l'activité de la ferrédoxine NADP⁺ réductase et δ- aminolevulinate
- déshydratase ou ALAD qui est à la base de la synthèse des chlorophylles et dont l'ion Zn²⁺ est remplacé par Pb²⁺ (Gupta et al., 2009; Gijić et al., 2009; Cenkeci et al., 2010),
- inhibition de la synthèse de la plastoquinone et des caroténoïdes (Kosobrukhov et al., 2004; Chen et al., 2007; Liu et al., 2008; Cenkeci et al., 2010),
- le plomb perturbe en particulier les flux d'électrons de la chaîne de transport d'électrons (Qufei et al., 2009),
- déséquilibre de la concentration de dioxyde de carbone entre l'intérieure et l'extérieur de la cellule à cause de la fermeture des stomates (Romanowska et al., 2002, 2005, 2006),
- déséquilibre de l'approvisionnement des éléments essentiels à la photosynthèse tels que le Mn, Fe et Cu (Chatterjee et al., 2004; Gopal et Rizvi 2008) et la substitution des bivalentes par le plomb (Gupta et al., 2009; Cenkeci et al., 2010),
- certaines enzymes intervenant dans le cycle de Calvin (Mishra et al., 2006; Liu et al., 2008),
- augmente l'activité de la chlorophyllase (Liu et al., 2008)

8.5. Génération de stress oxydant.

Un des effets très importants provoqué par le plomb dans les cellules est la génération de stress oxydant, qui est défini comme un déséquilibre entre les systèmes prooxydants et antioxydants, en faveur des premiers et source d'effets toxiques potentiels (Sies, 1991). Les Espèces Réactives de l'Oxygène (ERO), normalement produites dans les cellules se retrouvent en excès.

Ces espèces réactives de l'oxygène incluent l'anion superoxyde (O₂⁻), le radical hydroxyle (OH[•]) ou encore le peroxyde d'hydrogène. Le stress oxydant entraîne un ralentissement de la croissance végétale, mais également des dommages moléculaires en

interagissant avec des substrats biologiques . Les travaux de Pourrut et al. (2008) démontrent une induction d'espèces réactives de l'oxygène dose dépendante dans des racines de fèves exposées à une solution plombée contenant 1 mg.kg-1 de plomb sous forme $Pb(NO^3)$. La première étape de l'induction de stress oxydatif étant la production de O_2^- . Pour Schützendübel et Polle (2002) le stress oxydant peut être généré par l'inactivation de certaines enzymes, par fixation sur leur groupement $-SH$ ou par déplacement d'ions métalliques essentiels à l'enzyme. Pour combattre ces ERO, les cellules végétales disposent de deux grands types de défense:

-Un système enzymatique, visant à détruire les ERO :

- Les superoxydes dismutases (SOD) qui peuvent éliminer l'anion superoxyde par dismutation, pour former de l'oxygène et de l'eau.
- Les catalases, qui détruisent le peroxyde d'hydrogène, en aboutissant également à la formation d'oxygène et d'eau.
- Les peroxydases, détruisant également le peroxyde d'hydrogène en formant de l'eau.

-Un système non enzymatique, avec des macromolécules capables de piéger ces ERO :

- Le glutathion (GSH) est le plus abondant chez les êtres vivants.
- L'acide ascorbique
- Les tocophérols
- Les caroténoïdes

Lorsque le stress oxydant est trop important, la capacité des enzymes antioxydantes est dépassée, provoquant un excès de radicaux. Cet excès va entraîner des lésions sur les molécules telles que l'ADN, les protéines ou les lipides. A ce moment là, l'apparition des symptômes visibles a lieu, notamment un brunissement des racines, ainsi que des chloroses et des nécroses sur les feuilles, entraînant une perturbation de la croissance pouvant aller jusqu'à la mort de l'organisme.

9. Présentation du model végétal.

9.1. Généralités.

La fève (*Vicia faba L*) originaire du Proche-Orient, est l'un des légumes secs le plus anciennement connu et cultivé (Dean J. 1988). Cette culture date de la fin du néolithique (Dean J. 1987).



Figure n°05: Les différentes parties de la fève *Vicia faba L.* (Thomé 1885)

La fève occupe la cinquième place parmi les légumineuses alimentaires avec une superficie de 3.2 millions d'hectares pour une production de 4.2 millions de tonnes. Elle représente à elle seule 50% de la production mondiale des légumineuses (Collectif. 1999)

-Les principaux pays producteurs de la fève sont : L'Italie, l'Espagne, la Grande-Bretagne, l'Égypte, l'Éthiopie, le Maroc, l'ex-URSS, le Mexique, le Brésil, le Pérou et la Chine.

9.2. Classification et caractères botanique (Description).

La fève (*Vicia faba L*) est une plante herbacée, annuelle de la famille des Papilionacées pouvant dépasser un mètre. Feuilles terminées par une pointe. Folioles larges, de couleur glauque. Inflorescence en racème de deux à cinq fleurs (parfois fleur solitaire).à corolle blanche ou rosée, avec des taches noires sur les ailes. Le fruit est une gousse contenant des graines de forme ovale et aplatie avec une peau épaisse (Baba Aissa 1999). Elle comprend plusieurs espèces qui peuvent être exploitées en vert ou en sec.

-Il existe plusieurs classifications de la fève, dont celle établie par (Baba Aissa 1999) qui distingue quatre variétés :

- *Vicia faba L.* var faba :major
- *Vicia faba L.* .var. equina : fève
- *Vicia faba L.* var. minor : fève
- *Vicia faba L.* var.paucifuga : fève

La classification classique :

- **Règne:** *Plantae.*
- **Sous-règne:** *Tracheobionta.*
- **Division:** *Magnoliophyta.*
- **Classe:** *Magnoliopsida.*
- **Ordre:** *Fabales.*
- **Famille:** *Fabaceae.*
- **Sous-famille:** *Faboideae*
- **Genre:** *Vicia*
- **Espèce:** *faba*



Figure n° 06 . Fève ,*Vicia faba L.*

9.3. Les variétés des fèves.

Originnaire d'Asie (mer Caspienne), ce qui prouve l'ancienneté de la culture de la plante. Il existe plusieurs variétés, qui l'on différencie par la grosseur, la couleur et la qualité des graines. La fève (genre *vicia*) regroupe de nombreuses espèces souvent grimpantes :

- ✓ La fève maraîchère ou grosse fève (*vicia faba* .L. var *faba*)
- ✓ La fève fourragère ou féverolle (*Vicia faba* L . var *minuta* « hot ex Alef » Mansf) .
- ✓ La fève à cheval ou féverolle à grain moyen (*Vicia faba* L . var *equina* Pers).
- ✓ La petite fève présente des gousses qui ne contiennent que trois graines , très bonnes pour la consommation.
- ✓ La fève de Nice produit de très grosses graines.
- ✓ La fève d'Aguadulce, très cultivée dans les jardins, présente des gousses d'une trentaine de centimètres.
- ✓ La fève de Séville a des gousses assez large (03cm) et longues de 15 cm ; elle très hâtive et a un bon rendement.
- ✓ Autres cultivars : Tezierémeraude, trois fois blanches, Red Epicure Primable.

9.4. Exigence agro-écologiques de la fève .

La fève est une plante peu exigeance en sol $\text{pH} \geq 6$, elle préfère la chaleur (Température optimale de croissance autour de 20°C). Dans le sud de la France on la sème en février ; prévoir deux ou trois graines par trou, à trois centimètres de profondeurs au l'une d'entre elles ne germe pas. Un truc simple pour combatte la prolifération de pucerons noirs fréquents sur les tiges des fèves est pulvériser une solution d'eau savonneuse (savon de Marseille) (Aïd in Brahimi et *al.*, 1997).

Dans le Sud-ouest (Tarn), elle est traditionnellement semée à la Toussaint. Elle démarre avant les froids, végète l'hiver tout en développant son réseau racinaire. Au printemps, elle grandit très vite et fleurit dans foulée. Les gousses peuvent alors être récoltées de mi-avril à fin Mai .Les pucerons arrivent alors en fin de culture et ne sont pas trop gênants.

La culture de fève est peu exigeante en termes de qualité de sol, cependant, elle aine les sols frais, profonds, et peu acides .Elle est sensible au compactage et l'excès d'eau de fin. Elle est rustique au froid.(Ezzahiri et *al.*, 2004).

La récolte a lieu environ 03mois après le semis, soit de Juin à Aout pour les semis de fin d’hiver et de printemps, un mois avant pour les semis d’hiver pratiqués dans le Midi. L’idéal est de récolter le matin de la consommation.

9.5. Importance nutritionnelle de la fève.

Les fèves possèdent une haute valeur alimentaire, source importante de protéines (25% de la matière sèche) pour la consommation humaine (tableaux n°3,4, et 5)(Villax, 1963).

Elle est consommée surtout en gousses fraîches, tôt dans la saison, et sous forme de grains secs.

La fève en grains est aussi incorporée dans la composition alimentaire du bétail (Maatouui et al .,1996)

La fabrication glucidique assure un apport calorique intéressant, par ailleurs, les fèves sont riches en acides aminés et surtout en lysine.

En plus de son intérêt alimentaire, la plante possède un pouvoir de fixation de l’azote atmosphérique grâce aux bactéries présence dans le niveau des nodosités portées par le système racinaire. Elle fixe entre 80 et 150Kg d’azote par hectare et par an, dont 5 à10Kg/ha constitue la partie au sol cédée au sol (Aykroyd et al.,1982), ce qui justifie sa position en tête d’assolement biennal ou triennal.

Tableau n°3 : Composition de la fève selon différents stades de maturité (en % de la Matière Sèche) (Villax , 1963)

Stade	Matière Sèche (MS)	Matière Azotée Totale (M.A.T)	Matière Grasse (M.G)	Amidon	Cellulose Brute (C.B)
Vert	20	03	01	09	05
Paille	86	10	01	31	38
Grain	87	25	02	19	08

Tableau n°4 : Composition élémentaire de la graine de fève. (Cubero et Moreno,1982).

A a essentiels (%Protéines)	Amidon (% Sucres)	Glucose (%Sucres)	A. Oléique (% M.G)	A. Linoléique (% M.G)
35	50	05	25	50

Tableau n°5 : Teneur de la fève en minéraux et en Vitamines (Vit) (En mg/100g) (Cubero et Moreno ,1982)

Calcium	Fer	Zinc	Vit. B	Vit. C	Vit. A
115	10	03	08	05	0.3

9.6. Situation phytosanitaire de la fève.

Les principales contraintes de la culture de la fève en Algérie peuvent être résumées ainsi :

- ❖ Contraintes abiotiques : Les plus importantes contraintes abiotiques qui influent sur les fèves sont par ordre d'importance : le froid hivernal, les gelées printanières, la sécheresse terminale, la chaleur et la salinité (Maatougui et al., 1996)
- ❖ Contraintes biotiques : Les principales biotiques qui limitent la culture de la fève sont :

a)-Les virus :

Un grand nombre de la maladie à virus est rencontré sur la fève. Ces virus sont pour la plupart disséminés dans les cultures par les insectes vecteurs (puceron, coléoptères) ou par la semence

En Algérie, il a été mis en évidence par sur les cultures de fèves, l'existence de huit virus dont quatre sont classés les plus importants sont BBMV, BVMV, BLRV, AMV (Ouffroukh et Aggad, 1996 in Lounis et Knaoui, 1998).

b) -Les insectes :

Les Bruches et les Pucerons constituent un autre problème sérieux qui influence directement (par la transmission des virus) la productivité des fèves. Lorsque les infestations sont très sévères (Maatougui, 1996)

c)-L'orobanche :

Orobanche crenata est un problème important, connu mais encore mal maîtrisé (Maatougui, 1996).

d)-Les nématodes :

Parmi les nématodes les plus redoutables sur légumineuses, on distingue *Ditylenchus dipsaci* qui provoque un gonflement du collet et un affaiblissement de la plante (Bouheroua et Achour, 1995)

e)- *Les maladies fongiques :*

Parmi les principaux agents fongiques pouvant provoquer des dégâts, on distingue ceux des taches foliaires pouvant induire une perte de 56% du rendement (Abouzend et al., 1983).

La maladie dite tache chocolaté et l'une des affections fongiques parmi les plus importantes de la fève dans le Tableau suivant :

Tableau n°06 : Les principales maladies de la fève (Abouzend et al .,1983).

<i>Maladies</i>	<i>Agents pathogènes</i>	<i>Symptômes</i>
-Botrytis	-Botrytis fabae -Botrytis cinerea	-Tache de couleur sur feuilles, tige et rarement sur semences. (Mahmoudi, 1971, in Touahrie,1994)
-Anthracnose	-Ascochyta fabae	-Lésions circulaire sur les feuilles, tige, gousses et grains. (Mahmoudi, 1971, in Touahrie, 1994).
-Rouille	-Uromyces fabae	-En cas de forte attaque, le plant de la fève devient chérif. -Les feuilles flétrissent. -Les fleurs et les gousses avortent.
-Milidiou	-Peronospora viciae	-Jaunissement des plantes. -Déformations des tiges et des pétioles. -Apparition d'un feutrage blanchâtre sur la face inférieurs de la feuille. (Tivoli et al ; 1986)
- Flétrissement	-Fusarium oxysporum	-Jaunissement des feuilles. -Flétrissement des plantes. -Brunissement des tissus vasculaires de la racine. (Mahmoudi, 1971, in Touahrie,1994).
-Sclérotiniose	-Sclerotinia sclerotiorum	-Se manifeste au niveau du collet, provoquant le dessèchement des tiges et le Flétrissement brutal des plantes (Tivoli et al ; 1986)
-Pourriture racinaire	-Fusarium solani -Rhizoctonia solani	-Noircissement de la racine , tissus vasculaires intacts ; seule la zone corticale est atteinte. (Mahmoudi, 1971, in Touahrie,1994).

Partie 02

Expérimentale

Matériels & Méthodes

1. Objectifs du travail

Le but de notre travail est d'étudier l'effet de la présence du plomb dans le milieu de culture sur la croissance de la fève (*Vicia faba. L*), et de suivre l'impact résultant de cette contamination sur le comportement physiologique de la plante testée.

L'étude est réalisée sous des conditions non contrôlées afin d'isoler et d'étudier l'unique effet de la présence du plomb dans le substrat de culture sur le fonctionnement physiologique et biochimique de la plante.

2. Site expérimentale

La présente étude a été réalisée au niveau de la serre de l'université de Mostaganem situé à Mazagran à 05 km environ de la ville.



Photo n° 01: La serre expérimentale

3. conduite de l'expérimentation.

3.1. Préparation du substrat.

Le substrat utilisé pour l'expérimentation est constitué de sol prélevé de la ferme expérimentale Mazaghran de l'université de Mostaganem les propriétés de ce sol sont indiquées dans le tableau n°07.

Tableau n°07 : Propriété physico-chimique du substrat utilisé.

Granulométrie (Pipette De Robinson)	
- Argile : $\varnothing < 2\mu\text{m}$	4.91%
- Limon fin : $2\mu\text{m} < \varnothing < 20\mu\text{m}$	9.46%
- Limon Gross : $20\mu\text{m} < \varnothing < 50\mu\text{m}$	6.84%
- Sable fin : $50\mu\text{m} < \varnothing < 200\mu\text{m}$	43.85%
- Sable Gross : $200\mu\text{m} < \varnothing < 2\text{mm}$	34.55%
pH (AFNOR X31-103 Sol/Eau : 2/5)	8.59
Conductivité Electrique ($\mu\text{S} / \text{cm}$) (Iso : 11265 Sol/Eau : 1/10)	162
Matière Organique (%) (Méthode De Walkley)	1.78
U.S.D.A Texture :	Sable Limoneux

Le sol est séché à l'air libre, tamisé puis homogénéisé et enfin transféré dans les pots de culture, les pots en plastique sont de 17 cm de diamètre et de 15 cm de hauteur.

(photo n°03).



Photo n°02 : Prélèvement du substrat (A) tamisage (B) et remplissage des pots (C)



Photo n°03. Préparation des pots de culture.

3.2. Dispositif expérimental.

Les pots remplis de sol sont répartie en sept niveaux de traitement pour les différentes doses retenues, ces niveaux de traitement sont:

- Le niveau un ou le témoin (D_0) représente le lot sans plomb.
- Le niveau deux (D_1) représente la dose de plomb 50 ppm.
- Le niveau trois (D_2) représente la dose de plomb 100 ppm.
- Le niveau quatre (D_3) représente la dose de plomb 200 ppm.
- Le niveau cinq (D_4) représente la dose de plomb 500 ppm.
- Le niveau six (D_5) représente la dose de plomb 1000 ppm.
- Le niveau sept (D_6) représente la dose de plomb 2000 ppm.

Chaque niveau de traitement est composé de quatre pots pour les quatre répétitions (photo n°04).



Photo n°04: Dispositif expérimental.

3.3. Matériels végétal utilisé

Les graines de la fève utilisée dans cette étude sont d'une variété locale appelée Sidi Aïch, ces graines sont soigneusement fournies par le Centre National de Contrôle et de Certification des Semences et Plantes (CNCCSP) station est d'El-Khroub (Constantine).

3.3. Germination

Les graines de *Vicia faba. L* sont triées et désinfectées par un lavage à l'eau de Javel (12 %) afin d'éviter toutes contaminations fongiques possibles, puis rincées à l'eau distillée pour éliminer l'excès de l'eau de javel. Pour faciliter et homogénéiser leur germination, les graines sont placées dans de l'eau distillée. Elles sont ensuite, disposées dans des boîtes en plastiques et mises à germer entre deux couches de papier filtre imbibé continuellement par de

l'eau distillée, les boîtes sont maintenues à l'obscurité et à température ambiante pendant 5 jours. La figure suivante représente la préparation des graines pour la germination :



Photo n°05 : Présentation la germination.

Après la germination, une graine est semée directement dans chaque pot et parfois même deux graines de la fève en prévision. La culture se fait dans la serre, les graines sont semées à une profondeur de 03 cm environ, puis arrosées.



Photo n°06 : Des graines germées.

4. Application du stress métallique.

Le plomb est apporté sous forme de solutions de nitrate $Pb(NO_3)_2$, il est préparé et appliqué le 19/10/2015 avant le repiquage (21/12/2015) des graines (photo n°08). Les doses retenues sont équivalentes respectivement à 50, 100, 200, 500, 1000 et 2000 ppm, appliquées dans chaque pot suivant le traitement concerné.

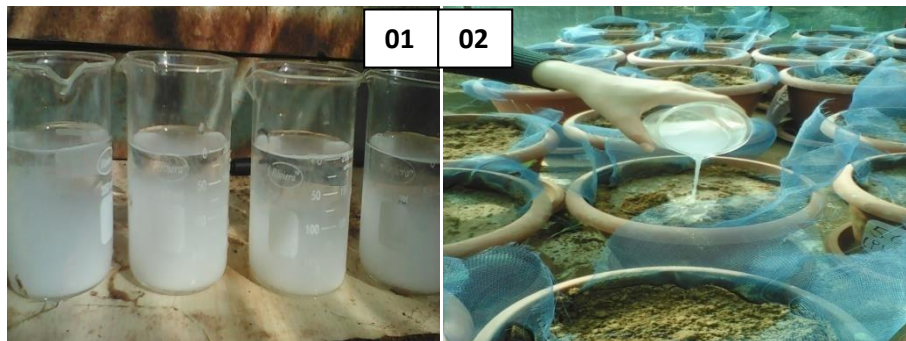


Photo n°07 : Application du stress (01 préparation des concentrations, 02 applications des différentes doses)

-Préparation d'une concentration $Pb(NO_3)_2$ pour la dose 50 ppm

Le poids sec de pot 3.5 Kg rempli du sol

Donc : $50\text{ppm } Pb(NO_3)_2 \times 3.5\text{kg} = 175 \text{ mg /pot}$

Le tableau n°08 montre les différentes quantités à apporter dans chaque pot pour les niveaux de traitement retenus.

Tableau n°08: Concentrations de $Pb(NO_3)_2$ appliquée par pot (en g).

Répétition	Niveau de traitement						
	Témoin (D0) 0 ppm	D1 50ppm	D2 100ppm	D3 200ppm	D4 500ppm	D5 1000ppm	D6 2000ppm
R ₁	0	0.175	0.35	0.7	1.75	3.5	7
R ₂	0	0.175	0.35	0.7	1.75	3.5	7
R ₃	0	0.175	0.35	0.7	1.75	3.5	7
R ₄	0	0.175	0.35	0.7	1.75	3.5	7

5. Eclaircissement.

Au bout d'un mois après l'apparition des feuilles, le nombre des plantules est réduit à raison d'une plantule par pot.

**Photo n°08 :** Présentation l'éclaircissement.

6. L'arrosage.

L'irrigation se fait deux fois par semaine, une fois avec l'eau de robinet et une fois avec le fertilisant. La concentration de la solution fertilisante est de 30g/10l, la composition du fertilisant est donnée par le annexe n°01

7. Analyse effectuées.

7.1. Le contenu relatif en eau (CRE) « foliaire »

Le teneur relative en eau des feuilles renseigne sur la turgescence relative des tissus et figure parmi les indicateurs du stress. Elle est liée à la capacité de la plante à maintenir un niveau d'hydratation optimal qui soit à même de la continuité de l'activité métabolique. Ces résultats ont été confirmés par nombreux travaux et essentiellement ceux de (Clark et al., 1982). Pour déterminer l'état hydrique des plantes expérimentées sous le stress métallique.

Le limbe des feuilles est excisé à sa base et immédiatement pesé (Pi). La partie sectionnée est trempée dans l'eau distillée et placée à l'obscurité, à une température de 4°C pendant 12 heures. Les feuilles sont à nouveau repesées ce qui donne le poids en pleine turgescence (Ppt), enfin la matière sèche est obtenue après l'étuvage à 70°C pendant 48 heures. (in Azzouz 2011) Le contenu relatif en eau est déterminé par la relation de Barrs et Weatherley (1968) suivante :

$$RWC = \frac{P_i - P_s}{P_{pt} - P_s} \times 100$$

7.2. Dosage des pigments chlorophylliens.

Les pigments sont extraits des feuilles après incubation dans l'acétone 80% durant 24H à 4°C dans une chambre noire afin d'éviter l'excitation des chlorophylles. Les concentrations des chlorophylles sont déterminées par spectrométrie UV selon la procédure citée par Lichtenthaler (1987).

Les équations suivantes sont utilisées pour calculer les concentrations des chlorophylles dans les feuilles (en mg/g) (Wang et al., 2010):

- $Chl.a = 12.25 \times A_{663} - 2.79 \times A_{645}$
- $Chl.b = 21.50 \times A_{645} - 5.10 \times A_{663}$
- $Chl.a+b = 7.50 \times A_{663} + 18.71 \times A_{645}$

7.3. Dosage des sucres solubles.

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

Le principe de la réaction est basé sur la condensation des produits de dégradation des oses neutres par l'acide sulfurique, ce dernier, très concentré transforme à chaud les oses en dérivés du furfural qui donnent une coloration bleu vert avec l'anthrone, dosé par colorimétrie à 585 nm. . (In Azzouz .2011)

Le matériel végétal prélevé, 100 mg, sur le tiers médian de la feuille est laissé 24 h dans 5.25 ml d'éthanol à 80%. Un volume de 2 ml est prélevé de cet extrait préalablement dilué 10 fois avec de l'éthanol 80% et additionné de 4 ml de réactif composé de 2 g d'anthrone pur additionné à 1 litre d'acide sulfurique pur sont ajoutés ; le réactif est préparé 4

heures à l'avance. Les tubes sont maintenus dans la glace fondante. Après agitation les tubes sont placés dans un bain - marie à 92°C pendant 8 mn, ensuite le tout est refroidi pendant 30 mn à l'obscurité. L'absorbance est lue au spectrophotomètre UV à une longueur d'onde de 585 nm et la concentration est exprimée en DO. (In Azzouz. 2011).

7.4. Le poids sec.

Le poids sec des parties aériennes et racinaires est déterminé après le passage à l'étuve pendant 48 heures à 80°C à la fin de l'expérimentation.

8. L'analyse statistique.

L'analyse statistique se porte sur l'analyse de variance à un seul facteur en randomisation (le test est significatif quand $p < 0.05$), et sur la comparaison des moyennes par le test de NEWMAN-KEULS. Les différents traitements statistiques des données obtenues sont réalisés par StatBox version 6.40 et vérifiés par Statistica 8, les résultats sont présentés sous forme de moyenne \pm écartype (Mean \pm SD).

Partie 3

Résultats & Discussions

1. Présentation des Résultats

1.1. Pigments Chlorophylle

1.1.1. Chlorophylle A

Les valeurs moyennes des teneurs de la chlorophylle A (tableau n°09) montrent une claire diminution de ce paramètre en fonction de l'intensité de la dose de plomb appliquée dans le substrat. La teneur de la chlorophylle A enregistrée pour le témoin est de l'ordre de 12.07 mg/g cette valeur est la plus importante, au niveau du traitement D_1(50 ppm) on enregistre une diminution de la teneur de ce paramètre qui atteint 9.07 mg/g avec une régression par rapport au témoin de 24.92%, elle atteint pour le niveau de traitement D_5 (1000 ppm) un taux de 81.11% par rapport au témoin pour une teneur de la chlorophylle A de l'ordre de 2.28 mg/g, pour le traitement D_6 (2000 ppm) la teneur de la chlorophylle A est de l'ordre de 2.66 mg/g enregistrant une régression de 77.96%.

L'analyse de la variance (tableau n°10) montre que la variation de la teneur en chlorophylle A est largement conditionnée par les fluctuations et l'intensité du stress de plomb appliqué avec une probabilité $p=0$.

Tableau n°09: L'évolution de la teneur en chlorophylle A en fonction de la concentration en Plomb.

Dose de plomb (ppm)	Teneur en chlorophylle A (mg/g)	Taux d'évolution (%)*
D_0 (0 ppm)	12.07±0.67 ^A	-
D_1 (50 ppm)	9.07±1.96 ^B	-24.92
D_2 (100 ppm)	3.43±1.30 ^C	-71.56
D_3 (200 ppm)	5.49±3.08 ^C	-54.50
D_4 (500 ppm)	3.50±2.97 ^C	-71.01
D_5 (1000 ppm)	2.28±1.09 ^C	-81.11
D_6 (2000 ppm)	2.66±0.80 ^C	-77.96

*: Taux d'évolution par rapport au témoin

A, B et C: Groupes homogènes selon le test NEWMAN-KEULS.

D'après le tableau n°10 on peut classer les valeurs moyennes de la teneur en chlorophylle A selon le test NEWMAN-KEULS (annexe n°02) en trois groupes très distincts, le premier est le groupe homogène A qui regroupe seulement le lot du témoin (0 ppm), le

second groupe c'est le groupe D_1 (50 ppm) puis on trouve le groupe C qui regroupe les niveaux de traitement D_2, D_3, D_4, D_5 et D_6.

Tableau n° 10: Analyse de la variance de la chlorophylle A de la plante *Vicia faba*.L.

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA
VAR.TOTALE	408.841	27	15.142		
VAR.FACTEUR 1	330.458	6	55.076	14.756	0

1.1.2. Chlorophylle B

Les valeurs moyennes (Tableau n°11) montrent que la Chlo B diminue clairement avec l'augmentation des doses de Pb appliquées. La valeur moyenne de la teneur en chlorophylle B enregistrée pour le lot témoin est de 13.98 mg/g, pour la dose D_1 (50ppm) on enregistre une régression de ce paramètre de l'ordre 16.03%, à partir de D_2 (100 ppm) la régression devient plus importante inscrivant ainsi une teneur de la chlorophylle B égale à 2.47 mg/g et une régression de 82.33% par rapport au témoin, pour la dose D_4 on enregistre une régression de 88.29% et une teneur en chlorophylle B de 1.60mg/g.

Tableau n°11: L'évolution de la teneur en chlorophylle B en fonction de la concentration en Plomb.

Dose de plomb (ppm)	Teneur en chlorophylle B (mg/g)	Taux d'évolution (%)*
D_0 (0 ppm)	13.98±0.63 ^A	-
D_1 (50 ppm)	11.74±1.39 ^B	-16.03
D_2 (100 ppm)	2.47±0.9 ^C	-82.33
D_3 (200 ppm)	2.80±0.95 ^C	-80.00
D_4 (500 ppm)	1.55±0.46 ^C	-88.93
D_5 (1000 ppm)	1.60±0.74 ^C	-88.57
D_6 (2000 ppm)	1.84±0.64 ^C	-86.87

*: Taux d'évolution par rapport au témoin

A, B et C: Groupes homogènes selon le test NEWMAN-KEULS.

L'analyse des résultats (tableau n°12) montre que le facteur dose de plomb exerce un effet significatif sur les variations du paramètre mesuré (chlorophylle B).

Tableau n°12 : Analyse de la variance de la chlorophylle B de la plante *Vicia faba*.L.

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA
VAR.TOTALE	718.081	27	26.596		
VAR.FACTEUR 1	697.181	6	116.197	116.751	0

D'après le tableau n°11 on peut classer les valeurs moyennes de la teneur de la chlorophylle B selon le test NEWMAN-KEULS (annexe n°03) en trois groupes très distincts, le premier est le groupe homogène A qui regroupe seulement le lot du témoin (0 ppm), le deuxième groupe c'est le groupe B avec D_1 (50 ppm) puis on trouve le groupe qui regroupe les niveaux de traitement D_2, D_3, D_4, D_5 et D_6.

1.1.3. Chlorophylle A+B

Les résultats moyens de la teneur de la chlorophylle A+B (tableau n°13) montrent qu'une augmentation de la dose de plomb appliquée dans le milieu de culture s'accompagne avec une nette diminution de ce paramètre. Cette diminution est très marquante à partir de la dose D_2 (100 ppm) où on enregistre une régression de l'ordre de 76.85% par rapport au témoin soit 6.03 mg/g contre une régression de 25.1% (19.51 mg/g) pour la dose D_1 (50 ppm) par rapport au témoin qui enregistre une valeur moyenne de 26.05 mg/g. La dose D_5 (1000 ppm) enregistre la plus forte régression (84.96%) par rapport au témoin soit une valeur moyenne de la teneur en chlorophylle A+B égale à 3.92 mg/g, suivie par la dose D_6 (2000 ppm) qui enregistre une régression de l'ordre de 83.67% et une teneur de 4.25 mg/g.

Tableau n°13: L'évolution de la teneur en chlorophylle A+B en fonction de la concentration en Plomb.

Dose de plomb (ppm)	Teneur en chlorophylle A+B (mg/g)	Taux d'évolution (%)*
D_0 (0 ppm)	26.05±1.42 ^A	-
D_1 (50 ppm)	19.51±2.60 ^B	-25.10
D_2 (100 ppm)	6.03±2.69 ^C	-76.85
D_3 (200 ppm)	9.53±3.30 ^C	-63.42
D_4 (500 ppm)	5.66±3.49 ^C	-78.28
D_5 (1000 ppm)	3.92±2.21 ^C	-84.96
D_6 (2000 ppm)	4.25±1.00 ^C	-83.67

*: Taux d'évolution par rapport au témoin

A, B et C: Groupes homogènes selon le test NEWMAN-KEULS.

Les variations de la teneur en chlorophylle A+B enregistrées (tableau n°14) sont très influencées par l'augmentation de la dose de plomb ajoutée avec une probabilité $p=0$. Cet effet significatif permet de classer les moyennes selon le test de NEWMAN-KEULS (annexe n°04) en trois groupes homogènes, le témoin D_0 (0 ppm) en premier groupe A, puis le groupe B qui renferme le deuxième niveau de traitement (50 ppm), et enfin le groupe C qui regroupe les niveaux de traitement D_2, D_3, D_4, D_5 et D_6 (100, 200, 500, 1000 et 2000 ppm).

Tableau n°14: Analyse de la variance de chlorophylle A +B de la plante *Vicia faba.L.*

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA
VAR.TOTALE	2096.322	27	77.642		
VAR.FACTEUR 1	1960.365	6	326.728	50.467	0

D'après la figure n°07 on peut constater que les teneurs de la chlorophylle A diminuent très rapidement avec l'augmentation de la dose de plomb appliquée, cette diminution est de l'ordre de 24.92% pour la dose 50ppm contre seulement 16,03% pour la chlorophylle B pour la même dose (50 ppm). Pour la dose 100 ppm on enregistre une diminution très importante pour la chlorophylle B avec un taux de -82% contre -71% pour la chlorophylle A. A partir de la dose D_4 (500 ppm) les valeurs moyennes enregistrées diminuent fortement et restent inférieures à -71% pour la chlorophylle A et inférieures à -88% pour la chlorophylle B. Pour la chlorophylle A+B, les valeurs moyennes suivent également cette règle avec des taux de régressions de 25% pour D_1 (50 ppm) et des taux de régressions supérieures à 78% à partir de la dose D_4.

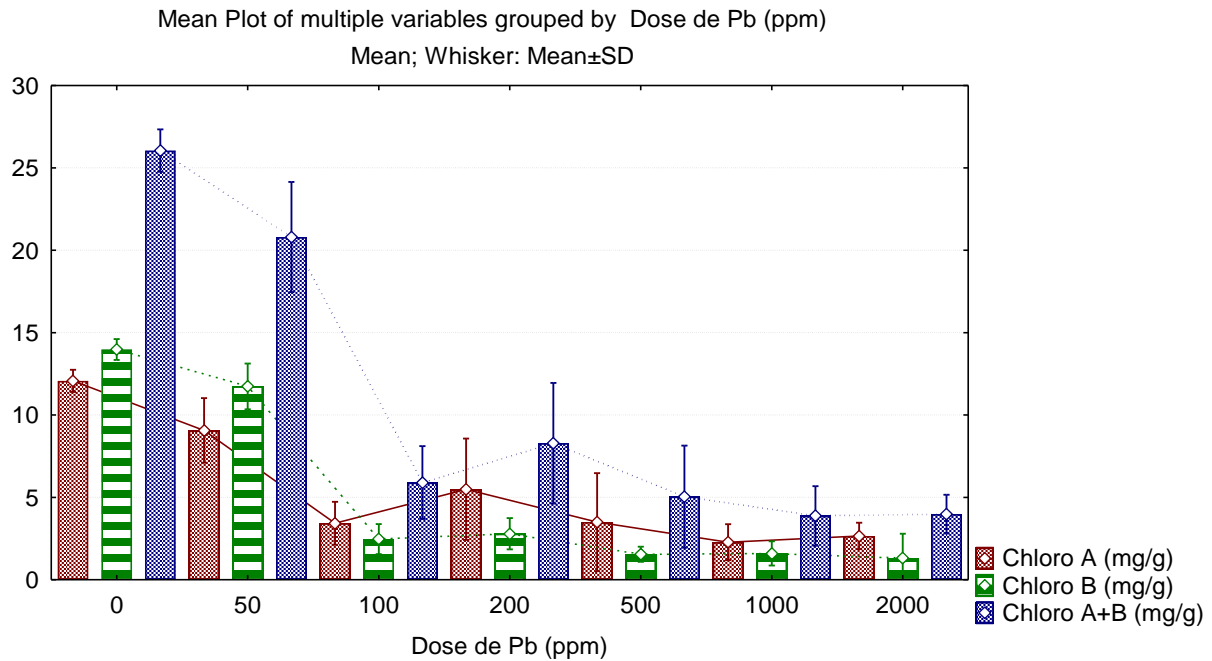


Figure n°07: Evolution des pigments photosynthétiques en fonction de la dose de Pb.

1.2. Teneurs en sucres solubles.

La figure n°08 montre que l'application des doses croissantes de plomb dans le milieu de culture s'accompagne avec une augmentation de la teneur en sucres solubles. Pour le témoin D_0 la valeur moyenne est de 0.11 DO (tableau n°15) , à partir de la dose D_1 (50 ppm) on assiste à une forte progression qui est de l'ordre de 93.49% (0.21 DO..), cette progression atteint pour D_4 172.56% avec une teneur en sucres soluble de l'ordre de 0.29 DO), en fin pour D_6 (2000 ppm) on enregistre une progression de ce paramètre par rapport au témoin de l'ordre de 256.28% (0.38 DO).

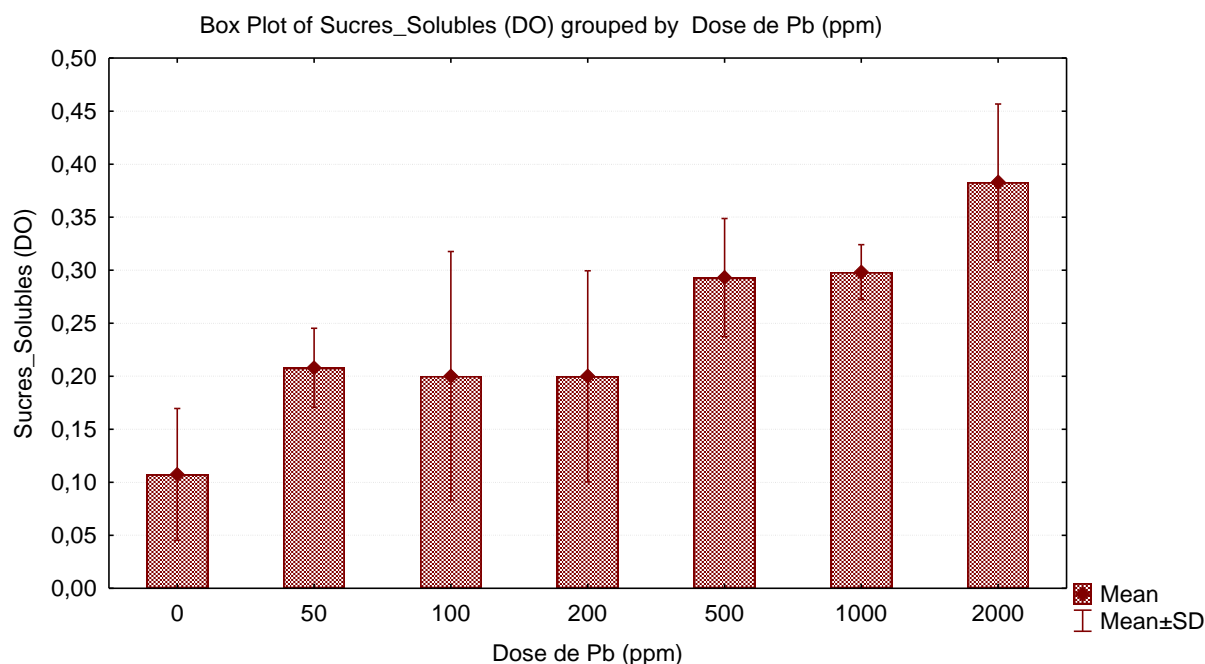


Figure n° 08: Evolution de la teneur en sucres dans les feuilles de *Vicia faba* L en fonction de la dose de Pb.

Les variations de la Teneur en sucre soluble (tableau n°16) permettent de révéler que le facteur étudié (dose de plomb) à un effet significatif sur les fluctuations de ce paramètre avec $p < 0,05$.

Tableau n°16: Analyse de la variance de la teneur en sucres solubles des feuilles de la plante *Vicia faba* L.

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA
VAR.TOTALE	0,308	27	0,011		
VAR.FACTEUR 1	0,194	6	0,032	5,925	0,001

D'après le tableau n° 16, on peut classer les résultats de la teneur en sucres solubles selon le test NEWMAN-KEULS (annexe n°05) en trois groupes très distincts, le premier est le groupe homogène A qui regroupe seulement le lot D_6 (2000 ppm), le deuxième groupe c'est le groupe AB D_5 (1000 ppm) et D_4 (500ppm) en plus le groupe.

Tableau n° 15 : L'évolution de la Teneur en sucres solubles en fonction de la concentration en Plomb.

Dose de plomb (ppm)	Teneur en sucres solubles (DO)	Taux d'évolution (%)*
D_0 (0 ppm)	0.11±0.06 ^C	-
D_1 (50 ppm)	0.21±0.04 ^{BC}	93.49
D_2 (100 ppm)	0.20±0.12 ^{BC}	86.28
D_3 (200 ppm)	0.20±0.10 ^{BC}	86.05
D_4 (500 ppm)	0.29±0.06 ^{AB}	172.56
D_5 (1000 ppm)	0.30±0.03 ^{AB}	177.44
D_6 (2000 ppm)	0.38±0.07 ^A	256.28

*: Taux d'évolution par rapport au témoin

A, AB, BC et C: Groupes homogènes selon le test NEWMAN-KEULS.

1.3. Contenu relatif en eau.

L'observation des moyens obtenus (figure n°09) montre que l'application des doses croissantes de plomb dans le milieu de culture implique une diminution du contenu relatif en eau mais cette diminution reste faible. Pour le témoin le taux enregistré est de 68.76%, pour le traitement D_1 (50 ppm) on enregistre une régression par rapport au témoin de l'ordre de 6.3% soit un CRE de 64.43%, on enregistre pour le traitement D_4 (500 ppm) une moyenne du contenu relatif en eau de l'ordre de 63.85% avec une régression par rapport au témoin de plus de 7%, cette régression atteint son maximum pour le niveau de traitement D_5 (1000 ppm) où on enregistre une régression de l'ordre de 7.37% et une valeur de CRE de 63.70%, le traitement D_3 (200 ppm) enregistre la plus faible régression par rapport au témoin qui est de l'ordre de 0.27% soit une valeur de CRE de 68.57% (tableau n°17).

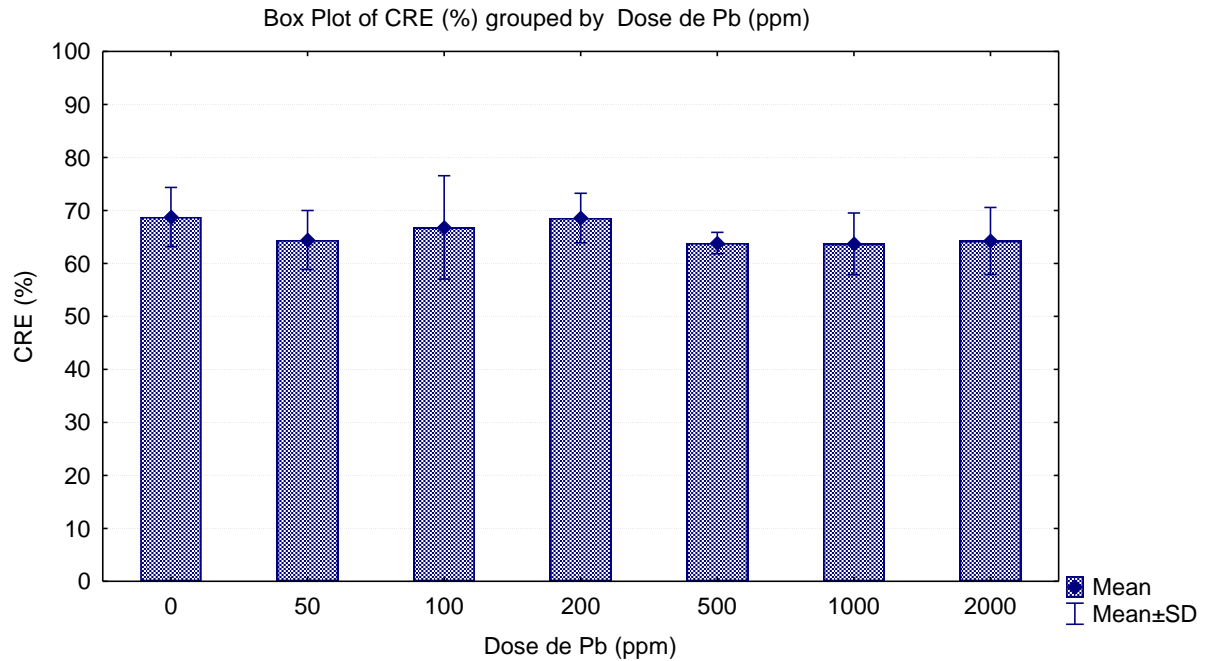


Figure n°08 : Evolution de contenu relatif en eau des feuilles *Vicia faba* L en fonction de la dose de Pb.

Tableau n°17: L'évolution de contenu relatif en eau (CRE) en fonction de la concentration en Plomb.

Dose de plomb (ppm)	CRE (%)	Taux d'évolution (%)*
D_0 (0 ppm)	68.76±5.59	-
D_1 (50 ppm)	64.43±5.58	-6.30
D_2 (100 ppm)	66.81±9.76	-2.85
D_3 (200 ppm)	68.57±4.68	-0.27
D_4 (500 ppm)	63.85±2.02	-7.15
D_5 (1000 ppm)	63.70±5.82	-7.37
D_6 (2000 ppm)	64.24±6.33	-6.58

*: Taux d'évolution par rapport au témoin

Les variations du contenu relatif en eau (tableau n°16) permettent de révéler que le facteur étudié (dose de plomb) à un effet non significatif sur les fluctuations de ce paramètre avec $p > 0,05$.

Tableau n°18: Analyse de la variance de la teneur relative en eau des feuilles de la plante *Vicia faba* L.

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA
VAR.TOTALE	892.675	27	33.062		
VAR.FACTEUR 1	120.148	6	20.025	0.544	0.76994

1.4. Les Poids sec.

1.4.1. Poids sec de la racine.

Les résultats moyens (figure n°09) montrent que le poids sec de la racine varie différemment à travers les doses de plomb appliquées. Pour le témoin D_0 la valeur moyenne est de 1,062g, pour la dose D_1 (50ppm) on enregistre une claire régression par rapport au témoin de l'ordre de 26.08% (0.785 g), pour les autres niveaux de traitement les valeurs moyennes du poids sec de la racine inscrivent une faible régression allant de plus de 1% pour D_3 et D_6 (1.044 g et 1.043 g) à plus de 5% pour D_2 et D_4 qui enregistrent respectivement 1.008 g et 0.994 g. Au niveau du traitement D_5 (1000ppm) le poids sec de la racine inscrit une moyenne de 1.29 g avec une progression de l'ordre 21.56% par rapport au témoin.

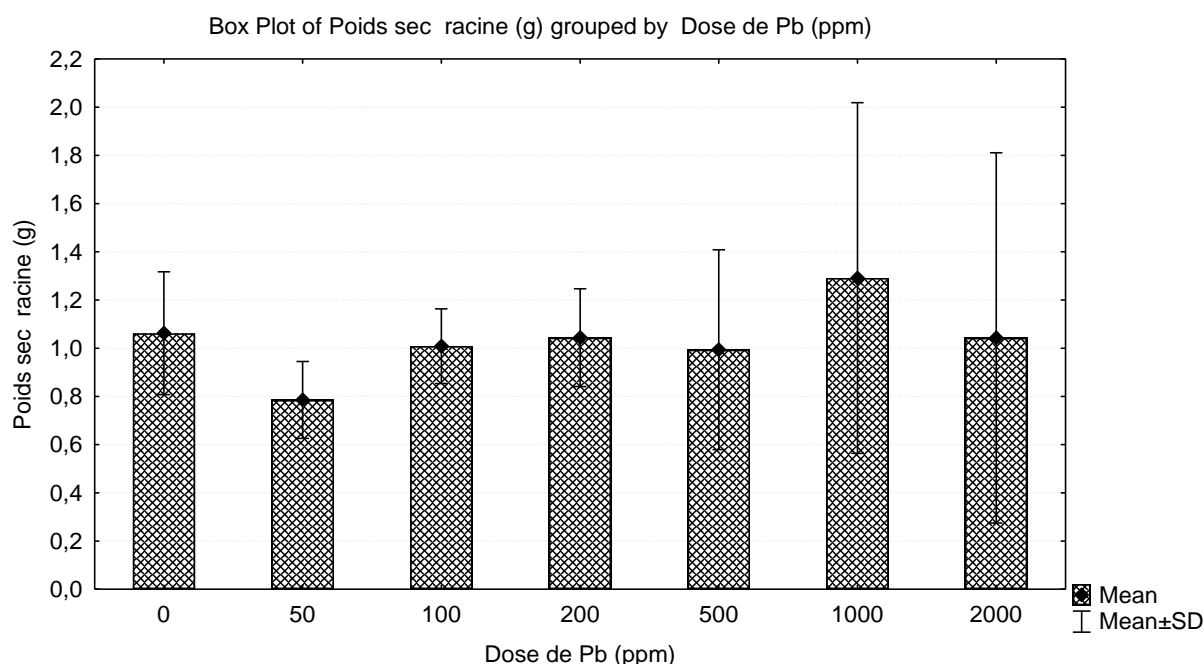


Figure n°10: Evolution du poids sec de la racine de *Vicia faba* L en fonction de la dose de Pb.

Tableau n°19 : L'évolution du poids sec des racines en fonction de la concentration en Plomb.

Dose de plomb (ppm)	Poids sec (g)	Taux d'évolution (%)*
D_0 (0 ppm)	1.062±0.255	-
D_1 (50 ppm)	0.785±0.159	-26.08
D_2 (100 ppm)	1.008±0.155	-5.08
D_3 (200 ppm)	1.044±0.203	-1.69
D_4 (500 ppm)	0.994±0.414	-6.40
D_5 (1000 ppm)	1.291±0.727	21.56
D_6 (2000 ppm)	1.043±0.768	-1.79

*: Taux d'évolution par rapport au témoin

Les variations de la Teneur poids sec de la racine (tableau n°21) permettent de révéler que le facteur étudié (dose de plomb) à un effet non significatif sur les variations de ce paramètre avec $p > 0,05$.

Tableau n°20: Analyse de la variance du poids sec des racines de la plante *Vicia faba* L.

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA
VAR.TOTALE	4.864	27	0.18		
VAR.FACTEUR 1	0.525	6	0.087	0.423	0.85569

1.4.2. Poids sec de la tige.

Les résultats moyens (figure n°10) montrent que le poids sec de la tige varie différemment à travers les doses de plomb appliquées. Pour le témoin D_0 la valeur moyenne enregistrée est de 5.275g, pour le traitement D_1 (50ppm) le poids sec enregistré est de 7.15 g avec une régression de l'ordre 41.23e % par rapport au témoin, pour les lots D_5 et D_6 enregistre des régressions plus de 20% avec des valeurs moyennes du poids sec respectives de 4.175g (D_5) et 4.075g (D_6), le lot D_3 enregistre la plus faible régression (1.42%) avec un valeur moyenne de 5.2g. Au contraire des autres traitement, le lot D_2 (100ppm) inscrit une moyenne du poids sec de l'ordre de 7.15g avec une progression de 35.55 % par rapport au témoin (tableau n°21).

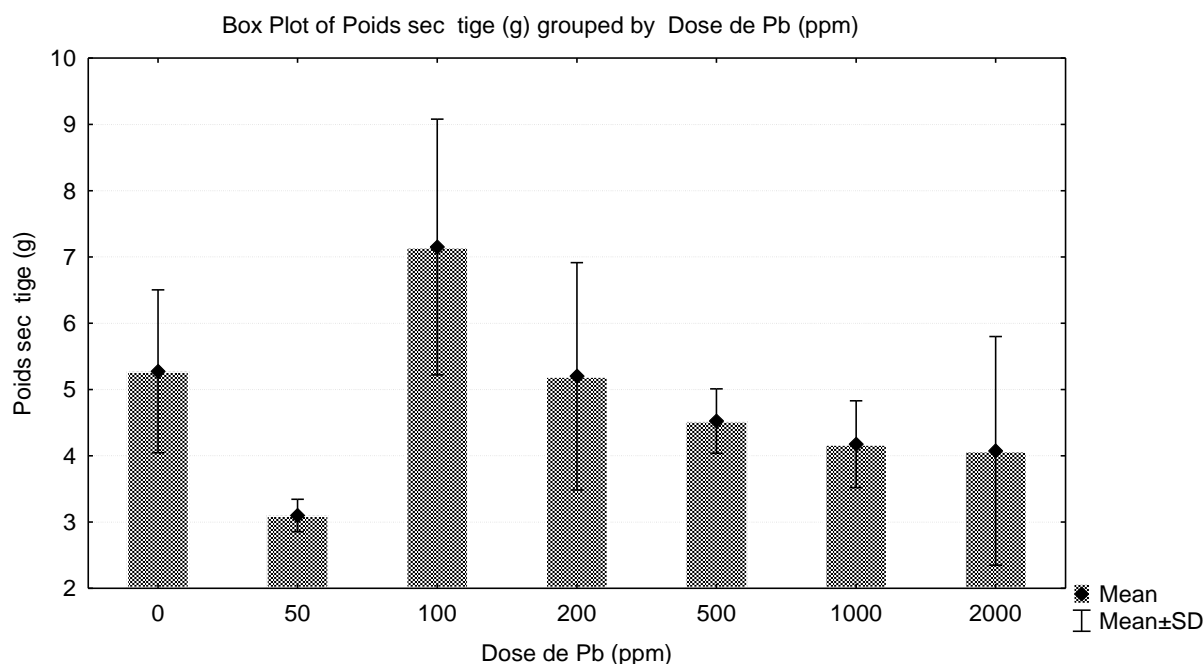


Figure n°10: Evolution du poids sec de la tige de *Vicia faba* L. en fonction de la dose de Pb.

L'analyse de la variance (tableau n°22) montre que la variation de la teneur en de la poids sec de la tige permettent de révéler que le facteur étudié (dose de plomb) à un effet significatif sur les variations de ce paramètre avec $p=0.00965$.

Tableau n°20: Analyse de la variance du poids sec de la tige de la plante *Vicia faba* L.

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA
VAR.TOTALE	74.774	27	2.769		
VAR.FACTEUR 1	39.154	6	6.526	3.847	0.00965

D'après le tableau n°21 on peut classer les valeurs moyennes du taux de la poids sec de la tige selon le test NEWMAN-KEULS (annexe .n°06) en trois groupes très distincts, le premier est le groupe homogène A qui regroupe seulement le lot du témoin (100 ppm), le second groupe B c'est le groupe D_1 (50 ppm), D_3 (200ppm) , D_4 (500ppm), D_5 (1000ppm) et le D_6(2000ppm) puis on trouve le groupe AB qui regroupe les niveaux de traitement D_0(0ppm)et D_3(200ppm).

Tableau n°21: L'évolution du poids sec de la tige en fonction de la concentration en Plomb.

Dose de plomb (ppm)	Poids sec (g)	Taux d'évolution (%)*
D_0 (0 ppm)	5.275±1.228 ^{AB}	-
D_1 (50 ppm)	3.1±0.245 ^B	-41.23
D_2 (100 ppm)	7.15±1.93 ^A	35.55
D_3 (200 ppm)	5.2±1.715 ^{AB}	-1.42
D_4 (500 ppm)	4.525±0.486 ^B	-14.22
D_5 (1000 ppm)	4.175±0.655 ^B	-20.85
D_6 (2000 ppm)	4.075±1.725 ^B	-22.75

*: Taux d'évolution par rapport au témoin

A, B et AB: Groupes homogènes selon le test NEWMAN-KEULS.

2. Discussion Générale

2.1. CRE.

Le plomb limite les pertes en eau de la plante par transpiration. Cette limitation de la transpiration, moteur principale de la circulation de la sève brute et par conséquent d'eau conduit à une diminution de la teneur en eau des plantes (Weryszko-Chmielewska et Chwil, 2005). La diminution de la teneur en eau sous le stress induit par le plomb, semble indiquée une difficulté de l'ajustement de l'état hydriques des plantes suite à la fermeture des stomates (Brunet et *al.*, 2008), se qui réduit leurs rendement, et influe fortement sur divers processus tels que la photosynthèse (Cecchi, 2008).

Des nombreuses études (Barelo et Poschenrieder, 1990 ; Wozny et *al.*, 1995 ; Sayed, 1999) ont relevé une diminution de la transpiration , y compris à faible doses, ainsi qu'une diminution du contenu relatif en eau.

A l'image de ces résultats, l'étude réalisée a dévoilé en clair que le contenu relatif en eau des plantes diminue en fonction de l'intensité du stress par le plomb, cette diminution est plus importante pour les doses supérieures à 500 ppm où on a enregistré des évolutions inférieures à -6,5%, même si le facteur étudié (dose de plomb) à enregistré un effet non significatif sur les fluctuations du contenu relatif en eau dans les feuilles avec $p = 0.76994$.

La teneur en eau relative des feuilles renseigne sur la turgescence relative des tissus et figure parmi les indicateurs du stress. Elle est liée à la capacité de la plante à maintenir un niveau d'hydratation optimal qui soit à même de la continuité de l'activité métabolique. Ces résultats ont été confirmés par nombreux travaux et essentiellement ceux de (Clark et *al.*, 1982).

2.2. Effet du plomb sur les pigments chlorophylliens.

Chez les plantes, l'exposition au plomb conduit à une forte inhibition de la photosynthèse, du rendement photosynthétique, et à une limitation du taux d'assimilation de CO₂. Le rendement photosynthétique, très sensible, peut chuter de plus de 50 % (Poskuta et *al.* 1988).

Les résultats obtenus dans la présente étude ont dévoilé une nette diminution de la teneur en pigments chlorophylliennes, cette diminution reste très dépendante de l'intensité du stress appliqué ($P < 0.05$), ainsi le facteur dose de plomb présente un effet significatif sur la

variation de la teneur des chlorophylles A, B et A+B. Les valeurs de la chlorophylle A et B diminuent considérablement à partir de la dose 100 ppm où on a enregistré de diminution de l'ordre de 82% pour la chlorophylle A et 71% pour la chlorophylle B, ces diminutions sont en accord avec des travaux ultérieurs (Xiong et al 2006; Pourrut 2008; Bouziani et Reguieg Yssaad, 2015). Les travaux de Jiang Wang et *al.*, (2010) (in Bouziane, 2012) montrent que le plomb peut diminuer le taux de la chlorophylle, mais cette diminution reste faible contrairement à la diminution observée en présence de Zn et Cu.

Cette inhibition s'explique par la diminution de la synthèse de chlorophylle, de plastoquinone (Burzynski, 1987) des teneurs en chlorophylles et en caroténoïdes (Kosobrukhov et *al.*, 2004; Qureshi et *al.*, 2005; Chen et *al.*, 2007; Gopal et Rizvi, 2008 ; Gajić et *al.*, 2009).

Dans la plupart des cas, l'inhibition de la photosynthèse se fait par interaction du plomb avec les groupements indisponibles pour l'activité et le bon fonctionnement des enzymes impliquées dans la biosynthèse de la chlorophylle tel que la RUBISCO (Patra et *al.*, 2004). Le plomb affecte donc la conformation des nombreuses, les empêchant de fonctionner convenablement (Seregin et Ivanov, 2001).

2.3. Effet du plomb sur teneur en sucres solubles du *Vicia faba*.

Les sucres solubles totaux contribuent fortement à l'ajustement osmotique chez les plantes en conditions de stress (Ben Hassine et Bouzid, 2008). Ils compromettent indirectement la croissance puisque les glucides ne sont pas directement métabolisables et, d'autre part, parce qu'il est aujourd'hui clairement établi que l'accumulation des sucres solubles totaux peut modifier certains paramètres de la photosynthèse en inhibant l'expression de nombreux gènes impliqués dans l'assimilation du CO₂ (Koch, 1996)

Les principales révélations des résultats présentés montrent que la teneur des sucres solubles est fortement conditionnée par la présence du plomb dans le milieu de culture ($p = 0,001$), cet effet significatif se traduit par une augmentation de la teneur des sucres solubles dans les feuilles en fonction de l'augmentation de la concentration du plomb dans le substrat. La réponse des plants soumis à ce stress se révèle très compromise du fait que l'accumulation se traduit importante à partir de la dose 50 ppm avec des taux d'évolution de plus de +90%. La dose 2000 ppm a enregistré le taux d'évolution le plus important par rapport au témoin de l'ordre de +256%.

Ces résultats sont en générales en accord avec les travaux réalisés par d'autres auteurs (Azouz et *al.*, 2011; Bouziani et Reguieg Yssaad, 2015)

Selon Azouz et *al.*, (2011) la libération des surs solubles peuvent jouer un rôle important dans la protection des chlorophylles et des caroténoïdes contre l'agressivité du stress métallique.

2. 4. Effet du plomb sur le teneur de poids sec.

L'ampleur de la toxicité par le plomb est responsable d'un dysfonctionnement physiologiques qui se traduit par une chute de la production de la biomasse et par conséquent une chute du poids sec (Bouziani, 2012).

Le traitement par le plomb même à de faibles concentrations inhibe la croissance des racines et des parties aériennes (Garland et Wilkins, 1981; Mishra et Choudhuri, 1998; Wierzbicka, 1999a; Makowski et *al.*, 2002; An, 2006). Cette inhibition est plus importante pour la racine, ce qui peut être corrélé à la plus forte teneur en plomb de cette dernière. Les racines primaires sont également plus sensibles que les racines latérales (Obroucheva et *al.*, 1998).

Les résultats présentés dans ce travail ont montrés que le poids sec diminue en présence du plomb dans le milieu, cette diminution atteint 26% pour la dose 50 ppm, mais elle reste faible pour les autres niveaux de traitement. Pour la dose 1000 ppm on signale une augmentation du poids sec due probablement à la synthèse de nouveaux composants pariétaux (Wierzbicka, 1998).

Pour le poids sec de la partie aérienne, il permet de révéler que le facteur étudié (dose de plomb) à un effet significatif sur les variations de ce paramètre avec $p=0.00965$. On enregistrée pour le traitement à 50 ppm (3.1 g) avec un taux d'évolution de l'ordre de -41.23% plus faible valeur du poids sec.

Conclusion

Les résultats présentés dans le cadre de ce travail ont permis de révéler quelques effets de la contamination par le plomb de la géotype locale Sidi Aïch de la fève. L'étude des différents paramètres mesurés sur les plantes soumises au stress imposé par le plomb a montré que ce métal est à la source de notables perturbations dans le fonctionnement général de la plante qui se traduisent par des modifications d'ordre physiologiques et biochimiques.

Le suivi de la réponse des plantes sur le plan physiologique a permis de souligner que la contamination par le plomb induit des perturbations importantes sur l'activité photosynthétique par la réduction de la quantité des pigments chlorophylliens des feuilles des plantes en fonction de l'augmentation de la dose de plomb.

Le suivi de l'évolution de la teneur des sucres solubles présent dans les feuilles des plantes de la variété Sidi Aïch a révélé une accumulation significative de ces sucres, cette accumulation s'avère proportionnelle avec l'intensité du stress imposé.

La production de la biomasse est ralentie par l'intensité du stress, ainsi on a signalé des réductions notables du poids sec de la partie aérienne et racinaire.

Le statut hydrique des plantes représenté dans cette étude par le suivi de l'évolution du contenu relatif en eau est aussi sujet à une diminution significative en fonction de la présence du plomb dans le milieu (plus de 7% à partir de la dose 500 ppm).

En résumé, les observations relevées dans cette étude ont montré que la présence du plomb dans le milieu engendre de multiples perturbations sur le plan général du développement de la plante, ces perturbations sont les résultats des modifications du fonctionnement physiologique et biochimique interne de la plante.

Egalement, les observations tirées de cette étude ont permis également de renforcer l'idée que même à de très fortes doses (2000 ppm) le plomb n'arrive pas à provoquer et/ou occasionner la mort des plantes ou même à engendrer l'apparition des lésions et des nécroses, ce qui n'est pas le cas pour d'autres polluants.

Enfin, en terme de ce travail; il serait envisageable d'entreprendre un ensemble de protocole expérimentaux plus approfondi portant sur les différents volets.

- Utiliser des techniques plus récentes comme la technique de micronoyaux pour mieux évalué la génotoxicité du plomb.
- Utilisation des électrophorèses pour doser les différentes enzymes (Catalase, SOD, Glutathionne).

Références bibliographiques

Références bibliographiques

1. **ADEME (2006)**. "Bilan du recyclage 1996-2005 Partie 1 Synthèse générale et analyse par filière Rapport final."
2. **Adriano D.C. (2001)**. Trace elements in terrestrial environments: Biochemistry, bioavailability and risks of metals. Springer-Verlag, New York..
3. Aebi H (1984). "Catalase in vitro." *Methods in Enzymology* 105: 121-126.
4. **AFNOR (2004)**. T90-327 AN "Evaluation des effets génotoxiques sur végétaux supérieurs: évaluation de la fréquence d'apparition de micronoyaux dans les racines secondaires de *Vicia faba*." AFNOR, Paris: p. 13
5. **Aina R, M Labra, P Fumagalli, C Vannini, M Marsoni, U Cucchi, M Bracale, S Sgorbati and S Citterio (2007)**. "Thiol-peptide level and proteomic changes in response to cadmium toxicity in *Oryza sativa* L. roots." *Environmental and Experimental Botany* 59(3): 381-392.
6. **Alloway BJ (1995)**. "Heavy metals in soils." Blackie Academic & Professional, London, 2nd Edition, 368 pp .
7. **Alscher RG, N Erturk and LS Heath (2002)**. "Role of superoxide dismutases (SODs) in controlling oxidative stress in plants." *Journal of Experimental Botany* 53(372): 1331-1341.
8. **Amicucci E, K Gaschler and JM Ward (1999)**. "NADPH Oxidase Genes from Tomato (*Lycopersicon esculentum*) and Curly-Leaf Pondweed (*Potamogeton crispus*)." *Plant Biology* 1(5): 524-528.
9. **An Y-J (2006)**. "Assessment of comparative toxicities of lead and copper using plant assay." *Chemosphere* 62(8): 1359-1365.
10. **Apel K and H Hirt (2004)**. "Reactive oxygen species: Metabolism, Oxidative Stress, and Signal Transduction." *Annual Review of Plant Biology* 55(1) : 373-399.
11. **Arasimowicz M and J Floryszak-Wieczorek (2007)**. "Nitric oxide as a bioactive signalling molecule in plant stress responses." *Plant Science* 172(5): 876-887.
12. **Arshad M, J Silvestre, E Pinelli, J Kallerhoff, M Kaemmerer, A Tarigo, M Shahid, M Guisresse, P Pradere and C Dumat (2008)**. "A field study of lead phytoextraction by various scented *Pelargonium* cultivars." *Chemosphere* 71(11): 2187-2192.
13. **Aykroyd W R, Doughty J and Walker A., 1982**-Legumes in human nutrition (2nd ed.). FAO. FOOD and nutrition paper N°20, FAO Rome p27
14. **Azzouz Fatima. (2011)**. Effet de l'interaction plomb –salinité sur la réponse physiologie et biochimique d'une halophyte (*Atriplex halimus*) et glyphyte (*Vicia faba*) .Université D'Oran P 30.
15. **Baes CF., Mesmer RE., 1976**. The hydrolisis of cations. John Wiley and Sons, New York.
16. **Barcelo J and C Poschenrieder (1990)**. "Plant water relations as affected by heavy metal stress: A review." *Journal of Plant Nutrition* ; Vol/Issue: 13:1: Pages: 1-37.
17. **Bazzaz FA, RW Carlson and GL Rolfe (1975)**. "Inhibition of Corn and Sunflower Photosynthesis by Lead." *Physiologia Plantarum* 34(4): 326-329.
18. **Bouzianni H (2012)**. Contribution à l'étude de l'effet des métaux lourds (Plomb) sur les caractéristiques biométriques et chimiques de la fève (*Vicia faba* L.) .Université de Mostaganem P29-43.

19. **Bouziani. H, Reguieg Yssaad. H.A; 2015.** Phytotoxicity of Lead on the Physiological Parameters of Two Varieties of Broad Bean (*Vicia faba* L.).
20. **BRGM (2004).** "Guide méthodologique du plomb appliqué à la gestion des sites et des sols pollués. Rapport final, BRGM/RP-52881-FR."
21. **Briat J-F and M Lebrun (1999).** "Plant responses to metal toxicity." *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences - Series III - Sciences de la Vie* 322(1): 43-54.
22. **Burzynski M (1987).** "The Influence of Lead and Cadmium on the Absorption and Distribution of Potassium, Calcium, Magnesium and Iron in Cucumber Seedlings." *Acta Physiologiae Plantarum* 9: 229-238.
23. **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. Page :13-14-15-19-29-30.
24. **Chen J, C Zhu, L-p Li, Z-y Sun and X-b Pan (2007).** "Effects of exogenous salicylic acid on growth and H₂O₂-metabolizing enzymes in rice seedlings under lead stress." *Journal of Environmental Sciences* 19(1): 44-49.
25. **Chuang MC., Shu GY., Liu JC., 1996.** Solubility of heavy metal in a contaminated soil: effects of redox potential and pH. *Water, Air and Soil Pollution* 34: 543-556.
26. **Citepa (2007).** "Inventaire des émissions de polluants en France au titre de la convention sur la pollution atmosphérique transfrontalière à longue distance et de la directive européenne relative aux plafonds d'émissions nationaux (NEC)."
27. **Clemens S (2006).** "Evolution and function of phytochelatin synthases." *Journal of Plant Physiology* 163(3): 319-332.
28. **CobbG, KSands, M Waters, B Wixson and E Dorward-King (2000).**"Accumulation of heavy metals by vegetables grown in mine wastes." *Environmental Toxicology and Chemistry* 19(3): 600–607.
29. **Collectif. 1999.** Les légumineuses alimentaires en Algérie : Situation actue lle et perspectives. Ed. ITGC. Editeurs. M. Malki et A. Hamadache.150 pages.
30. **Cui Y.L., Zhu Y.G., Zhai R.H., Chen.D.Y., Huang Y.Z. and Qui Y. (2004).**Transfer of metals from soil to vegetables in an area near a smelter in Nanning, China. *Environmental Pollution* 2: 181-188.
31. **Dalenbery JW and W Van Driel(1990).** Contribution of atmospheric to heavy-metal concentration in fiel crops "Netherlands journal of agricultural science 38:369-379. *Dubbin of Plant physiology* 19:53-60
32. **Dean J. 1987.** Fababean production. *Field Crops Facts*. Agdex N° 142. 4 pages.
33. **Dey SK, J Dey, S Patra and D Pothal (2007).** "Changes in the antioxidative enzyme activities and lipid peroxidation in wheat seedlings exposed to cadmium and lead stress." *Brazilian Journal of Plant Physiology* 19: 53-60.
34. **Doucet Set al., 2000.** Influence du chaulage sur la biodisponibilité des éléments métalliques en trace incorporés au sol lors de l'épandage de boues. *Etudes et Gestion des Sols* 6 (2) : 105-114.
35. **Drazkiewicz, 1994** "chlorophyll-occurrence, functions of action, effects of internal and lipid perxidation in wheat seedlings exposed to cadmium and lead" *Brazillian Journal of Plant Physiology* 19:53-60.
36. **El Hajjouji H, E Pinelli, M Guiresse, G Merlina, JCRevel and M Hafidi (2007).** "Assessment of the genotoxicity of olive mill waste water (OMWW) with the *Vicia faba* micronucleus test." *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis* 634(1-2): 25-31.
37. **Ernst WHO., 1996.** Bioavailability of heavy metals and decontamination of soils by plants. *Applied Geochemistry* 11: 163-167

38. **Eun SO, H Shik Youn and Y Lee (2000).** "Lead disturbs microtubule organization in the root meristem of *Zea mays*." *Physiologia Plantarum* 110: 357-365.
39. **Evans LJ., 1989.** Chemistry of metal retention by soils. *Environmental Science and Technology* 23: 1046-1056
40. **Fedoroff N (2006).** "Redox Regulatory Mechanisms in Cellular Stress Responses." *Annals of Botany* 98(2): 289-300.
41. **Ferrand E; Dumat C; Leclerc-Cessac E; Benedetti M, 2006.** Phytoavailability of zirconium in relation to its initial added form and soil characteristics. *Plant Soil*; 287: 313-325.
42. **Fleischer M, 1996.** Index of mineral names, discredited minerals and changes of mineralogical nomenclature in volumes 1-50 of the *American Mineralogist*, *American Mineralogist* 51 (8): 1247-1357
43. **Foy CD, RL Chaney and MC White (1978)** the physiology of Metal toxicity in plants "Annual Review of plant physiology 29 (1): 511-566.
44. **Galaris D and A Evangelou (2002).** "The role of oxidative stress in mechanisms of metal-induced carcinogenesis." *Critical Reviews in Oncology/Hematology* 42(1): 93-103.
45. **Garnier L, et al 2006 F Simon-Plas, Oise, P Thuleau, J-P Agnel, J-P Blein, R Ranjeva and J-L Montillet (2006).** "Cadmium affects tobacco cells by a series of three waves of reactive oxygen species that contribute to cytotoxicity." *Plant, Cell and Environment* 29: 1956-1969.
46. **Gopal R and AH Rizvi (2008).** "Excess lead alters growth, metabolism and translocation of certain nutrients in radish." *Chemosphere* 70(9): 1539-1544.
47. **Groppa MD, MP Ianuzzo, ML Tomaro and MP Benavides (2007).** "Polyamine metabolism in sunflower plants under long-term cadmium or copper stress." *Amino Acids* 32: 265-275.
48. **Hall JL (2002).** "Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance." *Journal of Experimental Botany* 53(366): 1-11.
49. **Hinsinger P (2001).** Bioavailability of trace elements as related to root-induced chemical changes in the rhizosphere. *Trace Elements in the Rhizosphere*.
50. G. G.R., W. W.W. and Lombi. Boca Raton, Florida, USA CRC Press LLC: 25-41.
51. **Hinsinger P, A Schneider and JE Dufey (2005).** "Le sol : ressource en nutriments et biodisponibilité." In « Sols et Environnement », Dunod (ed), Paris.: 285-305.
52. **Hu J, G Shi, Q Xu, X Wang, Q Yuan and K Du (2007).** "Effects of Pb²⁺ on the active oxygen-scavenging enzyme activities and ultrastructure in *Potamogeton crispus* leaves." *Russian Journal of Plant Physiology* 54(3): 414-419.
53. **Huang C-Y, FA Bazzaz and LN Vanderhoef (1974).** "The Inhibition of Soybean Metabolism by Cadmium and Lead." *Plant Physiology* 54(1): 122-124.
54. **Huang JW and SD Cunningham (1996).** "Lead phytoextraction: species variation in lead uptake and translocation." *New Phytologist* 134(1): 75-84.
55. **Huang T-L and H-J Huang (2008).** "ROS and CDPK-like kinase-mediated activation of MAP kinase in rice roots exposed to lead." *Chemosphere* 71(7): 1377-1385.
56. **Huynh (2009).** Impacts des métaux lourds sur l'interaction plante / ver de terre / microflore tellurique; Thèse de Doctorat. Université Paris Est 169 p
57. **INSERM (1999)** (Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale). Plomb dans l'environnement : quels risques pour la santé. Paris : INSERM, , p 461
58. **INRS (Institut de Recherche et de Sécurité). Plomb et composés minéraux. Tirés à part des Cahiers de notes documentaires – Hygiène et sécurité du travail, 1er trimestre 1998, n° 170-FT n° 59, 8p.**

59. **Irfan Qureshi M, M Israr, MZ Abdin and M Iqbal (2005).** "Responses of *Artemisia annua* L. to lead and salt-induced oxidative stress." *Environmental and Experimental Botany* 53(2): 185-193.
60. **Islam E, D Liu, T Li, X Yang, X Jin, Q Mahmood, S Tian and J Li (2007)**"Effect of Pb toxicity on leaf growth, physiology and ultrastructure in the two ecotypes of *Elsholtzia argyi*." *Journal of Hazardous Materials* In Press, Corrected Proof.
61. **Islam E, X Yang, T Li, D Liu, X Jin and F Meng (2007).** "Effect of Pb toxicity on root morphology, physiology and ultrastructure in the two ecotypes of *Elsholtzia argyi*." *Journal of Hazardous Materials* 147(3): 806-816.
62. **Jana S and M Choudhuri (1982).** "Senescence in submerged aquatic angiosperms: effects of heavy metals." *New Phytologist* 90(3): 477-484.
63. **Jeannot R., Lemière B., Chiron S., Augustin F. et Darmendrail D. (2001).** Guide méthodologique pour l'analyse des sols pollués, Ed:BRGM p 19. Juste C., 1988. Appréciation de la mobilité et de la biodisponibilité des éléments en traces du sol. *Sci. Sol* 26 (2) 103-112.
64. **Jopony M and SD Young (1994).** "The solid solution equilibria of lead and cadmium in polluted soils." *European Journal of Soil Science* 45(1): 59-70.
65. **Kabata-Pendias A and H Pendias (1992).** "Trace elements in soils and plants." CRC Press, Boca Raton, Florida, 2nd Edition, 209 p.
66. **Kabata-Pendias A. and Pendias H. (2001).**Trace elements in soils and plants. CRC Press London.
67. **Kacabova P and L Natr (1986).** "Effect of lead on growth characteristics and chlorophyll content in barley seedlings." *Photosynthetica* 20(4): 411-417.
68. **Khan D et B Frankland (1983).** "Effects of cadmium and lead on radish plants with particular reference to movement of metals through soil profile and plant." *Plant and Soil* 70(3): 335-345.
69. **.Klessig DF, J Durner, R Noad, DA Navarre, D Wendehenne, D Kumar, JM Zhou, J Shah, S Zhang, P Kachroo, Y Trifa, D Pontier, E Lam and H Silva (2000).** "Nitric oxide and salicylic acid signaling in plant defense." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 97(16): 8849-8855.
70. **Kosobrukhov A, I Knyazeva and V Mudrik (2004).** "Plantago major plants responses to increase content of lead in soil: Growth and photosynthesis." *Plant Growth Regulation* 42: 145-151.
71. **Kovalchuk I, V Titov, B Hohn and O Kovalchuk (2005).** "Transcriptome profiling reveals similarities and differences in plant responses to cadmium and lead." *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis* 570(2): 149-161.
72. **Kraemer SM, S-F Cheah, R Zapf, J Xu, KN Raymond and G Sposito (1999).** "Effect of hydroxamate siderophores on Fe release and Pb(II) adsorption by goethite." *Geochimica et Cosmochimica Acta* 63(19-20): 3003-3008.
73. **Kromer S (1995).** "Respiration During Photosynthesis." *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 46(1): 45-70.
74. **Landberg T and M Greger (2002).** "Differences in oxidative stress in heavy metal resistant and sensitive clones of *Salix viminalis*." *Journal of Plant Physiology* 159(1): 69-75.
75. **Lasat MM (2002).** "Phytoextraction of Toxic Metals: A Review of Biological Mechanisms." *Journal of Environmental Quality* 31(1): 109-120.
76. **Lebeau T, A Braud and K Jezequel** "Performance of bioaugmentation-assisted phytoextraction applied to metal contaminated soils: A review." *Environmental Pollution* In Press, Corrected Proof. Lee KC, BA Cunningham, KH Chung, GM Paulsen and GH

77. **Liu D, W Jiang, C Liu, C Xin and W Hou (2000)**. "Uptake and accumulation of lead by roots, hypocotyls and shoots of Indian mustard [*Brassica juncea*(L.)." *Bioresource Technology* 71(3): 273-277.
78. **Lombi E, W Wenzel, GR Gobran and DC Adriano (2001)**. Dependency of phytoavailability of metals on indigenous and induced rhizosphere processes: a review. Trace elements in the rhizosphere. G. R. Gobran, W. Wenzel and E. Lombi. Boca Raton, Florida, USA CRC Press LCC: 3-24.
79. **Loues JP (2002)**. Mise au point de biotests sur les plantes pour mettre en évidence un effet toxique ou agronomique de substances exogènes (Zinc, Plomb, Substances Humiques). ENSAT. Rapport DEA.
80. **Loue A., (1993)**. Oligoelements en agriculture. Editions Nathan, 577 p.
81. **Marschner H, (1995)**. Mineral nutrition of higher plants. Academic Presse, London, 2nd Edition, 889 p.
82. **Lukaszek M and J Poskuta (1998)**. "Development of photosynthetic apparatus and respiration in pea seedlings during greening as influenced by toxic concentration of lead." *Acta Physiologiae Plantarum* 20(1): 35-40.
83. **Marcato CE (2007)**. "Origine, devenir et impact du cuivre et du zinc des lisiers porcins. Rôle de la digestion anaérobie." Thèse de doctorat, INP de Toulouse. Cecchi, 2008. .
84. **Mc Bride M, S Sauve and W Hendershot (1997)**. "Solubility control of Cu, Zn, Cd and Pb in contaminated soils." *European Journal of Soil Science* 48(2): 337-346.
85. **Mika A, F Minibayeva, R Beckett and S Lüthje (2004)**. "Possible functions of extracellular peroxidases in stress-induced generation and detoxification of active oxygen species." *Phytochemistry Reviews* 3(1): 173-193. .
86. **Mishra S, S Srivastava, RD Tripathi, R Govindarajan, SV Kuriakose and MNV Prasad (2006a)**. "Phytochelatin synthesis and response of antioxidants during cadmium stress in *Bacopa monnieri* L[lozenge]." *Plant Physiology and Biochemistry* 44(1): 25-37.
87. **Mishra S, S Srivastava, RD Tripathi, R Kumar, CS Seth and DK Gupta (2006b)**. "Lead detoxification by coontail (*Ceratophyllum demersum*L.) involves induction of phytochelatins and antioxidant system in response to its accumulation." *Chemosphere* 65(6): 1027-1039.
88. **Moon G, B Clough, C Peterson and W Allaway (1986)**. "Apoplastic and Symplastic Pathways in *Avicennia marina*(Forsk.) Vierh. Roots Revealed by Fluorescent Tracer Dyes." *Australian Journal of Plant Physiology* 13: 637-648.
89. **Moran JF, EK James, MC Rubio, G Sarath, RV Klucas and M Becana (2003)**. "Functional Characterization and Expression of a Cytosolic Iron-Superoxide Dismutase from Cowpea Root Nodules." *Plant Physiology* 133(2): 773-782.
90. **Morelli E and G Scarano (2001)**. "Synthesis and stability of phytochelatins induced by cadmium and lead in the marine diatom *Phaeodactylum tricorutum*." *Marine Environmental Research* 52(4): 383-395.
91. **Nriagu JO; 1978**. Phosphate minerals Springer-Verlag, New-York
92. **Obroucheva NV, EI Bystrova, VB Ivanov, OV Antipova and IV Seregin (1998)**. "Root growth responses to lead in young maize seedlings." *Plant and Soil* 200: 55-61.
93. **Olmos E, JR Martinez-Solano, A Piqueras and E Hellin (2003)**. "Early steps in the oxidative burst induced by cadmium in cultured tobacco cells (BY-2 line)." *Journal of Experimental Botany* 54(381): 291-301.
94. **Otte ML, J Rozema, L Koster, MS Haarsma and RA Broekman (1987)**. The iron-plaque on the roots of saltmarsh plants: A barrier to heavy metal uptake? International Conference Heavy Metals in the Environment, New Orleans (USA). CEP Consultants, Edinburgh

95. **Pais I and J Benton Jones (2000)**. "The handbook of Trace Elements". Boca Raton, FL, St. Lucie Press 223 p.
96. **Paivoke AEA (2002)**. "Soil lead alters phytase activity and mineral nutrient balance of *Pisum sativum*." *Environmental and Experimental Botany* 48(1): 6173.
97. **Pascal, P. (1963)**. *Nouveau traité de chimie minérale. Tome V (Zn, Mercure, Cadmium)*. Paris : Masson et Cie Editeurs.
98. **Patra M ; Bhowmick N ; Bandopadhyay B ; Sharma A, (2004)**. Comparison of mercury, lead and arsenic with respect to genotoxic effects on plant systems and the development of genetic tolerance. *Environmental and Experimental Botany*, 52: 199-223.
99. **Pourrut B, (2008)**. Implication du stress oxydatif dans la toxicité du plomb sur une plante modèle, *Vicia faba*. Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, 284p
100. **Quartacci MF, E Cosi and F Navari-Izzo (2001)**. "Lipids and NADPH-dependent superoxide production in plasma membrane vesicles from roots of wheat grown under copper deficiency or excess." *Journal of Experimental Botany* 52(354):77-84.
101. **Qureshi M, M Abidin, S Qadir and M Iqbal (2007)**. "Lead-induced oxidative stress and metabolic alterations in *Cassia angustifolia* Vahl." *Biologia Plantarum* 51(1): 121-128.
102. **Ralph PJ and MD Burchett (1998)**. "Photosynthetic response of *Halophila ovalis* to heavy metal stress." *Environmental Pollution* 103(1): 91-101.
103. **Reddy AM, SG Kumar, G Jyothsnakumari, S Thimmanaik and C Sudhakar (2005)**. "Lead induced changes in antioxidant metabolism of horsegram (*Macrotyloma uniflorum* Lam.) Verdc.) and bengalgram (*Cicer arietinum* L.)." *Chemosphere* 60(1): 97-104.
104. **Romanowska E (2002)**. Gas exchange functions in metal stressed plants. *Physiology and Biochemistry of metal toxicity and tolerance in plants*. M. Prasad and K. Strzrlka. Dordrecht, The Netherlands, Kluwer Academic Publishers: 257-285.
105. **Romero-Puertas MC, I McCarthy, LM Sandalio, JM Palma, FJ Corpas, M mez, R del and LA (1999)**. "Cadmium toxicity and oxidative metabolism of pea leaf peroxisomes." *Free Radical Research* 31: 25-31.
106. **Romero-Puertas MC, M Rodriguez-Serrano, FJ Corpas, M Gomez, LA Del Rio and LM Sandalio (2004)**. "Cadmium-induced subcellular accumulation of O₂·- and H₂O₂ in pea leaves." *Plant, Cell and Environment* 27(9): 1122-1134.
107. **Ross SM (1994)**. "Retention, transformation and mobility of toxic metals in soils. " In: *Toxic metals in soil-plant systems*. S. M. R. editor: 63-152.
108. **Ruley A, NC Sharma and SV Sahi (2004a)**. "Antioxidant defense in a lead accumulating plant, *Sesbania drummondii*." *Plant Physiology and Biochemistry* 42(11): 899-906.
109. **Saradhi AP and PP Saradhi (1991)**. "Proline accumulation under heavy metal stress." *Journal of Plant Physiology* 138(5): 554-558.
110. **Saxena A, DK Saxena and HS Srivastava (2003)**. "The Influence of Glutathione on Physiological Effects of Lead and its Accumulation in Moss *Sphagnum Squarrosum* ." *Water, Air, & Soil Pollution* 143(1): 351-361.
111. **Seregin IV, VM Pekhov and VB Ivanov (2002)**. "Plasmolysis as a Tool to Reveal Lead Localization in the Apoplast of Root Cells." *Russian Journal of Plant Physiology* 49(2): 283-285.
112. **Schutzendubel A and A Polle (2002)**. "Plant responses to abiotic stresses: heavy metal-induced oxidative stress and protection by mycorrhization." *Journal of Experimental Botany* 53(372): 1351-1365.

115. **Seregin IV, LK Shpigun and VB Ivanov (2004).** "Distribution and Toxic Effects of Cadmium and Lead on Maize Roots." *Russian Journal of Plant Physiology* 51(4): 525-533.
116. **Sharma P and RS Dubey (2005).** "Lead toxicity in plants." *Brazilian Journal of Plant Physiology* 17: 35-52.
117. **Shim I-S, Y Momose, A Yamamoto, D-W Kim and K Usui (2003).** "Inhibition of catalase activity by oxidative stress and its relationship to salicylic acid accumulation in plants." *Plant Growth Regulation* 39(3): 285-292.
118. **Simonovicova M, B Bocova, J Huttova, I Mistrík and L Tamas (2005).** "Effect of cadmium on oxalate oxidase activity in barley roots." *Biologia Plantarum* 60(4): 463-466.
119. **Simonovicova M, J Huttova, I Mistrík, iacute, B Sir oka and L Tamas (2004a).** "Peroxidase mediated hydrogen peroxide production in barley roots grown under stress conditions." *Plant Growth Regulation* 44: 267-275.
120. **Simonovicova M, L Tamás, J Huttová and I Mistrík (2004b).** "Effect of Aluminium on Oxidative Stress Related Enzymes Activities in Barley Roots." *Biologia Plantarum* 48(2): 261-266.
121. **Singh RP, RD Tripathi, SK Sinha, R Maheshwari and H S Srivastava (1997).** "Response of higher plants to lead contaminated environment." *Chemosphere* 34(11): 2467-2493.
122. **Skinner RH and JW Radin (1994).** "The effect of phosphorus nutrition on water flow through the apoplastic bypass in cotton roots." *Journal of Experimental Botany* 45(4): 423-428.
123. **Sposito G, LJ Lund and AC Chang (1982).** "Trace Metal Chemistry in Arid-zone Field Soils Amended with Sewage Sludge: I. Fractionation of Ni, Cu, Zn, Cd, and Pb in Solid Phases." *Soil Science Society American Journal* 46(2): 260-264.
124. **Sposito G., Prost R., Gaultier JP., (1983).** Infrared spectroscopic study of adsorbed water on reduced-charge Na/Li montmorillonites. *Clays and clay minerals* 31: 9-16
125. **Stefanov K, I Popova, E Kamburova, T Pancheva, G Kimenov, L Kuleva and S Popov (1993).** "Lipid and sterol changes in *Zea mays* caused by lead ions." *Phytochemistry* 33(1): 47-51.
126. **Stefanov K, I Popova, B Nikolova-Damyanova, G Kimenov and S Popov (1992).** "Lipid and sterol changes in *Phaseolus vulgaris* caused by lead ions." *Phytochemistry* 31(11): 3745-3748.
127. **Stefanov K, K Seizova, S Pandev, N Yanishlieva, E Marinova, L Tyankova, L Kuleva and S Popov (1995a).** "Effect of lead ions on lipids and antioxidant complex activity of *Capsicum annum* L leaves, pericarp and seeds." *Journal of the Science of Food and Agriculture* 67(2): 259-266.
128. **Stefanov K, K Seizova, I Popova, V Petkov, G Kimenov and S Popov (1995b).** "Effect of lead ions on the phospholipid composition in leaves of *Zea mays* and *Phaseolus vulgaris* ." *Journal of Plant Physiology* 147(2): 243-246.
129. **Stefanov KL, SD Pandev, KA Seizova, LA Tyankova and SS Popov (1995c).** "Effect of lead on the lipid metabolism in spinach leaves and thylakoid membranes ." *Biologia Plantarum* 37(2): 251-256.
130. **Stiborova M, M Doubravova, A Brezinova and F A. (1986).** "Effect of heavy metal ions on growth and biochemical characteristics of photosynthesis of barley (*Hordeum vulgare* L.)." *Photosynthetica* 20(4): 418-425.
131. **Sayed SA,(1999).** Effects of lead and kinetin on the growth, and some physiological components of safflower. *Plant Growth Regulation* 29(3): 167-174.

134. **Swaine DJ.,(1986).** Lead. In DC Adriano (éd), Trace elements in the terrestrial environment. Springer Verlag, New York.
135. **Tamás L, J Huttová, I Mistrík and M Ollé (2006).** "Cadmium-induced microsomal membrane-bound peroxidases mediated hydrogen peroxide production in barley roots." *Acta Physiologiae Plantarum* 28(5): 453-457.
136. **Tao S, WX Liu, YJ Chen, J Cao, BG Li, FL Xu, PM Huang and GR Gobran (2005).** Fractionation and bioavailability of copper, cadmium and lead in rhizosphere soil. *Biogeochemistry of Trace Elements in the Rhizosphere*. Amsterdam, Elsevier: 313-336.
137. **Tatar E, VG Mihucz, A Varga, G Zaray and E Cseh (1999).** "Effect of lead, nickel and vanadium contamination on organic acid transport in xylem sap of cucumber." *Journal of Inorganic Biochemistry* 75(3): 219-223.
138. **E, VG Mihucz, A Varga, G Zaray and F Fodor (1998).** "Determination of Organic Acids in Xylem Sap of Cucumber: Effect of Lead Contamination ." *Microchemical Journal* 58(3): 306-314.
139. **Tomulescu I, E Radovicu, V Merca and A Tuduce (2004).** "Effect of Copper, Zinc and Lead and Their Combinations on the Germination Capacity of Two Cereals." *Journal of agricultural sciences* 15: 39-42.
140. **Tremel-Schaub A et Feix I, 2005.** Contamination des sols Transferts des sols vers les plantes. EDP Sciences, ADEME Éditions, p 413.
141. **Tung G and PJ Temple (1996a).** "Histochemical detection of lead in plant tissues." *Environmental Toxicology and Chemistry* 15(6): 906-914.
142. **Tung G and PJ Temple (1996b).** "Uptake and localization of lead in corn (*Zea mays* L.) seedlings, a study by histochemical and electron microscopy." *Science of The Total Environment* 188(2- 3): 71-85.
143. **Ueno D,T Iwashita, F-J Zhao and JF Ma (2008).** "Characterization of Cd Translocation and Xiong Z,F Zhao and M Li (2006) "Lead toxicity in *Brassica pekinensis* Rupr . / Effet on nitrate assimilation and growth" *Environmental toxicologie* 21(2):147-153
144. **Vassil AD, Y Kapulnik, I Raskin and DE Salt (1998).** "The Role of EDTA in Lead Transport and Accumulation by Indian Mustard." *Plant Physiology* 117(2): 447-453.
145. **Veeresh H., Tripathy S., Chaudhuri D., Hart BR., (2003).** Sorption and distribution of adsorbed metals in three soils of India. *Applied Geochemistry* 18 (11): 1723-1731
146. **Verma S and RS Dubey (2003).**"Lead toxicity induces lipid peroxidation and alters the activities of antioxidant enzymes in growing rice plants" *Plant Science* 164(4): 645-655.
147. **Vodnik D, G Jentschke, E Fritz, N Gogala and DL God bold (1999).** "Root-applied cytokinin reduces lead uptake and affects its distribution in norway spruce seedlings." *Physiologia Plantarum* 106(1): 75-81.
148. **Wang C, X Wang, Y Tian, H Yu, X Gu, W Du and H Zhou (2007a).** "Oxidative stress, defence response and early biomarkers for lead-contaminated soil in *Vicia faba* seedlings." *Environmental Toxicology and Chemistry*: 1.
149. **Wang H, X Shan, T Liu, Y Xie, B Wen, S Zhang, F Han and M Genuchten (2007b).** "Organic acids enhance the uptake of lead by wheat roots." *Planta* 225: 1483-1494.
150. **Weryszko-Chmielewska E and M Chwil (2005).** "Lead-Induced Histological and Ultrastructural Changes in the Leaves of Soybean (*Glycine max* (L.) Merr.)." *Soil Science and Plant Nutrition* 51(2): 203-212.
151. **Wierzbicka M and J Obidzinska (1998).** "The effect of lead on seed imbibition and germination in different plant species." *Plant Science* 137(2): 155 -171.

152. **Wierzbicka M (1987)**. "Lead translocation and localization in *Allium cepa* roots." *Canadian Journal of Botany* 65(9): 1851-1860.
153. **Wierzbicka M (1998)**. "Lead in the apoplast of *Allium cepa* L. root tips--ultrastructural studies." *Plant Science* 133(1): 105-119.
154. **Wierzbicka M (1999a)**. "Comparison of lead tolerance in *Allium cepa*
155. with other plant species." *Environmental Pollution* 104(1): 41-52.
156. **Wozny A, J Schneider and EA Gwozdz (1995)**. "The effects of lead and kinetin on greening barley leaves." *Biologia Plantarum* 37(4): 541-552.
157. **Wu Z, Z Gu, X Wang, L Evans and H Guo (2003)**. "Effects of organic acids on adsorption of lead onto montmorillonite, goethite and humic acid." *Environmental Pollution* 121(3): 469-475.
158. **Xiong Z, F Zhao and M Li (2006)**. "Lead toxicity in *Brassica pekinensis* Rupr.: Effect on nitrate assimilation and growth." *Environmental Toxicology* 21(2): 147-153.
159. **Yang JY, XE Yang, ZL He, TQ Li, JL Shentu and PJ Stoffella (2006a)**. "Effects of pH, organic acids, and inorganic ions on lead desorption from soils." *Environmental Pollution* 143(1): 9-15.
160. **Ye Z, AJM Baker, M-H Wong and AJ Willis (1998)**. "Zinc, lead and cadmium accumulation and tolerance in *Typha latifolia* as affected by iron plaque on the root surface." *Aquatic Botany* 61(1): 55-67.
161. **Yeo AR, ME Yeo and TJ Flowers (1987)**. "The Contribution of an Apoplastic Pathway to Sodium Uptake by Rice Roots in Saline Conditions." *Journal of Experimental Botany* 38(7): 1141- 1153.
162. **Zhang PC., Ryan JA., 1998**. Formation of pyromorphite in hydroxyapatite suspension under varying pH concentration. *Environmental Science and Technology* 32: 3318-3324
163. **Zheljazkov VD, LE Craker and B Xing (2006)**. "Effects of Cd, Pb, and Cu on growth and essential oil contents in dill, peppermint, and basil." *Environmental and Experimental Botany* 58(1-3): 9- 16.
164. **Zheng N; Wang Q; Zheng D, (2007)**. Health risk of Hg, Pb, Cd, Zn and Cu to the inhabitants around Huludao Zinc Plant in China via consumption of vegetables. *The Science of the Total Environment* 383(1-3): 81-89

Annexes

Annexe n° 1 : Composition chimique de la solution nutritive.

Elément chimique	Quantité
N	20%
P ₂ O ₅	20%
K ₂ O	20%
S	0.8%
MgO	0.4%
Fe EDTA	650 ppm
Mn	650 ppm
Mo	50 ppm
SO ₃	0.8%
Cu	60 ppm
Zn	300 ppm
Bore (B)	300 ppm

Annexe n°2:Analyse chlorophylle A Comparaisons de moyennes.

TEST DE NEWMAN-KEULS - SEUIL = 5%

FACTEUR 1 : Pb

NOMBRE DE MOYENNES : 2 3 4 5 6 7

VALEURS DES PPAS : 2.842 3.441 3.806 4.069 4.274 4.441.

F1	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES		
1.0	F1n1	12,074	A		
2.0	F1n2	9,065		B	
4.0	F1n4	5,494			C
5.0	F1n5	3,501			C
3.0	F1n3	3,434			C
7.0	F1n7	2,662			C
6.0	F1n6	2,281			C

Annexe n°3:Analyse chlorophylle B Comparaisons de moyennes.

TEST DE NEWMAN-KEULS - SEUIL = 5%

FACTEUR 1 : Pb

NOMBRE DE MOYENNES : 2 3 4 5 6 7

VALEURS DES PPAS : 1.468 1.777 1.966 2.101 2.207 2.293.

F1	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES		
1.0	F1n1	13,979	A		
2.0	F1n2	11,739		B	
4.0	F1n4	2,795			C
3.0	F1n3	2,47			C
6.0	F1n6	1,598			C
5.0	F1n5	1,548			C
7.0	F1n7	1,322			C

Annexe n°4:Analyse chlorophylle A+ B Comparaisons de moyennes.

TEST DE NEWMAN-KEULS - SEUIL = 5%

FACTEUR 1 : Pb

NOMBRE DE MOYENNES : 2 3 4 5 6 7

VALEURS DES PPAS : 3.743 4.532 5.013 5.356 5.629 5.849.

F1	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES		
1.0	F1n1	26,054	A		
2.0	F1n2	20,804		B	
4.0	F1n4	8,289			C
3.0	F1n3	5,904			C
5.0	F1n5	5,049			C
7.0	F1n7	3,984			C
6.0	F1n6	3,879			C

Annexe n°5:Analyse sucre soluble Comparaisons de moyennes.

TEST DE NEWMAN-KEULS - SEUIL = 5%

FACTEUR 1 : Pb

NOMBRE DE MOYENNES : 2 3 4 5 6 7

VALEURS DES PPAS : 0.109 0.131 0.145 0.155 0.163 0.17.

F1	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES		
7.0	F1n7	0,383	A		
6.0	F1n6	0,298	A	B	
5.0	F1n5	0,293	A	B	
2.0	F1n2	0,208		B	C
3.0	F1n3	0,2		B	C
4.0	F1n4	0,2		B	C
1.0	F1n1	0,107			C

Annexe n°6:Analyse poids sec de la tige Comparaisons de moyennes.

TEST DE NEWMAN-KEULS - SEUIL = 5%

FACTEUR 1 : Pb

NOMBRE DE MOYENNES : 2 3 4 5 6 7

VALEURS DES PPAS : 1.916 2.32 2.566 2.743 2.881 2.994.

F1	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES		
3.0	F1n3	7,15	A		
1.0	F1n1	5,275	A		B
4.0	F1n4	5,2	A		B
5.0	F1n5	4,525			B
6.0	F1n6	4,175			B
7.0	F1n7	4,075			B
2.0	F1n2	3,1			B

RESUME

Le plomb est l'un des métaux lourds les plus toxiques, il cause des dégâts considérables sur l'activité et le développement biologique des êtres vivants. Sa répartition à travers les différents compartiments de l'environnement reste majoritairement liée à l'action anthropique. Sur les plantes les effets néfastes de ce polluant peuvent s'exprimer au niveau racinaire et au niveau aérien, elles sont caractérisées par des symptômes vus à l'œil nu d'ordre morphologique et des autres d'ordre physiologiques internes détectables par des analyses au laboratoire. Le présent travail consiste à suivre le comportement de la fève (*Vicia faba* L.) face au stress de plomb. Cette plante est utilisée comme modèle dans les études éco-toxicologiques grâce à sa biomasse importante et à son cycle végétatif court.

Pour la réalisation de notre travail, on a exposé les plante de la fève (variété Sidi Aïch) à différentes doses de plomb (0, 50, 100, 200, 500, 1000 et 2000 ppm) sous forme de nitrates $Pb(NO_3)_2$, ces doses ont été appliqué sur le substrat de culture avant le repiquage des graines. Plusieurs paramètres d'ordre physiologiques ont été testés tout le long de l'expérimentation afin d'étudier le comportement des plantes traitées face à ce stress.

Les résultats trouvés ont révélé des réductions notables pour l'ensemble des paramètres mesurés, la teneur en pigments chlorophylliens et la teneur en sucres solubles des feuilles sont les paramètres les plus affectés par l'augmentation de la dose de plomb appliquée dans le substrat de culture. Ces résultats suggèrent que la présence du plomb dans le milieu modifie le fonctionnement et le développement normal des plantes par des perturbations interne sur le plan physiologique et biochimiques.