

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université M'Hamed Bougarra de Boumerdès  
Faculté des sciences  
Département de Biologie



Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de master II

Spécialité : Biodiversité et Environnement

*Thème*

*Accumulation du cadmium, facteur de  
translocation dans un système sol-fève (vicia  
faba)*

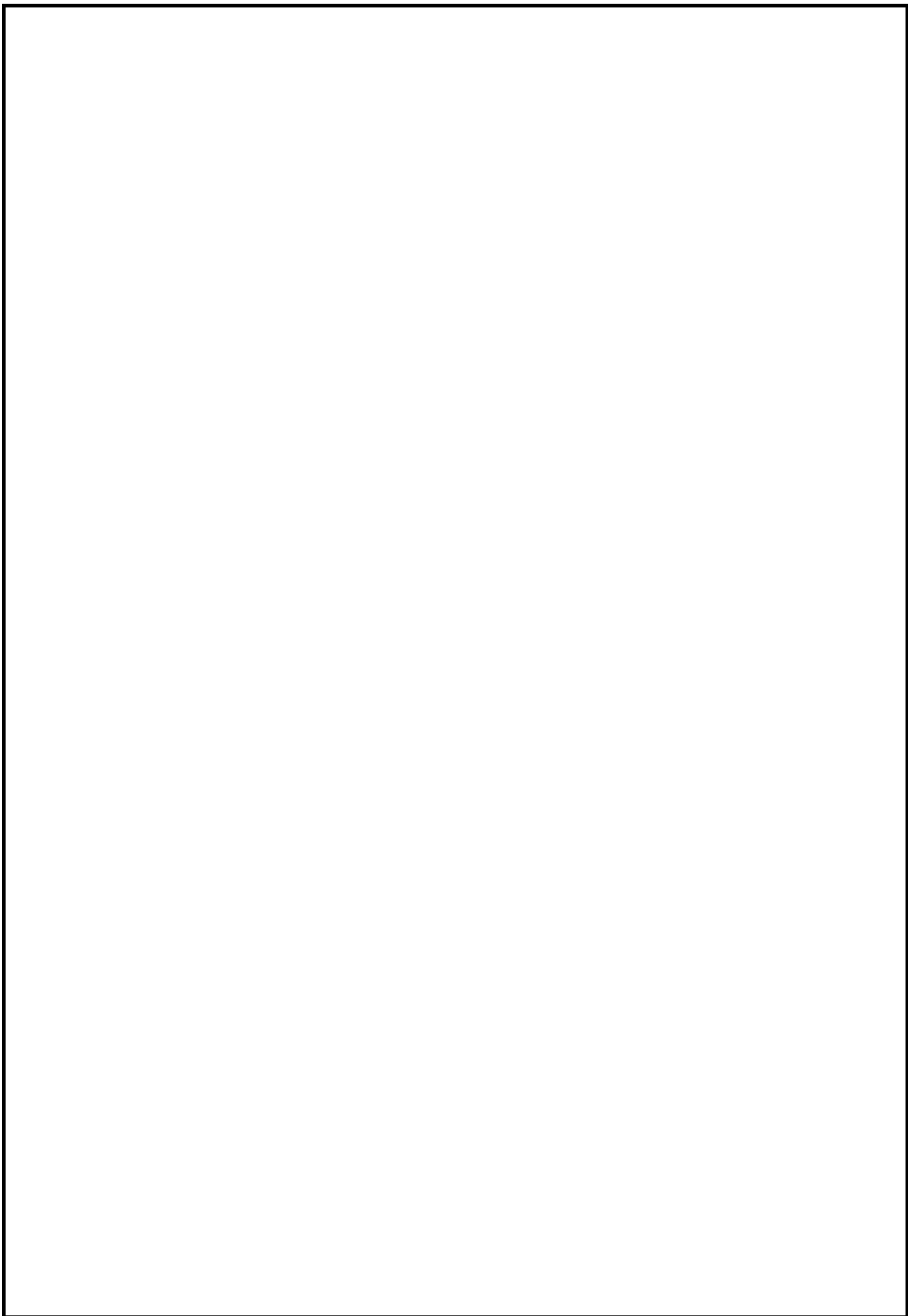
Réalisé par :

LEBNI Soumia & SEBIH Sabah

Soutenu publiquement, le 16 /11 /2020, devant le jury composé de :

- M BELLOUT .MCB . président
- Mme BENHABILES.K Promotrice
- M HARITI.MAA Examineur

Année universitaire : 2019/2020





## **REMERCIEMENT**

*Avant tout, nous remercions **ALLAH** Le tout Miséricordieux. L'unique, Le Puissant, Maître des cieux et de la terre pour nous avoir guidé, protégé, aidé et permis de mener à bien ce travail.*

*Nous remercions l'ensemble des membres du jury pour avoir accepté de juger ce travail.*

*Nous remercions également, **Mme BENHILES.K** d'avoir dirigé notre thèse au cours de sa réalisation avec beaucoup de patience. Votre rigueur scientifique, vos conseils et vos encouragements nous a permis de mener à bien ce travail.*

*Nous exprimons nos plus sincères remerciements à mes amis sans exception pour ses présences, ses encouragements et ses soutiens dans les moments difficiles, merci pour vos amitiés*

*J'adresse, enfin et surtout, ma plus profonde gratitude et tout mon amour à ma mère, mon père, mes sœurs et mes frères, qui ont su me faire confiance et me soutenir en toutes circonstances, ainsi qu'à tous mes proches amis qui m'ont toujours soutenu et encouragé même dans les périodes les plus difficiles.*

## **MERCI**

*À ceux et celles qui m'ont aidé d'une façon ou d'une autre, de près ou de loin dans mon travail, je les remercie du fond du cœur.*





## DEDICACE

*A l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, que dieu te garde dans son vaste paradis, à toi mon père .*

*A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur ; maman que j'adore.*

*A mes sœurs : hayat , karima et hamama , et un grand remerciement à ma soeurs meriem qui m'a beaucoup soutenu et aidé à réaliser ce travail .*

*A mon frères abdallah et sa femme et à mon petit frère islam , et toute ma famille sebih et dridi*

*Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient toujours à mes côtés, mes aimables amis, ABIR et SMIMI  
Sont oubliée mon fiancée: Hassan .*





# Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail :*

*À mes très chers parents qui ont largement contribué à mon éducation et mon enseignement.*

*À mes chers frères et sœurs*

*À ma sœur Hafsa qui m'a aidé toujours et mes nièces surtout Ahlem et Serine mes source du bonheur .*

*À toutes mes amies surtout Imen, Abir, Nawel et sa fille , Merouane pour son aide et son soutien moral , et mon binôme et sa sœur meriem .*

*À tous mes amis de la promotion 2020-2021*

*Enfin à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin*

*Soumia*





## ***LISTE DES FIGURES***

<b><i>Figures</i></b>	<b><i>pages</i></b>
<b><i>Figure 1:</i></b> Aspect du Cadmium .....	<b>3</b>
<b><i>Figure 2:</i></b> Voie principale d'absorption et de transport des métaux dans les plantes.....	<b>14</b>
<b><i>Figure 3:</i></b> Mécanismes impliqués dans l'hyperaccumulation et l'hypertolérance du métal, notamment chez <i>Arabidopsis hanneri</i> et <i>Noccaea caerelescens</i> .....	<b>18</b>
<b><i>Figure 4:</i></b> Représentation de la cinétique de type Michaelis-Menten.....	<b>19</b>
<b><i>Figure 5:</i></b> différentes parties de la fève <i>Vicia faba L.</i> .....	<b>30</b>

## ***LISTE DES TABLEAUX***

<b><i>Tableaux</i></b>	<b><i>page</i></b>
<b><i>Tableaux 1:</i></b> Evaluation de la superficie et production de la fève et féverole en Algérie.....	<b>35</b>
<b><i>Tableaux 2:</i></b> facteur de translocation chez les cultivars sensible et tolérant.....	<b>40</b>



## ***LISTE DES ABREVIATIONS***

<b><i>A max</i></b>	Le taux de photosynthèse net maximal
<b><i>ABC</i></b>	ATP-Binding Cassette
<b><i>Ag</i></b>	Argent
<b><i>As</i></b>	L'arsenic
<b><i>ATP</i></b>	Adénosine 5'-triphosphate
<b><i>BCF</i></b>	Facteur de bioconcentration
<b><i>CAX</i></b>	Calcium exchanger
<b><i>Ccd leavers</i></b>	Concentration de cadmium dans les feuilles
<b><i>Ccd roots</i></b>	Concentration de cadmium dans les racines
<b><i>Ccd-Ns</i></b>	Concentration de cadmium dans la solution nutritive
<b><i>Cd</i></b>	Le cadmium
<b><i>CdCl<sub>2</sub></i></b>	Chlorure de cadmium
<b><i>CdCO<sub>3</sub></i></b>	L'otavite
<b><i>CdO</i></b>	Le montéponite
<b><i>CdS</i></b>	Le greenockite et l'hawleyite
<b><i>CdSe</i></b>	La cadmosélite
<b><i>Cdso<sub>4</sub></i></b>	Sulfate de cadmium
<b><i>Co</i></b>	Cobalt
<b><i>Cr</i></b>	Le chrome
<b><i>Cu</i></b>	Cuivre
<b><i>Dw</i></b>	Poids sec
<b><i>EDTA</i></b>	Acide éthylène-diamine-tétraacétique
<b><i>ETM</i></b>	Élément traces métallique
<b><i>Fe</i></b>	Fer
<b><i>FTs</i></b>	Facteur de translocation de cultivar sensible

<b>FTt</b>	Facteur de translocation de cultivar tolèrent
<b>FW</b>	Poids frais
<b>GFP</b>	Green Fluorescent Protein
<b>GS</b>	Glutamine Synthase
<b>GSH</b>	Glutathion (forme réduite)
<b>Hg</b>	Le mercure
<b>HMA<sub>s</sub></b>	Heavy metal transporting ATPases <sub>sp</sub>
<b>HMW</b>	High Molecular Weight
<b>HPLC-ESI-MS-MS</b>	Chromatographie liquid haute performance spectrometrie de
<b>IARC</b>	International Agency for Research on Cancer
<b>ICP-MS</b>	Spectrométrie de masse / plasma a couplage inductif
<b>I<sub>max</sub></b>	Influx maximal de Cd $\mu\text{mol g}^{-1}\text{MS h}^{-1}$
<b>IRT</b>	Iron regulated transporter
<b>K<sub>m</sub></b>	Constante de Michaelis-Menten $\mu\text{mol L}^{-1}$
<b>K<sub>m</sub></b>	Constante de Michaelis-Menten $\mu\text{mol L}^{-1}$
<b>LCT1</b>	Low Affinity Cation Transporter 1
<b>LOQ</b>	Limite de quantification
<b>Mn</b>	Manganèse
<b>MS</b>	Masse sèche
<b>MT = MT<sub>s</sub></b>	Métallothionéine(s)
<b>N</b>	Azote
<b>Ni</b>	Nickel
<b>NRAMP</b>	Natural Resistance Associated Macrophage Protein
<b>Pb</b>	Le plomb
<b>PC</b>	Phytochélatine
<b>Ppm</b>	Partie par million
<b>R</b>	Coefficient de corrélation

<b>S</b>	Soufre
<b>YLS</b>	Yellow Stripe Like protein
<b>ZIP</b>	ZRT-IRT-like Proteins
<b>Zn</b>	Zinc
<b>ZNT</b>	Zinc transporter
<b>ZRT</b>	Zinc regulated transporter

# ***SOMMAIRE***

# **SOMMAIRE**

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

**INTRODUCTION**.....2

## **Chapitre I : Le cadmium**

<b>I-Généralités sur le cadmium</b> .....	<b>3</b>
I.1. Introduction .....	3
I.2. L'historique.....	3
I.2.1 Étymologie.....	3
I.2.2-Découverte.....	3
I.3. L'origine du cadmium .....	4
I.3.1. Origine géogène.....	4
I.3.2. Origine dans le sol.....	4
I.3.2.1.Origine naturelle.....	4
I.3.2.2.Origine anthropique .....	4
I.3.2.2.1.Rejets d'origine industrielle .....	5
I.3.2.2.2 Pratiques agricoles .....	5
I.4. Les propriétés physico -chimiques et biologique .....	6
I.4.1. Les propriétés physico-chimiques .....	6
I.4.2. Propriétés biologiques.....	7
I.5. la toxicité de cadmium .....	7
I.5.1. Phytotoxicité du cadmium.....	7
I.5.1.1. Effet du cadmium sur la croissance et la biomasse.....	8
I.5.1.2. Effet du cadmium sur le statut hydrique .....	8
I.5.1.3. Effets du cadmium sur la nutrition minérale .....	9
I.5.1.4. Effet du cadmium sur la photosynthèse .....	10
I.5.1.5.Induction d'un stress oxydatif par le cadmium .....	11
I.5.2. La toxicité du cadmium et ses risques sur la santé humaine .....	12
I.5.2.1. La néphrotoxicité du cadmium .....	12
I.5.2.2. Effet du cadmium sur le système respiratoire .....	12
I.5.2.3. Effet du cadmium sur le système reproducteur .....	12
I.5.2.4. La cancérogénicité du cadmium .....	13

## **Chapitre II : L'absorption, accumulation et translocation du cadmium chez les plantes**

<b>I. Introduction</b> .....	<b>14</b>
<b>II. L'absorption</b> .....	<b>15</b>
II.1. Les espèces de cadmium prélevées par les racines.....	15
II.2. facteurs Influencent la disponibilité du cadmium pour la plante.....	15
II.2.1. Facteurs liés au sol.....	16
II.2.2. Facteurs liés à la plante .....	17

II.3. Les transporteurs membranaires du Cd .....	17
II.3.1. Absorption racinaire .....	19
II.3.2. Efflux racinaire.....	20
II.3.3. Entrée et sortie de la vacuole .....	21
II.3.4. Déversement dans le xylème .....	21
II.4. Rôle de l'apoplasme.....	21
II.4.1. Transport par l'apoplasme .....	22
II.4.2. Stockage et détoxification dans l'apoplasme .....	23
II.5. Complexations du Cd dans le cytoplasme .....	25
II.6. Spéciation dans le xylème .....	25
II.7. Facteur de transfert de cadmium vers la plante .....	25
<b>III. Translocation.....</b>	<b>26</b>
III.1. Facteur de translocation de cadmium.....	26
<b>IV. Accumulation du cadmium .....</b>	<b>26</b>
IV.1. Variabilité interspécifique d'accumulation de cadmium .....	27
IV.2. Variabilité intra spécifique d'accumulation de cadmium.....	27
IV.3. Variabilité d'accumulation de cadmium entre les organes.....	28
IV.4. Accumulation du cadmium à l'échelle cellulaire.....	29

### **Chapitre III : la fève (*Vicia faba*)**

<b>Généralités sur la fève (<i>Vicia faba.L.</i>).....</b>	<b>30</b>
<b>I. Description botanique de la fève .....</b>	<b>30</b>
I.1. Les racines.....	30
I.2. La tige.....	30
I.3. Les feuilles.....	31
I.4. Les fleurs.....	31
I.5. Les fruits.....	31
I.6. Les graines.....	31
<b>II. L'origine et évolution.....</b>	<b>32</b>
<b>III. Classification de la fève .....</b>	<b>32</b>
<b>IV. Les variétés de la fève .....</b>	<b>33</b>
IV.1. Variétés très précoces.....	33
IV.2. Variétés précoces.....	33
IV.3. Variétés demi-précoces.....	33
IV.4. Variétés tardives.....	33
<b>V. Production de la fève.....</b>	<b>34</b>
V.1. En monde.....	34
V.2. En Algérie.....	35
<b>VI. Intérêts de la fève .....</b>	<b>36</b>
VI.1. Intérêt agronomique.....	36
VI.2. Intérêt Ecologique.....	36
VI.3. Intérêt économique.....	36
VI.4. Intérêt alimentaire de la fève.....	36

## Chapitre IV : méthodologie et résultats

<b>I. Matériels et méthodes</b> .....	<b>37</b>
I.1. Réactifs, produits chimiques et normes .....	<b>37</b>
I.2. Matériel végétal et culture .....	<b>37</b>
I.3. préparation de l'échantillon.....	<b>38</b>
I.4. Tests statistiques.....	<b>38</b>
<b>II. Résultats</b> .....	<b>38</b>
II.1. Corrélation entre la concentration externe et interne de Cd.....	<b>39</b>
II.2. Corrélation entre la concentration de Cd et la production de biomasse .....	<b>40</b>
II.3. Facteur de translocation (FT).....	<b>40</b>
<b>III. Discussion</b> .....	<b>40</b>
III .1. Corrélation entre la concentration externe et interne de Cd.....	<b>41</b>
III .2. Corrélation entre la concentration de Cd et la production de biomasse.....	<b>42</b>
<b>Conclusion générale</b> .....	<b>43</b>
<b>Les référence bibliographique</b> .....	<b>59</b>
<b>Les annexes</b>	

## **Introduction**

L'origine de la pollution de l'environnement par les métaux lourds est multiple ; l'industrialisation l'urbanisation et l'intensification de l'agriculture. La présence des éléments traces métallique (ETM) dans tous les milieux est aujourd'hui une problématique, ils sont présent ; en quantité anormale dans l'aire, l'eau et dans le sol et les transferts vers les êtres vivants se font continuellement.

Les activités anthropiques, industrielles et agricoles, peuvent être à l'origine d'une accumulation de métaux dans l'environnement et en particulier dans les sols, L'apport des métaux au sol se fait généralement soit par retombées atmosphériques, soit par l'application directe au sol, ou indirecte via la végétation, de matériaux (fertilisants, phytosanitaires, amendements organiques, boues de station d'épuration notamment) concentrés en métaux (Adriano 2001). La contamination des sols par les métaux peut avoir deux conséquences majeures. D'une part, elle peut favoriser la dispersion des métaux dans l'environnement, enfin, par transferts dans la chaîne alimentaire par l'intermédiaire des animaux et plus encore des végétaux (Adriano 2001). Dans le domaine agricole la plupart des métaux lourds accumulés dans le sol sont absorbés par les plantes.

Le cadmium (Cd) est identifié comme un polluant extrêmement toxique (Godt et al., 2006). Quelle que soit son origine, le cadmium présent dans le sol ne se décompose ni par voie chimique, ni par voie biologique. Il est accumulé dans les couches superficielles des sols et peut être entraîné par les eaux de ruissellement pour atteindre les nappes phréatiques profondes. Dans le cas d'une accumulation du cadmium dans les couches superficielles des sols, il peut être absorbé par les plantes, ce qui représente un problème majeur pour la santé humaine (Godt et al., 2006). Les sols faiblement pollués par ce métal contiennent des concentrations comprises entre 0,04 et 0,32 mM du cadmium. Les sols modérément à fortement contaminés atteignent quant à eux des concentrations supérieures à 0,32 mM et pouvant aller jusqu'à 1 mM (Sanità di Toppi and Gabbrielli, 1999). Dans la plupart des sols, plus de 99 % du cadmium est associé à la phase solide tandis que seulement moins d'un pour cent se retrouve dans la solution du sol (McLaughlin et Singh, 1999). Chez les plantes, les symptômes de toxicité associés au cadmium sont peu différents de ceux produits par différents types de stress. Parmi les symptômes visibles, le cadmium induit une inhibition de la croissance des différentes parties des plantes (Chaoui et al., 2004 ; Aina et al., 2007 ; Finger-Teixeira et al., 2010 ; Jhanji et al., 2012). Ces inhibitions de la croissance s'accompagnent de changements anatomiques, structuraux et ultrastructuraux importants au niveau des feuilles (Sandalio et al, 2001) mais également des racines (Cosio et al., 2005; Patel et al., 2005



; Boulila Zoghliami et al., 2006). La réduction de l'élongation racinaire peut être causée par une inhibition de la division cellulaire (Souguir et al., 2008).

Les taux d'absorption du cadmium varient énormément en fonction de l'espèce considérée, de la concentration du cadmium biodisponible dans le sol et de nombreux facteurs bio-physico-chimiques (pH notamment). Les feuilles sont souvent présentées comme un organe cible privilégié. Les espèces végétales et même les variétés diffèrent significativement en termes de résistance au Cd et de capacité d'accumulation de Cd mais cela n'est pas nécessairement corrélé avec la tolérance au métal. L'accumulation de Cd diffère également selon les organes ou les tissus d'une même plante.

Les légumineuses à graines permettent d'apporter au moins 33% des besoins humains en protéines alimentaires (Vance et al., 2000). Parmi les légumineuses, la fève *vicia faba* est une culture importante, et considérée comme sources cruciales de protéines pour les humains et pour les animaux, notamment pour les pays méditerranéens et la Chine (Crépona et al., 2010). La fève, représente une production mondiale de 3515748 tonnes.

En Algérie, la fève est cultivée dans différentes régions du pays. La wilaya de Biskra est l'une des principales régions productrices de fève cultivée en plein champs de la wilaya.

Ce mémoire fait l'objet d'une présentation en quatre chapitres :

Le premier chapitre décrit l'origine et les caractéristiques physico-chimiques du cadmium, sa présence dans l'environnement ainsi que sa toxicité vis-à-vis des organismes vivants

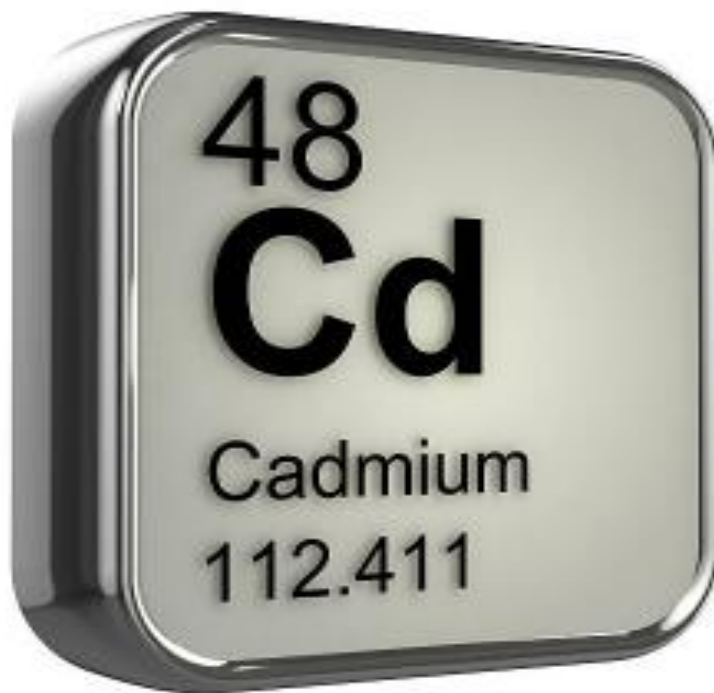
Le deuxième chapitre aborde en détail une synthèse bibliographique sur l'absorption, l'accumulation et la translocation du cadmium chez les plantes, L'objectif de ce chapitre est de fournir, un point des connaissances actuelles sur les processus intervenants dans le transfert du sol à la plante du cadmium et des différentes stratégies de tolérance des plantes. Les différents mécanismes impliqués dans la tolérance et l'accumulation du Cd sont évoqués et l'ensemble des processus qui prennent place lors du prélèvement du métal sont présentés.

Le troisième chapitre présente la description botanique de la fève, l'origine et l'évolution, la classification et les intérêts de la fève.

Le quatrième chapitre présente, la méthodologie suivie par Radomir Cabala et al. (2011) pour étudier l'accumulation, le transfert et la translocation du Cd chez la fève, ainsi que ses résultats. A la fin nous terminons avec une conclusion.

# *Chapitre I :*

## *Le Cadmium*



## I-Généralités sur le cadmium

### I.1. Introduction

La contamination du sol et les végétaux due à l'accumulation des éléments traces est devenue un problème majeur. De nombreux éléments comme le plomb (Pb), le cadmium (Cd), le chrome (Cr) et le mercure (Hg) sont présents le plus souvent dans l'environnement sous forme de traces. Les plus toxiques d'entre eux sont le cadmium, l'arsenic, le plomb et le mercure. Ils peuvent également être présents dans les végétaux et s'accumuler dans la chaîne alimentaire et entraîner des effets sur la santé humaine (Gupta et al, 2019).

### I.2. L'historique :

#### I.2.1 Étymologie :

Le mot "cadmium" provient du latin "cadmia" qui était utilisé pour désigner le carbonate de zinc. Il a aussi des ressemblances avec le mot "calamine", du minerai du même nom. ou encore au mot gréco-latin "kadmeia" qui est une appellation désuète autrefois utilisée en Europe pour désigner les différents types de minerais de zinc oxydé à la manière des calamines ou les smithsonites et les cadmies ; des minéraux de néoformation des fourneaux.( H. Biglow and al)

#### I.2.2-Découverte :

Le cadmium a été découvert en 1809 par Magnus Martin Pontin, un chimiste d'origine suédoise suite à son étude sur l'électrochimie. Par la suite, un professeur de chimie analytique de l'Université de Goettingen, Friedrich Tromeyer, sera le premier à en préparer en 1817 à partir de carbonate de zinc. Cependant, la première découverte de cadmium à l'état naturel remonte à 1979 par des géologues russes en Sibérie.( H. Biglow and al).



**Figure 1:** Aspect du Cadmium (Arris, 2008).

### **I.3. L'origine du cadmium**

#### **I.3.1. Origine géogène :**

Le cadmium est peu dans les roches ignées et sédimentaires, ou il ne dépasse pas les 0.3ppm. Il se concentre préférentiellement dans les roches argileuses et schisteuses (Coullery, 1997) et plus abondant dans les sédiments riches en carbonnes, sulfures et phosphates (Baize, 1997). Les calcaires jurassiques, biodétritiques (contenant de nombreux débris fossilisés) et récifaux sont nettement plus riches en cadmium que les autres calcaires (Baize, 1997).

La géochimie du cadmium est étroitement liée à celle du Zn, mais elle diffère toutefois puisque le cadmium présente une grande affinité pour le soufre (Kadem, 2005).

#### **I.3.2. Origine dans le sol :**

##### **I.3.2.1. Origine naturelle :**

Naturellement Le cadmium est un élément relativement rare présent dans l'écorce terrestre à des concentrations faibles. Dans les sols non pollués, le contenu en cadmium est généralement entre 0.1 et 2 ppm et la plus part du temps il est inférieur à 1ppm . Ces principales formes cristallines sont : le greenockite et l'hawleyite (CdS), l'otavite (CdCO<sub>3</sub>), le montéponite (CdO) et la cadmosélite (CdSe)(kabata-pendias et al.,2001). La source de dispersion naturelle du cadmium dans l'atmosphère est principalement liée à l'activité volcanique. L'enrichissement en cadmium des sols et des systèmes aquatiques résulte de l'altération des matériaux de la croûte terrestre et des retombés atmosphériques (lane et al.,2015).

##### **I.3.2.2. Origine anthropique :**

Les pratiques humaines (agricoles ou industrielles) conduisent aussi à l'enrichissement des sols en cadmium:

###### **I.3.2.2.1. Rejets d'origine industrielle :**

Le cadmium se retrouve dans les déchets industriels stockés sur des anciennes friches industrielles ainsi que dans les produits en fin de vie comme les batteries et les piles à Cd/Ni et les effluents liquides issus des usines. Les retombées atmosphériques provenant de l'activité industrielle et du trafic urbain favorisent également la pollution des sols et des eaux de surface et

souterrains par le cadmium. Ces facteurs représentent la source principale de contamination dans les zones urbaines. INERIS (2000).

Les principaux domaines d'utilisation du cadmium (18 882 tonnes en 1994, dans le monde) sont la galvanoplastie, les accumulateurs alcalins, les alliages et dans une moindre mesure, l'industrie nucléaire. La réaction de fission nucléaire contrôlée au sein des centrales nucléaires nécessite de réguler le flux de neutrons initiant et maintenant les réactions nucléaires. Ainsi des barres de commandes composées d'argent, d'indium et de cadmium, présentant de fortes capacités à absorber les neutrons sont introduites au centre du réacteur pour contrôler et entretenir la réaction (EDF, 1995). Des plaques de cadmium 113 sont généralement utilisées et s'activent sous le flux de neutrons en  $^{114}\text{Cd}$ . Parmi les autres applications, la galvanoplastie ou cadmiage (ajout d'un revêtement de cadmium sur divers métaux), a représenté l'activité principale en termes de production entre 1922 et 1980 ; elle s'appuie sur les propriétés de résistance du cadmium en milieu chaud et humide.

La fabrication d'accumulateurs cadmium / nickel est une source importante d'utilisation du cadmium depuis 1980. Les pigments de cadmium (à base de sulfures) représentent une branche importante de l'utilisation industrielle de cet élément. Le sulfure de cadmium a la propriété de former des solutions solides avec des produits de même nature chimique (le sulfure de zinc ; le sélénure de cadmium ; le sulfure de mercure). Ainsi les pigments de cadmium se retrouvent dans de nombreux produits industriels en matières plastiques, dans la peinture, dans le verre et les émaux pour garantir des nuances vives de colorations, une excellente dispersibilité et une forte résistance à la lumière et à la chaleur (EDF, 1995).

#### **I.3.2.2 Pratiques agricoles :**

Les produits chimiques utilisés en agriculture, tel que les fongicides, les insecticides, les herbicides peuvent contenir plusieurs métaux toxiques comme Cu, Cd, Zn et Pb et peuvent donc contribuer à la contamination des terres agricoles. D'autre part, l'utilisation répétée d'eaux usées peut aussi contribuer à l'accumulation de ce métal dans les sols ; en effet, ces eaux contiennent du cadmium à des concentrations plus élevées que les eaux normales (Bounab and Sahli, 2014).

#### **I.4. Les propriétés physico-chimiques et biologique :**

##### **I.4.1. Les propriétés physico-chimiques :**

Le cadmium est connu pour son symbole Cd et numéro atomique 48 (Borchardt, 1985), du groupe du tableau périodique (Garin et Simon, 2004), leur masse molaire atomique est de 112,4 g/mol (Arris, 2008) . Il existe 8 isotopes naturels stables, 11 isotopes instables et de nombreux isotopes métastables (Goyer et Clarckson, 2001). C'est un élément rencontré en milieu aquatique sous divers formes physiques (dissoute, colloïdale, particulière) et chimiques (minérale ou organique), a une grande résistance à la corrosion; il a une bonne conductivité de l'électrifié; ses produits dérivés ont une bonne résistance à la forte température; il présente des caractéristiques chimiques proches de celles du calcium, en particulier le rayon ionique, facilitant ainsi sa pénétration dans les organismes (Bouchardt, 1985). Il y est dispersé en petite quantité, soit entre 0,1 mg/kg et 5 mg/kg, majoritairement sous sa forme divalente complexée avec des sulfates, des oxydes et des carbonates (ATSDR, 2008).

En raison de sa forme divalente et de sa structure chimique, le cadmium ressemble à plusieurs autres métaux, l'ion cadmium est déplacé par le zinc métallique en solution: il est donc plus noble que le zinc. Il s'oxyde très peu à température ambiante et brûle dans l'air en donnant l'oxyde anhydre CdO, insoluble dans un excès d'hydroxyde de sodium. Il réagit avec les acides et les bases. Le cadmium est soluble dans l'acide nitrique dilué et dans les acides chlorhydrique et sulfurique concentrés et chauds. Sous sa forme métallique (Cd<sup>0</sup>), observable principalement après raffinage, le cadmium est insoluble dans l'eau, comme la plupart des métaux, il possède une faible pression de vapeur et est donc une substance considérée comme pratiquement non volatile (Barbalace inc, 2012).

##### **I.4.2. Propriétés biologiques :**

Ce métal ne joue aucun rôle physiologique dans l'organisme, en raison de sa haute toxicité comme l'avait prédit le scientifique Friedrich Stromeyer (dossier: toxicité des métaux pour l'homme biotechnologie). Le cadmium n'est pas essentiel au développement des organismes,

animaux ou végétaux et ne semble pas biologiquement bénéfique au métabolisme cellulaire (Chiffolleau et al., 1999). En revanche, ses propriétés physiques et chimiques, proches de celles du calcium, lui permettent de traverser les barrières biologiques et de s'accumuler dans les tissus.

Contrairement à de nombreux métaux, le cadmium n'a aucun rôle métabolique connu et ne semble pas biologiquement essentiel ou bénéfique au métabolisme des êtres vivants. Il remplace parfois le Zn dans des systèmes enzymatiques carencés en Zn chez le plancton (Lane et Morel, 2000).

## **I.5. La toxicité de cadmium :**

### **I.5.1. Phytotoxicité du cadmium :**

Chez les plantes, le cadmium n'a aucune fonction biologique connue (Pokorny et al., 2004), et il est toxique à de faibles concentrations (De la Rosa et al., 2004). Les symptômes que présente une plante cultivée en présence de cadmium sont l'inhibition de la croissance, la diminution de sa biomasse, la chlorose, la nécrose, la perturbation des flux d'eau, la déficience en phosphore et en azote, l'accélération de la sénescence l'apparition du retard dans le développement des jeunes pousses et des perturbations de la photosynthèse (Cosio, 2005; Clemens, 2006).

#### **I.5.1.1. Effet du cadmium sur la croissance et la biomasse :**

La mesure de la croissance est un paramètre biométrique souvent utilisée pour la détermination d'un éventuel effet phytotoxique des métaux lourds. Dans les conditions environnementales, les métaux lourds pénètrent par les racines où ils causent les premiers dommages, Le Cd affecte négativement la croissance des plantes. Étant très mobile dans le phloème, il peut s'accumuler dans n'importe quelle partie de la plante, ce qui cause un retard de croissance, la chlorose et l'épinastie des feuilles. Il induit également des changements biochimiques dans les racines et les feuilles, comme la lignification des parois cellulaires dans les tissus racinaires et la veine principale des feuilles (Gallego et al., 2012). Rizwan et al. (2017) rapportent que l'absorption du Cd par les plantes de concombres, stressés à une concentration de 10-mM Cd dans des conditions hydroponiques, a considérablement réduit la longueur de la racine, la surface et l'extrémité des racines par rapport au contrôle.

D'après l'étude faite par Sougir.D et al en 2013 sur les modifications morphologiques et minérales Induites Par le Cadmium Chez (*Vicia faba.L*) qui montre l'effet du cadmium sur la

croissance et les distributions dans les racines et les feuilles des plantes de *Vicia faba*, cultivés dans des solutions nutritives contenant un excès de cadmium sur 12, 24 et 48 heures. Les effets du cadmium sur la croissance étaient plus élevés dans les racines que dans les feuilles. Le Cd a induit une réduction significative ( $P > 0,05$ ) de la biomasse fraîche des feuilles de *Vicia faba* à la fin du traitement. Cette réduction est d'environ 30 % en présence de 50, 100 et 200  $\mu\text{M}$  de Cd dans la solution nutritive. Au niveau racinaire la diminution de la biomasse fraîche est plus précoce (24 h).

En prolongeant le temps de traitement, elle a atteint 40 % de réduction en présence des plus faibles concentrations du métal (50 et 100  $\mu\text{M}$ ) et 53 % sous un traitement plus sévère (200  $\mu\text{M}$ ). Quant à la biomasse sèche, les feuilles de fève traitées n'ont pas montré une diminution significative de leur poids sec qu'à la fin du traitement, alors que la réduction de la matière sèche racinaire est importante dès 24 h d'exposition à 100 et 200  $\mu\text{M}$  de Cd. Plus tard, cette réduction est plus prononcée sous l'effet des trois traitements. Cependant, les racines semblent être plus affectées que les feuilles. En effet, une réduction d'environ 40 % de la biomasse sèche a été notée au niveau racinaire à 48 h de traitement alors que cette réduction n'a atteint qu'environ 20 % au niveau foliaire.

#### **I.5.1.2. Effet du cadmium sur le statut hydrique :**

Les plantes exposées à un excès d'ETM augmentent leur résistance stomatique et diminuent la transpiration, induisant un stress hydrique. Le Cd limite généralement la tolérance au stress hydrique des plantes causant une perte de turgescence et une diminution du potentiel hydrique foliaire (Prasad, 2004).

Le statut hydrique des plantes est très affecté en présence de cadmium : le cadmium affecte l'absorption de l'eau, son transport ainsi que la transpiration (Barcelo et al. 1986 ; Costa et al., 1994 ; Vassilev et al., 1997). Ces perturbations hydriques se manifestent par une diminution de la teneur relative en eau (TRE ou RWC : Relative Water Content), du potentiel hydrique ( $\psi$ ) et du potentiel de turgescence foliaire (Vassilev et Yordanov, 1997). Barcelo et al. (1988) et Marchiol et al. (1996) suggèrent que le transport d'eau diminue de deux à quatre fois selon l'espèce et la concentration du cadmium. Barcelo et al. (1988) ont considéré que cette diminution est due à l'inhibition de la division et de l'élongation des cellules xylémiques. Ces auteurs ont présumé que ceci est une conséquence des perturbations de l'équilibre hormonal causées par le cadmium.



### I.5.1.3. Effets du cadmium sur la nutrition minérale :

L'absorption et l'accumulation des différents nutriments dans les légumes peuvent changer considérablement sous le stress Cd. La présence de Cd dans la solution nutritive peut agir sur l'absorption et l'accumulation des éléments nutritifs essentiels pour la croissance des plantes. Dans la plupart des cas, le Cd inhibe l'absorption des cations  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$  et  $Fe^{3+}$  et des anions  $NO_3^-$ . Certains signes de toxicité des plantes par le Cd ont été attribués à des perturbations d'origine nutritionnelle (Souguir, 2009).

Les résultats trouvés par Souguir et al en 2013, Les teneurs en zinc dans les tissus foliaires semblent significativement diminuées chez les plantules traitées par rapport à celles témoins dès 24 h de traitement. Au niveau de cet organe, la diminution a atteint 30 % par rapport au témoin en présence de 50  $\mu M$  de Cd dans la solution nutritive, 40 % en présence de 100  $\mu M$  et n'a été que de 20% pour la plus forte concentration (200  $\mu M$ ). Cependant, au niveau des racines ; la variation de concentration de métal n'a pas conduit à une modification de la teneur en cet élément.

Dans des feuilles, le Cd a entraîné une réduction de la teneur en fer. Cette réduction est d'environ 55 % à 48 h d'exposition quelle que soit la dose de Cd dans la solution nutritive. Contrairement aux feuilles, les racines ont décrit une accumulation importante ( $P > 0,05$ ) de cet oligo-élément dès 12 h de traitement. Cette augmentation a atteint 30%, 60% et 75% en présence, respectivement, de 50, 100 et 200  $\mu M$  de Cd.

Le Cd a provoqué une diminution de la teneur en calcium au niveau des feuilles de *Vicia faba*. En effet, à la fin du traitement (48 h), une dose de 50  $\mu M$  du métal a réduit de 34 % la teneur en calcium. Des concentrations plus sévères (100 et 200  $\mu M$ ) ont provoqué une réduction d'environ 60 % de la teneur en calcium. En ce qui concerne les racines une diminution de 26 % de la teneur en cet élément a été observée suite à des traitements par 100 et 200  $\mu M$  de Cd pendant 48h.

### I.5.1.4. Effet du cadmium sur la photosynthèse :

Ce métal lourd altère l'ultrastructure de chloroplaste et réduit le taux net de photosynthèse, la conductance stomatique et la transpiration des feuilles. En outre, le Cd inhibe la photosynthèse en diminuant la transcription des gènes liés à la photosynthèse (psbA, psaB et rbcL), inactive les enzymes impliquées dans la fixation du  $CO_2$ , induit la peroxydation lipidique et la protéolyse, et perturbe le métabolisme d'azote (N) et du soufre (S) ainsi que les mécanismes antioxydants chez

les plantes (Gallego et al., 2012). L'effet du Cd sur l'activité photosynthétique varie selon l'âge des feuilles, et diminue la teneur en chlorophylle chez le pois (*Pisum sativum L.*), soja, tomate, laitue et pomme de terre (Rizwan et al., 2019).

Les résultats de Xingfeng Zhang et al en 2014 qui étudié l'effet du cadmium sur la croissance, la photosynthèse, la nutrition minérale et l'accumulation de métaux d'une culture énergétique, l'herbe royale (*Pennisetum americanum 3P. Purpureum*), l'effets du stress Cd sur la chlorophylle et la photosynthèse, leurs résultats montrent que la chlorose des feuilles est l'une des conséquences les plus fréquemment observées de la toxicité du Cd. Cependant, les teneurs en chlorophylle des jeunes feuilles de l'herbe royale augmentaient significativement lorsque la concentration de Cd dans le sol était supérieure à 30 mg kg<sup>-1</sup>C, mais les feuilles matures n'étaient pas influencées par le Cd, ce qui est l'inverse de certaines études antérieur.

. En fait, l'influence du Cd sur la chlorophylle des plantes a été trouvée à des concentrations plus faibles dans les jeunes feuilles que dans les feuilles matures. La photosynthèse est très sensible aux métaux lourds dans les plantes supérieures. La pollution par les métaux lourds peut déprimer la photosynthèse des plantes, y compris les taux de photosynthèse, et les paramètres de fluorescence de la chlorophylle. Cependant, peu d'efforts ont été faits pour comparer les effets toxiques des métaux lourds sur la capacité photosynthétique maximale et la capacité d'utiliser la lumière. Le taux de photosynthèse net maximal ( $A_{max}$ ) reflète la capacité photosynthétique maximale de la feuille. Dans cette étude,  $A_{max}$  n'a pas été influencé par le Cd, sauf à 60 mg kg<sup>-1</sup>C.

#### **I.5.1.5. Induction d'un stress oxydatif par le cadmium :**

Plusieurs indications montrent que le cadmium peut induire un stress oxydatif En effet, en présence de cadmium, les plantes produisent des radicaux libres qui sont des formes très réactives de l'oxygène (ROS : Reactive Oxygen Species), capables d'endommager les structures cellulaires (Razinger et al., 2008; Szöllősi et al., 2009 ; Ahmad et al., 2010 ; Martínez Domínguez et al., 2010). Les plus connues de ces formes réactives sont l'ion superoxyde ( $O_2^{\cdot-}$ ), le peroxyde d'hydrogène ( $H_2O_2$ ), le radical hydroxyl ( $\cdot OH$ ) et l'oxygène singul et ( $^1O_2$ ) (Dat et al., 2000 ; Asada, 1999).

Toutes ces formes sont extrêmement. Le peroxyde d'hydrogène est un inhibiteur de certaines enzymes du cycle d'assimilation photosynthétique du carbone (cycle de Calvin-Benson). Les radicaux libres  $\cdot OH$ . sont des oxydants redoutables, capables d'arracher des électrons aux

macromolécules organiques cellulaires, provoquant ainsi la peroxydation des lipides membranaires, la destruction des protéines et la dénaturation de l'ADN des chromosomes.

Une inhibition de la photosynthèse peut également se produire du fait de la destruction de la machinerie photosynthétique (protéines du photosystème II) par les formes actives de l'oxygène singulet ( $^1O_2$ ) (Halliwell et Gutteridge, 1999 ; Dat et al., 2000). Les plantes soumises à un stress oxydatif font appel à des systèmes de défense enzymatiques très efficaces, tels que la superoxyde dismutase (SOD), la catalase (CAT), l'ascorbate peroxydase (APOX), la glutathion réductase (GR), les peroxydases (POD) etc. Ces systèmes de défense enzymatiques permettent de maintenir les formes actives de l'oxygène à des faibles concentrations. Ils sont affectés en présence de cadmium.

Le cadmium inhibe ou stimule les activités des enzymes de défense. Ces modifications sont différentes selon l'espèce étudiée, l'organe, l'âge de la plante et la concentration du cadmium utilisée (Metwally et al., 2003, Milone et al., 2003; Hsu et Kao, 2004; Cho et Seo, 2005 ; Singh et al., 2010 ; Martínez Domínguez et al., 2010).

D'après l'étude qui font par Elvira L. Vukašinović , et al en 2019 sur L'effet d'une exposition à long terme au cadmium sur la croissance, le développement *d'Ostrinia nubilalis*, le taux de survie et le statut oxydatif. Les résultats de l'expérience ont montré que l'exposition à des concentrations plus élevées de Cd (41,71 et 77,53 mg kg<sup>-1</sup>) avait une influence significative sur le développement et le statut redox des larves *d'O.nubilalis* : le taux de développement était fortement réduit, ce qui prolongeait temps de pupaison; le taux de survie des larves était nettement inférieur; le facteur de bioaccumulation (mesuré en pupes) a été réduit, ce qui a indiqué que les larves pouvaient accumuler du Cd à un certain niveau; le niveau de peroxydation lipidique était significativement plus élevé ce qui indique des dommages oxydatifs ; l'expression de Mtn était significativement régulée à la hausse tandis que les gènes Cat et GPx étaient régulés à la baisse. En conclusion, une exposition à long terme au Cd alimentaire à une concentration de 41,7 mg kg<sup>-1</sup> et plus a induit un stress oxydatif et a ralenti la croissance et le développement des larves *d'O. Nubilalis* ».

### **I.5.2. La toxicité du cadmium et ses risques sur la santé humaine :**

Le Cd est un métal lourd toxique très puissant et aussi un contaminant environnemental répandu. Les principales voies d'exposition au Cd chez l'homme sont les voies digestives et respiratoires. Les expositions environnementales et non professionnelles proviennent de divers

aliments, de l'eau contaminée, de la poussière contaminée et de la fumée du tabac et divers dommages biologiques sont causés par la toxicité du Cd (Nemmiche, 2017). Dans le cas d'une accumulation du cadmium dans les strates superficielles des sols, il peut être absorbé par les plantes, ce qui représente un problème majeur pour la santé humaine. Une exposition au cadmium entraîne un grand nombre d'effets nocifs, les lésions rénales et le cancer figurant parmi les plus graves (Godt et al., 2006).

#### **I.5.2.1. La néphrotoxicité du cadmium :**

Le rein est le principal organe cible (Lafon, 2011). Le cadmium est tout d'abord transporté vers le foie où il est absorbé par les hépatocytes peut se lier aux métallothionéines (Cd-MT) du foie et être transporté aux reins via la circulation systémique où ces complexes Cd-MT sont emmagasinés dans les lysosomes où ils seront catabolisés (Goyer et Clarkson, 2001).

#### **I.5.2.2. Effet du cadmium sur le système respiratoire :**

Les poumons constituent la principale voie d'absorption du Cd chez les fumeurs et les travailleurs qui inhalent des poussières et des émanations contenant du Cd (Satarug et Moore, 2004). Il provoque des troubles respiratoires et des œdèmes pulmonaires ainsi qu'une destruction des muqueuses (Zorrig, 2010).

#### **I.5.2.3. Effet du cadmium sur le système reproducteur :**

Le cadmium semble interférer avec la voie stéroïdogénique ovarienne. De faibles concentrations de cadmium stimuleraient la biosynthèse ovarienne de progestérone alors que des concentrations élevées la bloqueraient (Henson et Chedrese, 2004). L'exposition des femmes enceintes au cadmium est associée à un poids de naissance faible et à une augmentation de l'avortement spontané (Frery et al., 1993).

#### **I.5.2.4. La cancérogénicité du cadmium :**

Il existe plusieurs types de mécanismes impliqués dans la cancérogenèse Cd-induite. L'exposition au Cd a été associée aux cancers de poumons, de la prostate, du pancréas, du foie et

des reins (Nawrot et al., 2006). L'IARC (International Agency for Research on Cancer) a en conséquence classifié le cadmium comme un élément carcinogène du groupe I.

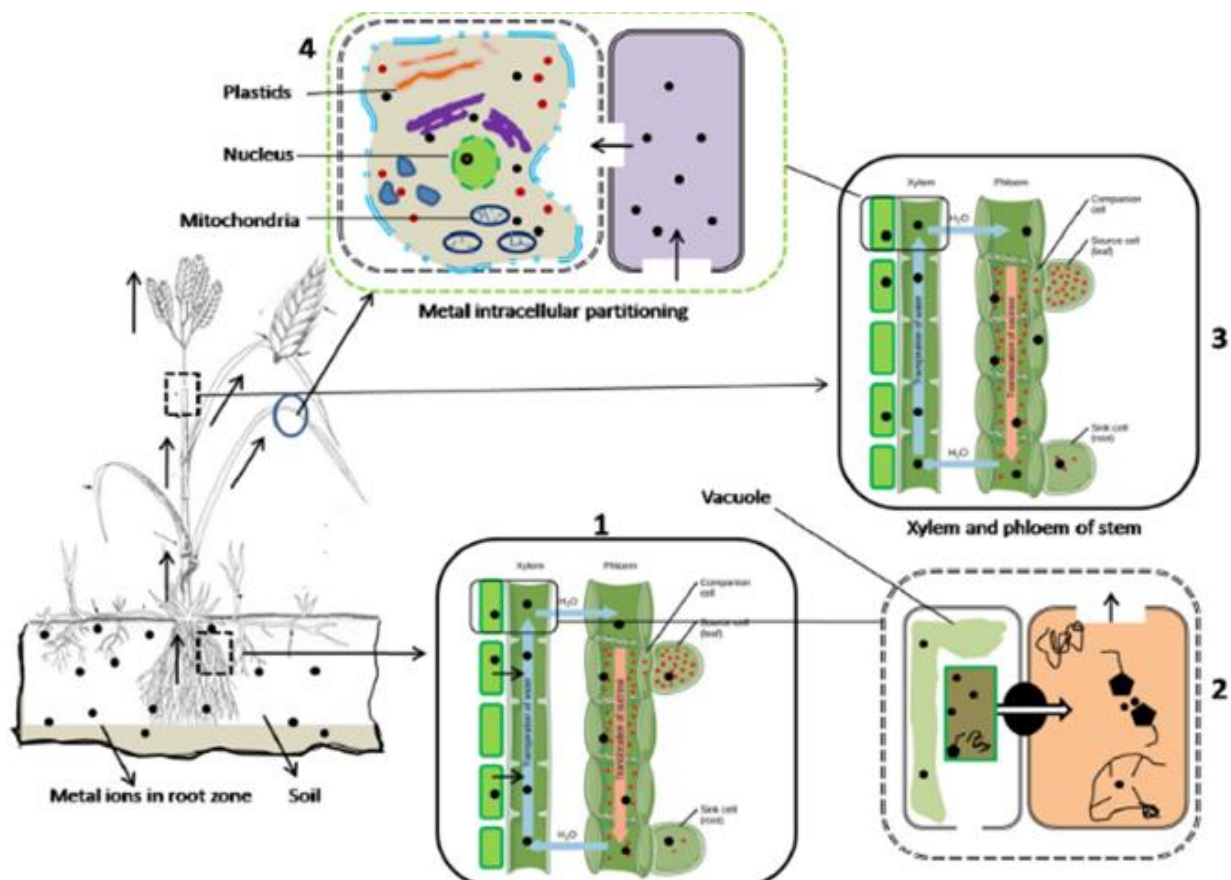
## *Chapitre II :*

### *L'absorption, accumulation et translocation du cadmium chez les plantes*



## I. Introduction :

Les plantes absorbent les éléments essentiels et non essentiels du sol en réponse à un gradient de concentration et/ou absorption sélective d'ions ou par diffusion. Les racines jouent un rôle significatif dans l'absorption des ions métalliques (Figure 2). L'adsorption des éléments traces à la surface de la racine se produit sous forme cationique avec une paroi cellulaire négative en raison de la présence de cellulose, de pectines et de glycoprotéines qui fonctionnent comme des échangeurs d'ions spécifiques (Gupta et al., 2019).



**Figure 2:** Voie principale d'absorption et de transport des métaux dans les plantes (Dal Corso et al. (2014) rapporté par Gupta et al. (2019))

## **II. L'absorption :**

Les métaux lourds toxiques pénètrent dans des cellules végétales par le système de transport impliqués dans l'assimilation micro-nutritive. Particulièrement l'assimilation  $\text{Cd}^{2+}$  arrive par des transporteurs transmembranaires. Les plantes peuvent absorber le Cd selon sa biodisponibilité et sa concentration, à partir du sol ou de l'eau; assez peu absorbé directement de l'atmosphère. Le Cd fait partie des éléments qui peuvent s'accumuler dans ces plantes à des niveaux supérieurs à 0,01 % du poids sec des pousses, sans causer de symptômes de toxicité (Gallego et al., 2012).

### **II.1. Les espèces de cadmium prélevé par les racines:**

On estime que, pour la majorité des métaux, le prélèvement se fait quand ces éléments sont sous forme de cations libres ( $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ) (Hart et al., 1998a ; Hart et al., 1998b). Dans des cas particuliers, d'autres formes interviennent. Comme cela a été brièvement mentionné précédemment, des complexes inorganiques de cadmium ( $\text{CdCl}^+$  et  $\text{CdCl}_2$ ) observés dans les sols salés ou irrigués avec des eaux chlorées pourraient être absorbés (Weggler-Beaton et al., 2000; Weggler et al., 2004) à concentration identique en  $\text{Cd}^{2+}$  dans le milieu, une augmentation du prélèvement de cadmium est observée en présence de chlorures, suggérant soit que le complexe est directement absorbé, soit qu'il participe à la diffusion vers la racine (Smolders et McLaughlin, 1996a ; Smolders et McLaughlin, 1996b). Les sulfates pourraient jouer le même rôle via des complexes  $\text{CdSO}_4$  (McLaughlin et al., 1998a ; McLaughlin et al., 1998b), mais ces résultats n'ont pas été confirmés par d'autres études (Bingham et al., 1986). Il est également possible que des complexes Cd-citrate soient directement absorbés ou participent à l'absorption (Berkelaar et Hale, 2003).

### **II.2. facteurs Influençant la disponibilité du cadmium pour la plante :**

La quantité d'élément en solution est régulée par divers équilibres physico-chimiques, principalement des équilibres de complexation et d'adsorption. On peut donc considérer les facteurs susceptibles d'influer sur la disponibilité de Cd comme ceux capables de modifier ces équilibres.

#### **II.2.1. Facteurs liés au sol :**

La fraction de l'élément total que l'on trouve dans la solution du sol dépend de nombreux facteurs. Le pH est considéré comme étant le principal d'entre eux, car il affecte les mécanismes



d'adsorption sur les particules de sol (Alloway, 1995). Lorsque le pH diminue dans le sol, la fraction de Cd dans la solution du sol augmente, augmentant ainsi la quantité de Cd disponible pour la plante: les ions H<sup>+</sup> sont plus attirés par les charges négatives des particules du sol, et déplacent ainsi le Cd et les autres ions (Alloway, 1995).

Beaucoup d'études ont montré une corrélation négative entre le pH et le Cd accumulé dans la plante (Pageet al.,1981 ; Jackson et Alloway, 1991).Ce trait d'une phytodisponibilité du Cd qui diminue lorsque le pH augmente a récemment été confirmé sur l'hyperaccumulateur Ganges de l'espèce *Thlaspi caerulescens* (Roosen et al.,2003): les concentrations de Cd dans la plante atteignaient 236 mg kg<sup>-1</sup> à pH 5,1 et ne dépassaient pas 121 mg kg<sup>-1</sup> à pH 6,1.

Les autres facteurs de disponibilité du Cd dans la solution du sol sont étroitement liés à la structure et à la composition du sol: sa teneur en argiles, en oxydes de Fe et de Mn, le type et la quantité de colloïdes humiques, les ligands complexants et les intrants (McLaughlin et Singh, 1999).Aussi, le statut du sol en métaux peut favoriser la phytodisponibilité du Cd. Par exemple, il peut y avoir une adsorption préférentielle d'autres métaux sur les particules du sol, favorisant ainsi la concentration du Cd dans la solution du sol (Adriano, 1986).

La concentration en Zn, Pb, Cu et Ni dans le sol se sont avérées affecter le prélèvement du Cd par les plantes (Abdel-Sabour et al, 1988; Cataldo, 1988). Par exemple, un déficit en Zn serait responsable d'une altération du fonctionnement membranaire, causant l'augmentation du prélèvement de Cd (Oliver et al., 1994) dans les grains de blé.

### **II.2.2. Facteurs liés à la plante :**

La plante elle-même peut altérer la disponibilité des éléments de la rhizosphère, en modifiant les équilibres chimiques à la surface de ses racines; ces modifications varient d'une espèce à l'autre, mais également au sein de la même espèce (Foster 1978).

En effet, les racines excrètent des exsudats racinaires capables d'altérer les conditions rhizosphériques et d'augmenter ainsi la disponibilité des nutriments: ces exsudats peuvent acidifier la rhizosphère, favoriser la chélation des ions via des acides organiques ou d'autres phytométallophores (Welch, 1995), mais également altérer le potentiel redox de la rhizosphère par le biais de composés phénoliques (Mench et Martin, 1991).

En outre, les exsudats racinaires peuvent indirectement affecter non seulement l'activité microbienne dans la rhizosphère, mais également les propriétés physiques de la rhizosphère et la croissance racinaire. Autant de paramètres importants pour la disponibilité des éléments.

Le rôle des exsudats racinaires dans l'acquisition des métaux est remarquable. Ils peuvent mobiliser, voire fixer les ETM (Mench et al, 1985). En particulier, les exsudats du maïs mobilisent le Cd (Morel et al, 1986).

### **II.3. Les transporteurs membranaires du Cd :**

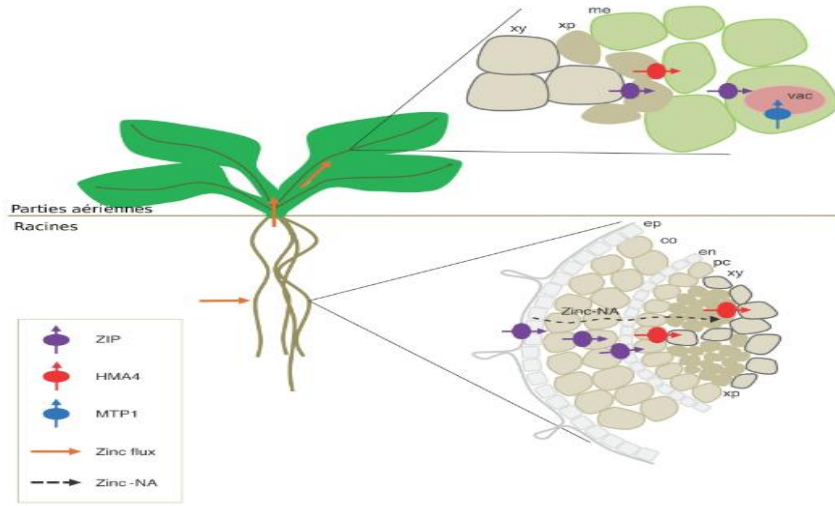
#### **II.3.1. Absorption racinaire :**

À l'exception de son implication dans une enzyme d'une espèce de diatomée marine (Lane et al.2005), aucune fonction biologique du Cd n'est connue. Il est donc peu probable que des transporteurs ayant une spécificité pour un métal non essentiel aient été sélectionnés au cours de l'évolution. Lors du prélèvement racinaire, le Cd emprunte donc des transporteurs membranaires ayant une spécificité vis-à-vis de leur substrat relativement faible (Clemens 2001). Il s'agit de transporteurs des familles ZIP (Zinc regulated transporter (ZRT), Iron regulated transporter (IRT) protein) et Nramp (natural resistance associated macrophage protein).

L'implication de transporteurs IRT1, ZNT1 et AtNramp3 dans le prélèvement du Cd<sup>2+</sup> a été démontrée (Cohenet al.1998; Korshunova et al.1999; Pedas et al.2008; Pence et al.2000; Thomine et al.2000). Il semble également que le transporteur LCT1 facilite également le prélèvement de Cd<sup>2+</sup> (Clemens et al.1998) (**Figure3**).

Bien que non spécifiques du Cd, les transporteurs impliqués montrent une forte affinité pour le métal, ainsi qu'en témoignent les valeurs de Km obtenues lors de diverses études de cinétiques d'absorption, de l'ordre de 0,2 à 1µmol (Cataldo et al.1983; Costa et Morel 1994; Hart et al.1998; Redjala et al.2010a).

Les cinétiques d'absorption présentent une allure biphasique, résultant de la combinaison d'une cinétique de type Michaelis Menten et d'une cinétique linéaire (**Figure4**).

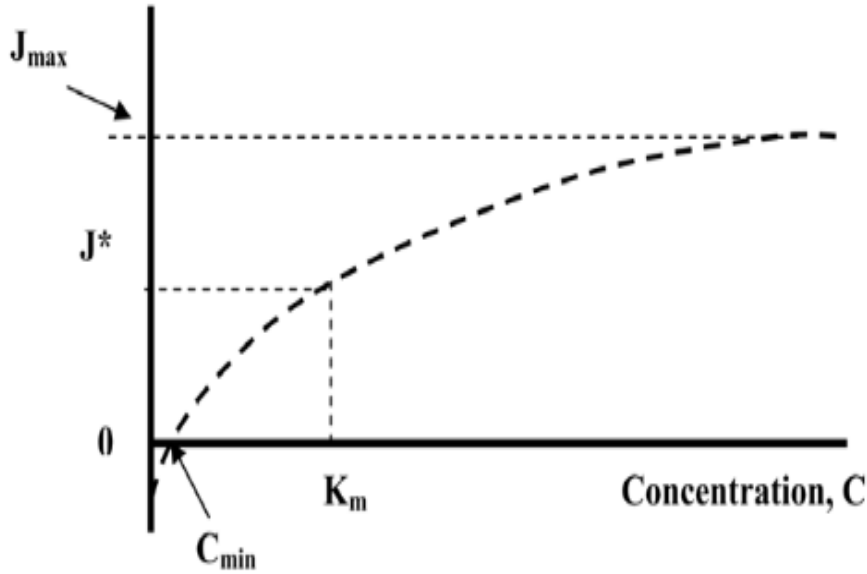


**Figure 3:** Mécanismes impliqués dans l'hyperaccumulation et l'hyper-tolérance du métal, notamment chez *Arabidopsis hanneri* et *Noccaea caerulea*, Figure tirée de Hanikenne et Nouet(2011)

Cette dernière était souvent attribuée à de l'adsorption du  $Cd^{2+}$  sur l'apoplasme et donc à une désorption incomplète avant le dosage du Cd dans la racine (Hartet al.1998; Lombi et al.2001).

Mais cette explication considérée comme incertaine (Welch et Norvell 1999) a été invalidée récemment par Redjala et al. (2009,2010b) à l'aide de mesures du Cd dans le symplasma et l'apoplasme. La composante linéaire correspond bien à de l'entrée de Cd dans le symplasma qui se ferait par l'intermédiaire de systèmes de transport à faible affinité, comme des canaux ioniques pour le  $Ca^{2+}$  (du type HACC) ou le  $Mg^{2+}$  (Welch et Norvell 1999; White et Broadley 2003). Cette composante linéaire ne contribue significativement au prélèvement qu'aux fortes concentrations de  $Cd^{2+}$  dans la solution, impossibles en sol agricole et rares en sol contaminé. La composante michaélienne présente des valeurs de  $V_{max}$  allant de 12 à 188  $nmol\ g^{-2}MF\ h^{-2}$  (Luxet al.2011).

Les valeurs les plus fortes ont été trouvées pour des populations de *Noccaea caerulea* hyperaccumulant le Cd. Lombi et al.(2001) ont mesuré  $K_m$  et  $V_{max}$  des populations Prayon (non accumulatrices de Cd) et Ganges (accumulatrices de Cd) de l'hyperaccumulateur. Ils ont trouvé des valeurs de  $K_m$  identiques mais le  $V_{max}$  de la population Ganges (160  $nmol\ g^{-2}MF\ h^{-2}$ ) nettement supérieure à celui de la population Prayon (33  $nmol\ g^{-2}MF\ h^{-2}$ ).



**Figure 4:** Représentation de la cinétique de type Michaelis-Menten.

Des différences de  $V_{max}$  analogues ont également été trouvées dans la comparaison de populations calaminaire (Viviez) et de serpentine (Vosges) de la même espèce (Redjala et al.2009). La valeur de  $V_{max}$  étant considérée comme proportionnelle à la densité de transporteurs membranaires, la différence d'aptitude de prélèvement du Cd par les populations Prayon et Ganges serait due à une différence d'expression d'un même gène du transporteur ayant une forte affinité pour le Cd. Ce transporteur serait également capable de faciliter l'absorption du Zn quand celui-ci est en plus forte concentration que le Cd (Verbruggen et al.2009). Les résultats de Plaza et al.(2007) suggèrent que, bien que TcIRT1-G puisse être impliqué dans l'hyperaccumulation du Cd par la population Ganges, le transporteur exprimé dans la levure n'a pas une capacité accrue pour le transport de Cd par rapport à AtIRT1. Par conséquent, la capacité de la population Ganges pourrait être due à des niveaux d'expression de la protéine ou d'autres facteurs tels que des interactions entre protéines.

### II.3.2. Efflux racinaire :

L'existence d'un efflux racinaire du Cd a été suggérée d'assez longue date, notamment par Costa et Morel(1993) à partir de cinétiques d'absorption par le lupin blanc (*Lupinus albus*). Cette hypothèse a été renforcée ensuite par des travaux montrant qu'une partie, certes faible, du Cd radioactif déposé sur les feuilles de laitue, radis et haricot était retrouvée dans la terre rhizosphérique (Fismeset al.2005).

Plus récemment, la protéine GFP-AtPDR8, exprimée dans toutes les cellules d'*A. thaliana*, mais plus intensément dans les poils et l'épiderme racinaires, a été désignée comme un transporteur responsable de l'efflux de Cd. Celui-ci appartient à la vaste famille " ATP binding cassettes " (ABC), connue pour transporter une large variété des substances, notamment des ions, des hydrates de carbonés, des lipides, des xénobiotiques, médicaments et métaux toxiques (Kimet al.2007).

### II.3.3. Entrée et sortie de la vacuole :

Dans la littérature, il est difficile de faire une distinction entre racine et parties aérienne sen ce qui concerne la nature des transporteurs du Cd présents dans le tonoplaste. Le cadmium peut passer cette membrane au moyen d'un antiporteur H<sup>+</sup>/cation (Salt et Wagner 1993) du type CAX (comme cation exchanger). CAX4 et CAX2 semblent avoir une forte sélectivité pour Cd<sup>2+</sup>, le premier étant plus exprimé dans les racines et capable également de transporter du Ca<sup>2+</sup> (Korenkov et al.2007). Ces transporteurs, en favorisant la séquestration du métal dans les racines, réduiraient sa translocation vers les parties aériennes (Korenkovet al.2009). AtHMA3, localisé dans le tonoplaste des cellules de garde, des hydathodes, des tissus vasculaires et des apex des racines, participe également au stockage du Cd dans les vacuoles, et donc à la tolérance du métal (Morelet al.2009). C'est d'ailleurs par une mutation entraînant une perte de fonctionnalité du transporteur OcHMA3 dans les racines qu'est expliquée la plus grande accumulation de Cd dans les parties aériennes de la variété de riz Jarjan (Uenoet al.2011a).

D'autres résultats montrent que TchMA3, localisé dans le tonoplaste, serait responsable de la séquestration du Cd dans les vacuoles des cellules foliaires de *N. caerulescens* et que son expression plus importante expliquerait l'hyperaccumulation de Cd par certaines populations (e.g. Ganges) de cette espèce (Uenoet al.2011b). Un transporteur de la famille des ABC, le transporteur AtMRP3est également responsable du stockage de Cd dans la vacuole, mais cette fois sous forme de complexe avec une phytochélatine ou du glutathion (Clemens 2006 ; Cobbett 2000; Tommasiniet al.1998). Une fonction similaire a été mise en évidence pour le transporteur AtMRP7 (Wojaset al.2009), qui se révèle ici encore, en même temps qu'une voie pour la séquestration vacuolaire, un facteur pour la répartition du Cd entre racines et parties aériennes. L'efflux de Cd de la vacuole pourrait être contrôlé par un transporteur de la famille des NRAMP, connus pour transporter des métaux comme le Fe, le Mn ou le Cd dans divers organismes.

Des travaux récents suggèrent sans le démontrer que AtNRAMP3 pourrait être impliqué dans l'extrusion du Cd de la vacuole (Thomineet al.2003). À ces résultats semblent s'opposer ceux

d'Oomen et al. (2009) qui considèrent que les TcNRAMP3 et TcNRAMP4 joueraient un rôle indirect sur la tolérance de *N. caerulescens* au Cd, en régulant l'homéostasie d'autres métaux essentiels (Fe, Mn).

### **II.3.4. Déversement dans le xylème :**

Au début des années 2000, On savait que le déversement des éléments en traces dans le xylème, et donc la translocation vers les parties aériennes était étroitement contrôlé mais aucun transporteur déversant des ions dans le xylème n'avait été identifié (Clemens et al.2002). Depuis, plusieurs types de transporteurs ont été identifiés. Les plus étudiés sont les PIB type ATPases, également désignés par HMAs (heavy metal transporting ATPases). Il s'agit d'enzymes capables de transporter des ions de métaux de transition contre leur gradient électrochimique en utilisant l'énergie fournie par l'hydrolyse de l'ATP. Elles comprendraient deux groupes: celui des transporteurs de cations monovalents (Ag, Cu) et celui des transporteurs de cations divalents (Zn, Co, Cd, Pb).

HMA4, localisé sur la membrane plasmique, notamment des cellules racinaires, s'est révélé avoir un rôle dans la tolérance, la translocation et l'hyper accumulation de Zn et Cd. Ce gène a été étudié dans *A. thaliana*, *A. halleri*, *A. lyrata* et *N. caerulescens* (Verbruggen et al.2009). Il est considéré comme le principal responsable du déversement du Zn et du Cd dans le xylème de l'hyperaccumulateur *N. caerulescens*, favorisant leur transfert dans les parties aériennes où ils sont détoxifiés, les deux processus - translocation et détoxification dans les parties aériennes accrues - étant à l'origine de l'hypertolérance et hyperaccumulation (Guimarães et al.2009 ; Milner et Kochian 2008). En outre, le transporteur HMA2 contribue également à la translocation du Cd, ainsi que cela a été mis en évidence chez *A. thaliana* (Wong et Cobbett 2009).

Plus récemment, il a été proposé que la protéine OsHMA2 soit impliquée dans le déversement du Cd dans le xylème du riz (Nocito et al.2011). D'autres transporteurs, FRD3 de la famille MATE et YSL de la famille OPT seraient susceptibles de déverser les métaux dans les tissus vasculaires, mais ils ne semblent pas impliqués dans le transport du Cd (Gendreau et al.2007 ; Verbruggen et al.2009), peut-être parce que ce métal n'a pas toujours été testé (Araki et al.2011).

## **II.4. Rôle de l'apoplasme :**

### **II.4.1. Transport par l'apoplasme :**

L'apoplasme racinaire est une voie pour le Cd<sup>2+</sup> et pour ses complexes d'atteindre le xylème, dans les parties de la racine où les barrières apoplasmiques (bande de Caspary, lamelle de

subérine, épaissement secondaire) de l'exoderme et/ou de l'endoderme sont absentes ou incomplètes.

C'est une hypothèse théorique qui découle de la structure des racines mais qui n'a pas été directement prouvée pour le Cd, pas plus d'ailleurs que pour des cations majeurs comme le  $Ca^{2+}$ ; les indices de ce processus sont indirects (White 2001). Une des zones de passage apoplasmique vers le xylème serait l'apex racinaire, où les barrières apoplasmiques ne sont pas encore formées. Cette hypothèse est soutenue par des travaux ayant montré un influx de Cd plus important le long des quelques millimètres à l'extrémité de la racine de *N. Caerulescens* (Pinerose et al. 1998) ou de blé dur (Berkelaar et Hale 2000). Par ailleurs, Redjala et al. (2011) ont montré que les racines de jeunes plants de maïs ayant poussé en hydroponie présentent un exoderme et un endoderme incomplètement formés sur 30 % de leur longueur à partir de l'apex, alors que celles ayant poussé en aéroponie ou en sol voient leur barrières complètement formées quasiment jusqu'à l'apex. Il se trouve que le prélèvement de Cd par le maïs en hydroponie est nettement plus important que celui en aéroponie, ce qui pourrait s'expliquer par une différence de prélèvement apoplasmique. Les autres zones de faiblesse des barrières apoplasmiques seraient celle de l'endoderme au stade I, qui ne serait pas complètement imperméable aux cations et les zones où l'endoderme est perforé par l'émergence des racines latérales (White 2001).

Les contributions relatives des voies symplasmique et apoplasmique au déversement du Cd dans le xylème sont inconnues. Les travaux de Redjala et al. (2009, 2010a) ont montré qu'en ce qui concerne le prélèvement par la racine, l'adsorption apoplasmique était très minoritaire par rapport à l'absorption symplasmique pour les concentrations d'exposition rencontrées dans les sols. Par contre, il est probable que le prélèvement apoplasmique augmente de façon linéaire avec la concentration de Cd en solution, ainsi que le suggèrent les travaux sur le prélèvement des complexes de Cd-EDTA (Custose et al. 2012). Nous avons d'ailleurs montré ci-dessus que l'hypothèse d'absorption apoplasmique des complexes de Cd avec des ligands comme le citrate ou l'EDTA est plausible. Il est difficile d'avoir une vision claire du transport apoplasmique de Cd dans les parties aériennes. On sait que le métal est retrouvé dans les parois cellulaires des feuilles (voir ci-après) et il est plausible qu'il migre dans les feuilles vers l'épiderme par advection dans le réseau des parois cellulaires parcourues par le flux de transpiration.

#### **II.4.2. Stockage et détoxification dans l'apoplasme :**

Des travaux sur l'avoine ont montré que la variété la plus résistante au Cd était également celle qui stockait le plus de métal dans les parois cellulaires des parties aériennes (Uraguchi et al. 2009b).

Cette localisation est donc considérée, avec la séquestration vacuolaire, comme un moyen de détoxification du Cd (Nocito et al. 2011).

C'est ce que suggèrent également les travaux de Sterckeman et al. (2011) qui montrent que la fraction apoplasmique du Cd racinaire, chez le maïs et le tabouret calaminaire (nom vernaculaire pour *N. caerulescens*) augmente après une exposition à de fortes concentrations de Cd. Cosio et al. (2005) ont montré que 33 à 35 % du Cd des parties aériennes de *N. caerulescens* se trouvait dans les parois cellulaires. Dans le cas du saule (*Salix* spp) fortement exposé au Cd au point de montrer d'importantes nécroses, le métal a notamment été localisé dans la couche de pectine des parois cellulaires du collenchyme proche des nervures foliaires (Vollenweider et al. 2006).

## **II.5. Complexations du Cd dans le cytoplasme :**

Dans les cellules végétales, le Cd est potentiellement complexé par le glutathion, les phytochélatines, les métallothionéines, l'histidine et divers acides carboxyliques (Clemens 2006; Verbruggen et al. 2009). Ce processus est considéré comme un moyen de détoxification, même si les connaissances sur les ligands impliqués sont encore incomplètes. Les complexants sont susceptibles de varier selon l'espèce végétale, son stade et la localisation dans celle-ci (Clemens 2006; Verbruggen et al. 2009).

Le glutathion (GSH) est un peptide (Glu-Cys-Gly) qui peut complexer divers métaux. Il est également le précurseur de la synthèse enzymatique des phytochélatines (PC), dont la formule générale est (Glu-Cys) nGly, où n=2-11. Dans de nombreuses espèces végétales, la synthèse de phytochélatines est induite par une exposition au Cd (Clemens 2006; Cobbett 2000; Ernst et al. 2008; Persson et al. 2006; Salt et al. 1995b; Schat et al. 2002). Dans les feuilles et les pétioles de l'hyperaccumulateur, comme dans les racines de la moutarde brune, du Cd s'est révélé lié à du S qui pourrait être celui des molécules de phytochélatine (Kupper et al. 2004; Salt et al. 1995b). Des mutants d'*Arabidopsis thaliana*, déficients dans la synthèse des phytochélatines, montrent une faible tolérance au Cd que les plantes de type sauvage, alors que les mutants ayant une synthèse des phytochélatines renforcée peuvent faire preuve de tolérance plus élevée de Cd que les plantes sauvages (Clemens 2006; Cobbett 2000).

Les phytochélatines seraient également à l'origine d'une plus grande tolérance de certaines variétés d'orge au Cd (Persson et al. 2006). Le modèle suivant de complexation du Cd dans les cellules racinaires peut être proposé (Clemens 2006; Cobbett 2000) : une fois dans le cytosol, le Cd<sup>2+</sup> est complexé par du glutathion pour former des complexes bisglutathionato Cd (GS<sub>2</sub>-Cd(II)) mais également d'autres complexes avec des molécules inconnues. GS<sub>2</sub>-Cd(II) interagit avec la



phytochélatinesynthase, une enzyme constitutivement exprimée, ce qui déclenche la synthèse de phytochélatine et la formation de complexes de PC-Cd(II). Ceux-ci passent ensuite dans la vacuole via un transporteur de type ABC. A l'intérieur de la vacuole, des complexes de haut poids moléculaire, inconnus, transitoires et contenant des sulfures (HMW-Cd) sont formés. Ceux-ci peuvent être dissociés, le Cd<sup>2+</sup> retournant dans le cytosol par le biais d'un transporteur de type AtNRAMP3 et formant à nouveau des complexes GS2-Cd(II) et PC-Cd(II). Les premiers seraient dissociés pour permettre le déversement de Cd<sup>2+</sup> dans le xylème via HMA4. PC-Cd(II) pourrait être déversé directement dans le xylème grâce un transporteur encore inconnu.

Un schéma proche est proposé pour assurer la tolérance du Cd par la plante et donc par les parties aériennes où la vacuole demeure la destination finale pour les substances toxiques auxquelles les plantes sont exposées (Clemens 2006). Dans les cellules des feuilles par exemple, le Cd<sup>2+</sup> formerait du GS2-Cd(II) puis du PC-Cd(II) qui serait déversé dans la vacuole via un transporteur (voir ci-dessus) et dissocié à la faveur de la formation de (HMW-Cd). Cependant, s'il s'avère que les PC sont responsables de la détoxification du Cd chez les espèces végétales non adaptées à l'exposition à ce métal (espèces sensibles non accumulatrices), ces chélatants ne sont pas impliqués dans l'hypertolérance et hyperaccumulation de Cd (Ernst et al.2008 ; Schat et al.2002 ; Sun et al.2007 ; Verbruggen et al.2009). En conditions non contrôlées, leur niveau reste en effet faible dans les tissus des plantes hypertolérantes aux métaux installées sur des sols enrichis en ces éléments (Ernst et al.2008). Ceci suggère l'existence d'autres mécanismes de détoxification du Cd permettant l'adaptation de certaines espèces à des expositions très élevées. L'exposition au Cd est responsable d'une augmentation du métabolisme du soufre et du glutathion de *N. caerulea* (Van De Mortel et al.2008) alors que chez *Sedum alfredii*, l'hypertolérance et l'hyperaccumulation de Cd semblent plus liées à la présence de GSH que de PC (Sun et al.2007).

Les métallothionéines (MT) sont des protéines ubiquistes, riches en cystéines, qui présentent la capacité de se lier aux métaux au niveau des groupements thiols de la cystéine. Leur rôle de détoxification du Cd mis en évidence dans les cellules de mammifères, a pu être reproduit dans des microorganismes (levures et bactéries), notamment par transplantation de gènes des synthèses de MT d'*A. thaliana* (Clemens 2001). Cependant, leur implication dans l'homéostasie du Cd n'a pas été clairement montrée directement sur la plante. Un mutant *mt1a-2 mt2b-1* de *A.thaliana* (ne produisant pas de MT) n'apparaît pas plus sensible au Cd. Toutefois, lorsque la déficience en MT est combinée à celle en phytochélatines, le triple mutant *mt1a-2 mt2b-1cad1-3* devient plus sensible au Cd que le mutant *cad1-3* (Guo et al.2008). Les MT semblent également impliquées

dans la tolérance du Cd par le blé et le riz, en combinaison avec un autre gène, celui codant pour le Heat shock transcription factor A4a (HsfA4a) (Shimet al.2009).

Enfin, les MT ne semblent pas être impliquées dans l'hyperaccumulation ou de l'hypertolérance du Cd (Verbruggenet al.2009). L'histidine est un acide aminé capable de complexer les métaux dont le Cd, présent en fortes concentrations dans les racines des hyperaccumulateurs et impliqué dans l'hyperaccumulation de Ni. Son implication dans l'homéostasie du Cd n'a cependant pas été observée (Verbruggenet al.2009).

Les acides organiques, tels que le malate, le citrate ou l'oxalate présentent une capacité à se lier aux métaux et des concentrations notables dans les végétaux. Cependant, leur rôle dans la tolérance ou le transport de Cd n'a pas été clairement établi.

## **II.6. Spéciation dans le xylème :**

D'après le pH et la composition de la sève brute, le Cd pourrait se trouver dans le xylème sous forme libre ou de divers complexes présentant des groupements sulfhydryles, ou à base de N ou de O ; de ce fait, Cd pourrait être lié à des acides carboxyliques, des acides aminés et des molécules contenant de la cystéine comme le GSH ou les PC (Welch et Norvell 1999). Les données expérimentales sur la spéciation du métal dans la sève brute sont peu nombreuses et généralement indirectes. L'acide citrique favorise la translocation du Cd dans la tomate, ce qui pourrait être dû à son association avec le métal dans le xylème (Senden et al.1995).

D'après Ueno et al.(2008), le Cd serait essentiellement sous forme d'ion libre dans la sève de l'hyperaccumulateur de Zn *A. halleri*. Cependant, dans la tige de *N. caerulea*, du Cd a été trouvé en association avec du S, suggérant sa complexation par des ligands tels que les phytochélatines (Kupper et al.2004). Cataldo et al.(1988) ont trouvé le Cd en association avec la fraction des acides aminés et de peptides dans la sève brute du soja.

## **II.7. Facteur de transfert de cadmium vers la plante :**

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 rapport entre la concentration dans les plantes et celle dans le sol où ont poussé les plantes, et calculé comme suit (Zheng et al., 2007) :  $FBC = [cd] \text{ racine} / [cd] \text{ sol}$ .

### III. Translocation :

Après son efflux dans le xylème, le cadmium, libre et lié aux phytochélatines, est transporté vers les parties aériennes de la plante par la sève xylémienne (Salt et al., 1995b ; Gong et al., 2003). Dans les plantes normales, la teneur en Cd des feuilles est comprise entre 0,1-3 µg / g M.S., chez les plantes qui l'excluent, elle est de 0,03 µg / g M.S. et chez les plantes accumulatrices, de 20 µg / g MS. (Reeves et Baker, 2000).

La plus grande partie du cadmium accumulé reste dans les racines, seules de petites quantités sont transportées vers les parties aériennes. Ainsi, chez le blé, 78 % du cadmium sont retenus dans les racines (Zhang et al., 2000).

En général, la teneur en cadmium des graines > fruits > feuilles > tiges > plantes diminue dans l'ordre suivant : racines L'accumulation de cadmium dans les fruits reste controversée. Pour Moral et al (1994), bien que le cadmium soit facilement transporté vers les parties aériennes des plants de tomate, aucune détection de Cd n'était faite dans les fruits. A l'opposé, Wenzel et al, (1996) et Hart et al. (1998) émettent l'hypothèse d'une accumulation de cadmium dans les fruits, pouvant résulter d'une redistribution par le phloème.

#### III.1. Facteur de translocation de cadmium :

Le facteur de translocation correspond à la concentration dans les parties aériennes divisée par la concentration dans les racines : facteur de translocation = [Cd] partie aérienne/ [Cd] racines

### IV. Accumulation du cadmium :

Certaines plantes accumulent des quantités inhabituelles d'éléments métalliques 100 mg/kg de matière sèche pour le Cd, 1000 mg/kg pour le Ni. Ces espèces sont alors qualifiées de plante « Hyperaccumulatrice »(Brooks, 1998). Ainsi, plus de 400 espèces hyperaccumulatrices sont recensées, dont plus de 300 pour le nickel et seulement une pour le cadmium. (Boyd, 1998), il est encore impossible d'attribuer ce phénomène à un avantage sélectif quel qu'il soit. Dans la cellule, les métaux ayant pénétré dans le cytoplasme sont pris en charge par diverses molécules afin de les stocker ou d'éviter tout dommage cellulaire (Greger,1999).

Le facteur de bioconcentration (BCF) et le facteur de bioaccumulation (BAF) sont deux paramètres utilisés pour la mesure des concentrations d'un polluant dans l'organisme (Bodin, 2005).

#### **IV.1. Variabilité interspécifique d'accumulation de cadmium :**

Il a été clairement démontré que la capacité d'accumulation de cadmium était dépendante de la famille végétale (Kuboi et al., 1986) et de l'espèce (Coullery, 1997). Parmi les plantes consommables, aucune ne peut être classée dans la catégorie des plantes hyperaccumulatrices de cadmium. Les plantes cultivées les moins accumulatrices de cadmium sont les Légumineuses.

Les Poacées, les Liliacées, les Cucurbitacées et Apiacées sont moyennement accumulatrices. Les Chénopodiacées (épinard, betterave), les Brassicacées (chou, navet, radis) et les Astéracées (laitue) sont les plus accumulatrices (Kuboi et al., 1986). Cette hiérarchie est différente si on s'intéresse à d'autres métaux: à titre d'exemple, pour le nickel, une Légumineuse telle que le haricot est fortement plus accumulatrice que la carotte (Ombellifère) ou la laitue (Astéracées) (Coullery, 1997).

#### **IV.2. Variabilité intra spécifique d'accumulation de cadmium :**

Des différences d'accumulation ont été observées entre différentes variétés d'une même espèce végétale. Par exemple, la concentration en cadmium varie d'un facteur 2 au sein de l'espèce "pomme de terre" (McLaughlin et al., 1994), d'un facteur supérieur à 2 chez la laitue (Costa et Morel, 1994a; Florijn et al., 1991), d'un facteur compris entre 2 et 6 suivant les années chez le blé tendre (Vinkel, 2001), d'un facteur 3 chez le blé dur, d'un facteur 4 dans le grain de tournesol et d'un facteur 10 dans la graine de lin (Li et al., 1997) ou 11 dans des plantules de maïs (Florijn et Vanbeusichem, 1993). Il apparaît cependant que les différences intervariétales varient en fonction des conditions de culture. Chez la laitue, il a été montré que les différences intervariétales étaient importantes quand les plantes sont cultivées sur des sols très faiblement contaminés alors que ces différences s'estompent quand les plantes sont cultivées sur des sols fortement contaminés par le cadmium (Florijn et al., 1991; Costa et Morel, 1994a). Chez le blé les différences variétales d'accumulation de cadmium sont fonction du sol et du niveau d'exposition (Vinkel, 2001). Ces différences peuvent ainsi varier d'un site à un autre ou d'une année à une autre (Vinkel, 2001).

#### **IV.3. Variabilité d'accumulation de cadmium entre les organes :**

Comme cela a été mentionné, l'accumulation de cadmium diffère considérablement selon les organes et les tissus d'une même plante, par exemple entre les racines et les parties aériennes, et la

distribution des teneurs en cadmium est elle-même fortement variable à la fois entre espèces et entre variétés au sein d'une même espèce. Aucun lien évident ne peut être établi entre la facilité à accumuler le cadmium et la répartition du cadmium entre organes (Wagner, 1993 ; Clemens, 2006). À l'échelle de la plante entière, il y a généralement moins de Cd dans les feuilles que dans les racines, et encore moins dans les fruits et dans les graines (Wagner, 1993).

Jarvis et al (1976) ont remarqué que chez 20 espèces végétales, la quantité de cadmium retenu par les racines dépasse la moitié de la quantité totale absorbée par la plante. Chez *Azolla filiculoides*, les niveaux d'accumulation du Cd<sup>2+</sup> sont au moins deux fois plus élevés dans les racines que dans les parties aériennes (Sela et al., 1989). Le même résultat a été observé chez le riz (Ros et al., 1992), le petit pois (Chugh et al., 1992) et la laitue (Costa et Morel, 1994b). Cependant, chez certaines espèces, le cadmium peut s'accumuler fortement en dehors des racines. C'est par exemple le cas du tabac qui accumule dans ses feuilles plus de 80% du cadmium prélevé par les racines (Elmayan et Tepfer, 1994). C'est aussi le cas des espèces sauvages dites hyperaccumulatrices: *A. halleri* et *T. caerulescens* (Lombi et al., 2000 ; DahmaniMüller et al., 2001 ; Wojcik et al., 2005).

#### **IV.4. Accumulation du cadmium à l'échelle cellulaire :**

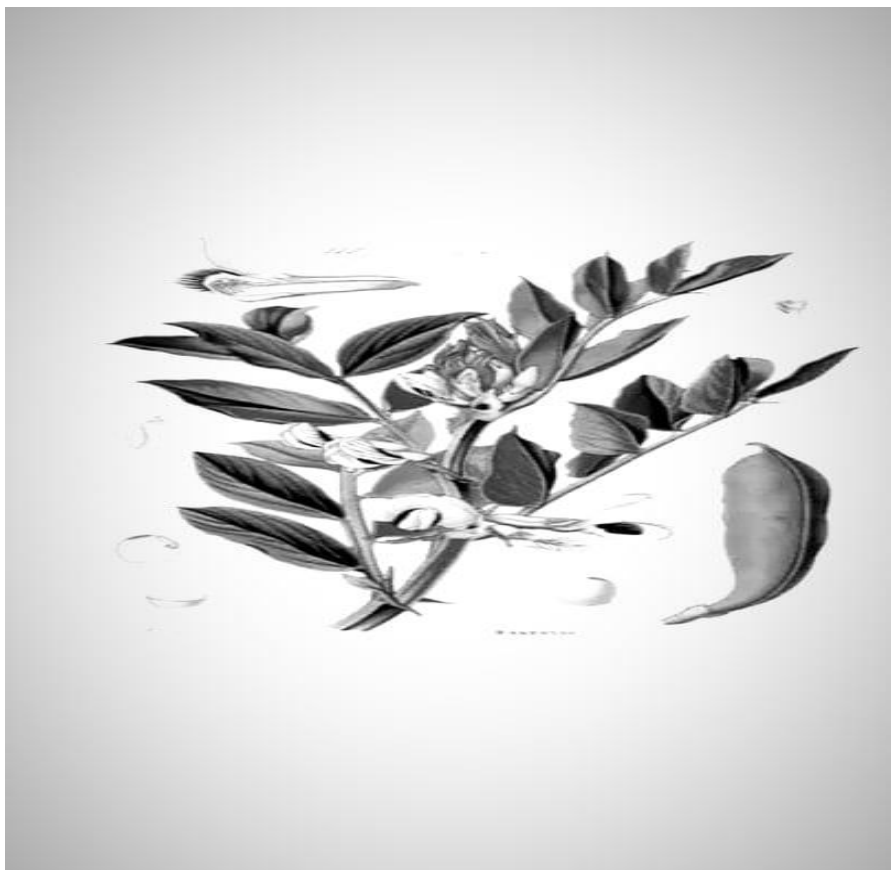
À l'échelle cellulaire, la localisation du cadmium est encore mal connue. Deux compartiments cellulaires semblent jouer un rôle important dans le stockage et la localisation du cadmium: les parois cellulaires et les vacuoles. Selon les plantes et les techniques utilisées, les auteurs ont mis en évidence que le cadmium est: soit associé à des granules dans les vacuoles, le cytoplasme, les plastes ou le noyau (Vazquez et al., 1992), soit lié aux parois cellulaires (Lozano-Rodriguez et al., 1997; Ramos et al., 2002), soit présent dans différents types de structures simultanément (DahmaniMüller, 2000). Ramos et al. (2002) ont quantifié cette répartition dans les feuilles de laitue: 63-64% du cadmium est lié aux parois cellulaires alors que 13 à 25 % est localisé dans le protoplasme et 6 à 16 % dans les chloroplastes. En fait, ces différences semblent liées au niveau de contamination considéré.

Des micro analyses aux rayons X des racines de *Zea mays* et d'*Agrotis gigantea*, ont montré que Cd<sup>2+</sup> s'accumule sous forme de granules au niveau du cytoplasme et de la vacuole des cellules matures différenciées et dans le noyau des cellules indifférenciées (Rauser et Ackerly, 1987). Utilisant la technique de fractionnement cellulaire, Weigel et Jager (1980) ont montré que chez le haricot, le Cd<sup>2+</sup> se localise au niveau du cytoplasme aussi bien dans les cellules foliaires

que dans les cellules racinaires alors qu'une très faible partie du cadmium est retenue par les parois des cellules des deux types d'organes. Cependant, en utilisant la technique d'analyse aux rayons X, Vazquez et al. (1992) ont observé que chez la même espèce, le  $Cd^{2+}$  s'accumulait principalement dans la vacuole et le noyau, et en faible quantité dans le cytoplasme et les plastes.

## *Chapitre III:*

### *La fève ( vicia faba )*



## Généralités sur la fève (*Vicia faba*.L)

### I. Description botanique de la fève :

La fève est une plante diploïde ( $2n = 12$  chromosomes) et partiellement allogame (Wang et al 2012). Elle est formée d'un appareil végétatif et d'un appareil reproducteur. L'appareil végétatif comprend : les racines, la tige et les feuilles quand son appareil reproducteur, il est formé par les fleurs qui sont l'origine des fruits et des graines.



**Figure 5:** Les différentes parties de la fève *Vicia faba* L.(Thomé 1885).

#### I.1. Les racines :

Selon Duc (1997), le système racinaire de *V. faba* L est formé par une racine principale pivotante et des racines secondaires portant des nodosités contenant des bactéries fixatrices d'azote (*Rhizobium leguminosarum*). D'après Chauv et Foury (1994), le système racinaire de la fève peut s'enfoncer jusqu'à 80 cm de profondeur, les nodosités sont abondantes dans les 30 premiers centimètres.

#### I.2. La tige :

La tige est simple, dressée, creuse, de section quadrangulaire, sa hauteur est généralement comprise entre 0,80 à 1,20 m (Chauv et foury, 1994). La tige est pourvue d'un ou plusieurs rameaux la base et présente un type de croissance indéterminé (Duc, 1997 : Brink et Belay, 2006).



### **I.3. Les feuilles :**

Les feuilles sont alternes, composées-pennées, constituées par 2 à 4 paires de folioles ovales, mucronées, sans vrille, de couleur vert glauque ou grisâtre. Les stipules bien visibles en forme dentées (Chaux et Foury, 1994).

### **I.4. Les fleurs :**

Les fleurs sont de type papilionacé, de 2 à 3 cm de long, de couleur blanche, marron ou violette et portent sur chaque aile une macule noire ou marron (Duc, 1997). L'inflorescence est en grappe axillaire de 1 à 6 fleurs. Les fleurs sont constituées d'un calice à 5 sépales, d'une corolle blanche à pétales (la carène, les ailes et l'étendard), de 10 étamines dont 9 sont soudées et 1 libre. L'ovaire est supère et sessile avec 2 à 4 ovules allant parfois jusqu'à 9. La floraison débute en moyenne au niveau du 7<sup>ème</sup> nœud et continue jusqu'aux 20 nœuds suivants (Brink et Belay, 2006). Girard (1990) rapporte qu'il n'y a pas d'inflorescence terminale ce qui fait que la floraison est en principe indéfinie. La reproduction chez la fève peut être selon les lignées autogame ou allogame, mais l'activité de butinage des abeilles sur la fève assure une pollinisation croisée et améliore significativement la production de la plante par rapport à l'autofécondation (Benachour et al., 2007). Selon Chaux et Foury (1994), la fève est allogame pour 40 à 60 % de sa floraison, la pollinisation est essentiellement assurée par les boudons, ce qui engagera à prendre des précautions dans le choix des produits de traitements effectués durant la floraison.

### **I.5. Les fruits :**

Les fruits sont des gousses charnues qui peuvent avoir de 10 à 20 cm de long selon les variétés et contenir un nombre variable de graines (4 à 9). A l'état jeune, les gousses sont de couleur verte puis noircissent à maturité (Chaux et Foury, 1994). Les gousses sont pourvues d'un bec et elles sont renflées au niveau des graines (Brink Belay, 2006) et Belay, 2006)

### **I.6. Les graines :**

Les graines sont charnues, de couleur vert tendre à l'état immature, elles développent, à complète maturité, un tégument épais et coriace de couleur brun rouge à blanc verdâtre et prend une forme aplatie à contour presque circulaire ou réniforme (Chaux et Foury, 1994). Les graines possèdent un hile clair ou de couleur noire parfois entouré de taches de couleur marron (Duc, 1997). Chaux et Foury (1994) rapportent que la faculté germinative de la graine peut se maintenir 6 à 10 ans et même au-delà et que la graine est à germination hypogée c'est-à-dire que les cotylédons restent en terre et c'est l'épicotyle qui émerge du sol.

## II. L'origine et évolution :

La fève aurait cultivée dès la fin du néolithique, elle a constitué durant toute l'antiquité et le moyen Age, une base alimentaire importante jusqu'au développement du haricot et de la pomme de terre (Hullé et al ., 1999).

D'après Saxena (1994), la fève a été domestiquée très tôt dans le monde. Bien que son origine ne soit pas encore claire, il a été longtemps pensé qu'elle était originaire de la méditerranée ou de l'Asie de l'Oest. D'autres auteurs comme Nuessly et al. (2004); Mikic (2011), la considèrent originaire d'Asie centrale). Cependant, de récentes découvertes archéologiques à Tell el-kerkh dans le Nord-Ouest de la Syrie ont montré que la fève daterait de la fin du 10ème millénaire avant Jésus-Christ, ce qui indique que le Sud-Ouest de l'Asie est le principale centre d'origine et de diversité de *V.faba L* (Duc et al ., 2010). Selon Cubero (2011), le centre d'origine de *V.faba L*, serait le Proche-Orient, cette plante aurait été disséminées d'abord vers l'Europe centrale et la Russie puis vers l'Est de la méditerranée et à partir de l'Egypte et les cotes Arabes vers l'Abyssine puis de la Mésopotamie vers l'Inde et la Chine. Au cours du 16èmes siècle, la culture de la fève a été introduite en Amérique par les Espagnoles et vers la fin du 20 siècle, elle a réussi à atteindre l'Australie. La forme ancestrale de *V.faba L*, est inconnue, mais le plus proche parent sauvage de la fève est supposé être l'espèce *Vicia Pliniana* d'Algérie (Duc et al., 2010).

## III. Classification de la fève :

Selon Dajoz (2000) et Mezani (2011), la fève est classée botaniquement comme suit :

- ❖ Règne : Plantes
- ❖ Embranchement : Spermaphytes
- ❖ Sous-embranchement : Angiospermes
- ❖ Classe : Dicotylédones
- ❖ Sous-classe :Dialypétal.
- ❖ les Série : Caliciflores
- ❖ Ordre : Rosales
- ❖ Famille : Fabacées (Légumineuses)
- ❖ Sous-famille : Faboideae
- ❖ Genre : *Vicia*
- ❖ Espèce : *Vicia faba L.*

#### IV. Les variétés de la fève :

Il en existe 2 sous-espèces, paucijuga et eu faba. Dans la sous-espèce eu -faba qui nous intéresse, on dénombre 3 groupes définis par la taille des graines le premier groupe comporte des graines petites (*Vicia faba minor*) correspond au terme féverole utilisée pour l'alimentation du bétail, le deuxième groupe est défini par des graines moyennes (*Vicia faba equina*), et il est également destiné à l'alimentation du bétail et le troisième groupe est caractérisé par de grosses graines que l'on appelle communément fève (*Vicia faba majora*) destinées à la consommation humaine (Gallais et Bannerot, 1992).

Il existe quatre variétés de fève :

##### IV.1. Variétés très précoces :

On rencontre dans ce groupe le type Muchaniel. Elle a des gousses de couleur vert clair, de 20cm de longueur en moyenne, renfermant 5 à 6 graines blanches, elle est très productive.

##### IV.2. Variétés précoces :

On rencontre dans ce groupe la Séville à gousses longues, renferment 5 à 6 graines volumineuses. Sa tige est d'une hauteur de 70cm, se distinguant des autres variétés par la couleur de son feuillage, d'un vert assez franc (Chaux et Foury, 1994). Ses gousses présentent une largeur d'environ 3cm et une longueur de 25 cm (Laumonier, 1979).

##### IV.3. Variétés demi-précoces :

Les variétés demi-précoces appartiennent au type fève d'Aguadulcé, elles sont caractérisées par une plante de végétation haute de 1,10 à 1,20m, et possèdent des gousses volumineuses et très longues, renferment 7 à 9 graines. C'est une variété très productive (Chaux et Foury 1994). Elle est introduite en Algérie, avec la Séville, d'Espagne (Zaghouane, 1991).

##### IV.4. Variétés tardives :

Elles ont une hauteur moyenne de 85cm, elles produisent de nombreuses gousses contenant 4 graines.

## **V. Production de la fève :**

### **V.1. En monde :**

La production mondiale de la fève sèche en graines en 2012 a atteint 4,2 millions de tonnes/an. Sur 2,5 millions d'hectares. Les principaux producteurs sont la Chine (1,4 millions de tonnes/an sur 953000 hectares), l'Éthiopie (944000 tonnes/an sur 574000 hectares), l'Australie (425 000 tonnes/an sur 160 000 hectares) et la France (273 000 tonnes/an sur 60 000 hectares). L'Afrique a produit en 2012 environ 1,5 millions de tonnes de fèves sèches. L'Éthiopie seule représente 62% de cette production suivie du Soudan et du Maroc par une production de 156 000 et 147 000 tonnes respectivement.

La surface cultivée en Égypte est 127 000 hectares en 2000-2002, cette superficie est diminuée en 2010-2012 pour atteindre les 57 000 hectares, ce qui explique ainsi que la production au cours de la même période ont augmenté, passant de 144 000 tonnes avec une production de 67 000 tonnes à 155 000 tonnes produit sur 194 000 hectares. Cependant le rendement au Maroc est de 790 kg/ha et reste faible par rapport à l'Égypte dont le rendement est de 3 400 kg/ha (FAO, 2012).

### **V.2. En Algérie :**

Les données statistiques sur la superficie sur la production de la fève en Algérie pour la décennie 2001-2015 sont présentées dans le tableau suivant :

Il ne ressort de ces données que la superficie moyenne réservée pour la culture de la fève en Algérie est de 31747 ha, elle présente des variations d'une année à une autre, ce qui influe sur la production qui varie aussi, dont la moyenne de dix années est de 1087370 qx. Nous constatons également des fluctuations du rendement, qui présente une moyenne de 8,56qx/ha. Le rendement maximal a été noté durant la campagne agricole 2008-2009 avec 11,31qx/ha, par contre le rendement minimal est enregistré durant l'année 2000-2001 avec 6,74qx/ha. Ces variations du rendement peuvent être expliquées, par la mauvaise conduite des cultures ainsi que les conditions climatiques.

**Tableau n°1:** Evaluation de la superficie et production de la fève et féverole en Algérie (FAOSTAT ,2015) :

Compagne agricole	Superficie (ha)	Production (qx)	Rendement (qx/ha)
2000/2001	31416	211760	6.64
2001/2002	33565	228880	6.82
2002/2003	34028	306810	9.02
2003/2004	36767	320450	8.72
2004/2005	35031	268330	7.66
2005/2006	33537	242986	7.25
2006/2007	31284	279735	8.94
2007/2008	30688	235210	7.66
2008/2009	32278	364949	11.31
2009/2010	27782	366252	8.93
2010/2011	27937	2483465	8.92
2011/2012	30172	2577002	8.75
2012/2013	30833	2969634	9.80
2013/2014	30833	2959716	9.61
2014/2015	30055	2495373	8.37

## **VI. Intérêts de la fève :**

### **VI.1. Intérêt agronomique :**

Comme toutes les légumineuses alimentaires, la fève contribue à l'enrichissement du sol en azote éléments fertilisants, dont l'incidence est positive sur les performances des cultures qui les suivent (KHALDI et al., 2002). Selon Hamadache (2003), la fève améliore la teneur du sol en azote avec un apport annuel de 20 à 40 kg / ha. Elle améliore aussi sa structure par son système racinaire puissant et dense. Ses résidus, s'ils sont enfouis ils enrichissent le sol en matière organique.

### **VI.2. Intérêt Ecologique :**

La fève est très sensible à la pollution, ce qui en fait un modèle végétatif utilisé en écotoxicologie dans un grand nombre d'étude (NOURI., 2012). Utilisée aussi en agriculture, peut pousser sur des sols de différentes natures, d'où son intérêt dans les rotations des cultures (AUSTRUY., 2012).

### **VI.3. Intérêt économique :**

*Vicia faba.L* est aujourd'hui parmi les plantes légumières les plus cultivées dans le monde. Sa culture dans les pays du bassin méditerranéen est environs de 25% de la surface totale cultivée et de la production mondiale de fèves, avec un rendement très proche de la moyenne mondiale (38qx\ha) (ABRAS et al, 2016).

### **VI.4. Intérêt alimentaire de la fève :**

La fève est une des légumineuses à graines les plus communes. Elle est utilisée comme aliment pour la consommation humaine et animale (GOYOAGA et al., 2011). Elle constitue un aliment nutritif très important riche en protéines, surtout pour les populations à faible revenu et qui ne peuvent pas s'approvisionner en viande. Bien que la fève soit moins consommée dans les pays occidentaux, elle est l'une des principales sources des protéines et d'énergie pour beaucoup de populations en Afrique, en Asie et en Amérique latine.

## *Chapitre IV:*

### *Méthodologie et résultats*

## **I. Matériels et méthodes :**

Cette partie, a pour but d'expliquer la méthodologie suivie par Cabala et al (2011) (Accumulation and translocation of Cd metal and the Cd-induced production of glutathione and phytochelatins in *Vicia faba L.*) qui ont travaillé sur l'accumulation et la translocation du Cd chez deux cultivars de *Vicia faba L.* (Giza 40 et Giza 2).

### **I.1. Réactifs, produits chimiques et normes :**

1. Le chlorure de cadmium.
2. L'eau bidistillée (BüchiF-285, Flawil, Suisse)
3. Les solvants étaient de qualité analytique.
4. Les étalons PC (lyophilisés) fournis par le professeur M. H. Zenk (Université de Wittenberg-Halle, Allemagne).

### **I.2. Matériel végétal et culture :**

Les graines de cultivars de fève (*V. faba L.*) utilisé dans cette étude sont : Tolérantes au Cd (Giza 40) et sensibles au Cd (Giza 2), fournies par le Centre de recherche agricole du Caire (Le Caire, Égypte).

### **I.3. Préparation de l'échantillon :**

Les graines des deux cultivars de fève (*V. faba L.*) ont germé sur du papier filtre humide dans des boîtes de Pétri pendant 5 jours, Les semis ont ensuite été cultivés dans une solution de Hoagland modifiée à 1/10 dans une serre avec le cycle de lumière 16/8 (intensité lumineuse 35 000 lux) et la température jour / nuit de 23/18°C.

Lorsque les plantes étaient âgées de 19 jours, elles ont été transférées dans une solution nutritive fraîche contenant des concentrations de CdCl<sub>2</sub> de 0, 1, 10, 40 et 100 μmol l<sup>-1</sup>, cinq répliques de chacune, Après 15 jours supplémentaires les échantillons ont été collectés: racines et feuilles séparées, lavées à l'eau déminéralisée, pesées et congelées dans de l'azote liquide et conservées à -80 ° C jusqu'à la préparation de l'échantillon.

La préparation des échantillons a été effectuée selon une procédure publiée par El Zohri et al. (2005) avec de légères modifications, Le matériel végétal congelé dans de l'azote liquide a été broyé dans un mortier avec un pilon. L'homogénat (1 g) a été mélangé avec 3 ml de solution aqueuse



DTT froide (4 °C), 5 mmol L<sup>-1</sup>, dans des tubes à centrifuger en polypropylène (PP) (5 ml de volume), et la suspension a été soniquée (Absonic U, BBraun, Melsungen, Allemagne) avec des impulsions de 0,5 s de 400 W pendant 2 min. Les débris cellulaires ont été sédimentés par centrifugation à 14 000 tr / min (CH-AVJ 25, Beckman Coulter, Fullerton, USA) à 4 ° C pendant 20 min. Après décantation, le culot tissulaire a été remis en suspension dans 1 ml de solution de DTT froide, soniqué pendant 1 min et centrifugé pendant 10 min. Les deux surnageant ont été combinés, centrifugés à nouveau pendant 5 min, filtrés à travers des filtres en polyimideseringue de 0,45 µm, de 13 -mm de diamètre (Sartolon, Sartorius AG, Goettingen, Allemagne) et lyophilisés pendant une nuit.

Les échantillons secs ont été stockés à -80 ° C et directement avant l'analyse, dissous dans 100 µl de NaOH aqueux [1 mmol L<sup>-1</sup>]. Pour la précipitation des protéines 50 µl de HCl [1.8 mmol L<sup>-1</sup>] ont été ajoutés, suivi d'une incubation à une glace pendant 5 min et d'une centrifugation à 14000 tr / min à 4 ° C pendant 10 min. Le surnageant a été filtré à travers un filtre seringue à membrane en nylon de 0,45 µl et de 4 mm de diamètre (Carl Roth, Karlsruhe, Allemagne) dans un échantillonneur automatique de 1- 0ml. Après analyse, l'échantillon a été stocké à -80 ° C pour une répétition.

#### **I.4. Tests statistiques :**

Pour juger correctement et exactement la signification statistique des différences entre les données comparées, un test à un niveau de confiance (1-α) égal à 0,95 a été appliqué.

## **II. Résultats :**

### **II.1. Corrélation entre la concentration externe et interne de Cd :**

La réponse générale de *V. faba* pour l'augmentation de la concentration de Cd dans la solution nutritive (CCd-NS) était différente entre les racines et les feuilles ainsi que pour les deux cultivars. L'absorption de Cd dans les racines et sa translocation dans les feuilles dépendent du temps et sont influencées par la concentration totale de Cd dans le milieu.

Aucune différence significative dans la concentration de Cd dans les racines (Ccd racines) n'a été observée entre les deux cultivars. Les Ccd des racines ont augmenté presque linéairement avec CCd-NS ( $R > 0,9980$ ) et ont atteint un niveau de 100 µmol Cd kg<sup>-1</sup> (DW) à CCd-NS de 100 µmol L<sup>-1</sup> (annexe 2)

Un comportement différent est observé pour les feuilles, où la concentration en Cd (Ccd feuilles) est presque identique pour CCd-NS jusqu'à 10  $\mu\text{mol l}^{-1}$  et commence à différer significativement au-dessus de cette valeur pour les deux cultivars (annexe 3). Au-dessus de cette valeur CCd-NS, les Ccd des feuilles du cultivar tolérant ne diminuent que légèrement, tandis que pour le cultivar sensible, le maximum de Ccd des feuilles 3,3  $\text{mmol kg}^{-1}$  (DW), est atteint à CCd-NS de 40  $\mu\text{mol l}^{-1}$ .

## II.2. Corrélation entre la concentration de Cd et la production de biomasse :

Le poids total (racines et feuilles) de la biomasse fraîche et sec de fève (annexe 4) a diminué avec l'augmentation du CCd-NS pour les cultivars tolérants et sensibles. Cette diminution était plus évidente dans le cultivar sensible où le CCd-NS de seulement 1  $\mu\text{mol l}^{-1}$  diminuait le FW total et le DW total à environ 64 et 60% du poids témoin, respectivement. Chez le cultivar tolérant l'effet n'était pas statistiquement significatif à cette valeur CCd-NS.

Les racines du cultivar sensible étaient plus sensibles au Cd que les racines tolérantes. Le CCd-NS le plus bas utilisé (1  $\mu\text{mol l}^{-1}$ ) a réduit leur biomasse totale à 58%, alors que ce paramètre n'a pas été influencé chez le cultivar tolérant. FW des racines de la plante sensible et tolérante diminue avec la concentration de Cd à 10 et 50% du contrôle CCd-NS 100  $\mu\text{mol l}^{-1}$ , respectivement.

L'influence du Cd sur les paramètres de croissance exprimés dans le pourcentage de DW et FW est illustrée dans (annexe 4). La DW de la racine du cultivar tolérant a augmenté de façon monotone de 5,5 à 7,2% suite à l'augmentation du CCd-NS.

En d'autres termes, la teneur en eau diminue linéairement avec l'augmentation du CCdNS. Cette diminution presque parfaitement linéaire est caractérisée par des valeurs élevées de coefficients de corrélation DW-CCd-NS de 0,9755. Une relation plus compliquée et moins distincte entre DW et CCd-NS a été trouvée pour le cultivar sensible où les valeurs moyennes de DW pour les racines ont augmenté de 6,5% au contrôle à son maximum de 8% CCd-NS de 10  $\mu\text{mol l}^{-1}$  et ont diminué de manière surprenante à 7% à la concentration maximale de Cd (annexe5).

Dans notre cas, les racines du cultivar sensible de fève étaient quelque peu dégradées (décomposées) ce qui pourrait augmenter la teneur en eau. Le FW des feuilles de la plante sensible et tolérante diminuait avec la concentration de Cd à 15 et 42% du contrôle CCd-NS 100  $\mu\text{mol l}^{-1}$ . De même que pour les racines, les feuilles DW du cultivar tolérant ont augmenté de façon monotone de 10,5 à 15,6% suite à l'augmentation de CCd-NS. La teneur en eau diminue

linéairement avec l'augmentation du CCd-NS et cette diminution est caractérisée par des coefficients de corrélation DW-CCd-NS de 0,9839.

Les feuilles DW du cultivar sensible diminuent légèrement à CCd-NS de 1  $\mu\text{mol l}^{-1}$ , suivi par une augmentation continue du DW jusqu'à 13,6% à la concentration de Cd la plus élevée, ce qui est la tendance opposée à celle des racines. Cette corrélation irrégulière entre la teneur en eau de la FW et du CCd-NS est reflétée dans les valeurs de coefficient de corrélation inférieures à 0,42 pour les racines et les feuilles du cultivar sensible.

### II.3. Facteur de translocation (FT):

Afin d'estimer la capacité de *vicia faba* des cultivars tolérant et sensible au cd à transférer le cd vers les parties aériennes les facteurs de translocation sont calculé. L'ensemble des FTt restent toujours  $< 1$  et l'ensemble des FTs restent aussi toujours  $< 1$  donc la translocation est faible et c'est ce qui limite les risques de passage dans la chaînes alimentaire . Les résultats obtenus montrent que les cultivars sensible ont une grande capacité a mobiliser le cd parce que les feuilles du cultivar sensible contiennent une concentration de Cd environ deux fois plus élevée que celle du tolérant.

$$FT = [\text{Cd}] \text{ partie aérienne} / [\text{Cd}] \text{ racines}$$

**Tableau 2** : facteur de translocation chez les cultivars sensible et tolérant.

FT[C]	FT [1]	FT [10]	FT [40]	FT [100]
Sensible	0.05	0.106	0.081	0.026
Tolérant	0.048	0.0113	0.044	0.011

### III. Discussion :

#### III .1. Corrélation entre la concentration externe et interne de Cd :

Conformément aux résultats publiés, l'absorption du Cd dans les racines et la translocation dans les feuilles dépendaient du temps de fondation (Dixit et al., 2001) et étaient influencées par la concentration totale de Cd dans le milieu (Szalai et al., 2002). En accord avec vos résultats, une augmentation continue de la quantité de Cd dans les racines a également été observée chez le maïs

(Szalai et al., 2002) et le blé (Sun et al., 2005) où sa concentration était beaucoup plus élevée dans les racines que dans les feuilles.

Une corrélation approximativement linéaire entre CCd-racines et CCd-NS est décrite dans ce travail. Résultats pour *V. faba* pourrait être une preuve d'un partage simple (passif) du Cd entre NS et le tissu racinaire dans *V. faba*. De même, en *Silene dioica*, les jeunes parties des racines sont significativement participantes dans l'absorption substantielle de Cd, car la plupart des Cd sont présents dans les parois des cellules rhizodermiques (Martinka et Lux2006). Malheureusement, la technique expérimentale appliquée n'a pas permis de différencier les emplacements de liaison de Cd dans les tissus et cellules. Nous avons constaté que la quantité de feuilles de Cd était environ 30 fois plus faible que dans les racines des cultivars.

Ce modèle de translocation est observé chez le haricots de brousse (*Phaseolus vulgaris*) qui accumule plus de Cd dans la racine que dans la pousse (Rodecap et al., 1981), dans le soja, 84 à 92% du Cd sont conservés dans la racine (Cataldo et al., 1981), et les racines de *Lupinus albus* conservent jusqu'à 88% (Zhao et al., 2002). Le même schéma est observé pour d'autres plantes, telles que le blé dur (Cieslinski et al., 1996), le maïs (Lozano-Rodriguez et al., 1997) et le riz (Liu et al., 2004). Au contraire, une concentration naturelle de Cd plus élevée a été observée dans les feuilles que dans les racines des épinards et de la laitue (Kabata-Pendias et Pendias, 1992). Une accumulation relativement faible de Cd dans les feuilles de vos expériences peut être expliquée par la présence de barrières de transport dans les racines; de plus, les dommages oxydatifs imposés par le Cd sont probablement inhibés par une augmentation globale de l'activité des enzymes antioxydants (Dixit et al., 2001).

Le calcul du rapport Ccd racines / Ccd feuilles à partir de ces expériences donne des valeurs comprises entre 10 et 100 et entre 10 et 40 pour les cultivars tolérants et sensibles, respectivement. Le rapport le plus élevé a été trouvé au CCd-NS 100  $\mu\text{mol l}^{-1}$  et le plus bas au CCd-NS 10  $\mu\text{mol l}^{-1}$  (les résultats ne sont pas présentés). Cela indique également qu'au-dessus du CCd-NS de 10  $\mu\text{mol l}^{-1}$ , les feuilles du cultivar sensible contiennent une concentration de Cd environ deux fois plus élevée que celle du tolérant. Ces résultats sont en accord avec les publications dans lesquelles le rapport de concentration racine / pousse du Cd étaient généralement plus élevé dans les écotypes résistants de *S. dioicathan* dans celui sensible (Martinka et Lux2006).

Les différentes distributions de Cd parmi les tissus pourraient expliquer les différences de sensibilité à ce métal (Lozano-Rodriguez et al., 1997).

### III.2. Corrélation entre la concentration de Cd et la production de biomasse :

Il a été publié que les plantes traitées au Cd présentaient des valeurs de potentiel de soluté plus faible, ce qui a entraîné des valeurs de potentiel de gazon plus élevées. Cette observation peut suggérer que le Cd diminue l'extensibilité de la paroi cellulaire, ce qui peut provoquer une réduction de l'expansion cellulaire (Poschenrieder et al., 1989). Leur corrélation irrégulière entre la teneur en eau du FW et du CCd-NS trouvée dans nos usines est incompatible avec la plupart des résultats publiés. En effet, en accord avec vos résultats, une culture plus longue des racines de haricots mungo sensibles dans le milieu Cd a provoqué des processus de dégradation et de dessiccation (Slováková et al., 2007). De même, il a été publié que des concentrations plus élevées de Cd causaient un retard de croissance et que les racines semblaient plus foncées que les plants de laitue témoins, peut-être en raison de la mort des racines (Maier et al., 2003). Racines de pois mutants tolérants au Cd développés et la croissance par concentrations de Cd a été complètement inhibée par la croissance des racines des plantes de type sauvage (Tsyganov et al., 2007).

Pour augmenter la concentration de Cd en *S. vulgaris*, la concentration de Cd deux fois plus élevée était nécessaire pour inhiber la croissance des racines des plantes tolérantes par rapport aux racines des plantes sensibles (Knecht et al., 1994). L'exposition au Cd a réduit la transpiration chez *Brassica juncea*, ce qui a entraîné une diminution de la croissance foliaire, alors que la photosynthèse n'était pas affectée (Haag-Kerwer et al., 1999). Des perturbations des fonctions physiologiques peuvent également être causées par un dysfonctionnement de la membrane plasmique. Une exposition plus longue d'un plant de pois au Cd a été associée à un degré accru de non-saturation des acides gras, ce qui entraînant des changements dans la composition et la fluidité des phospholipides de la membrane plasmique des racines (Hernández et Cooke, 1997).

# *Conclusion*

## **Conclusion**

La phyto-accumulation des métaux lourds par les plantes constitue un problème majeur qui touche la productivité des espèces végétales utilisées dans le domaine agricole. Notre travail s'inscrit dans une thématique visant à évaluer l'accumulation de cadmium sur des végétaux importants du point de vue économique et alimentaire notamment les légumineuses. L'espèce choisie fait partie des spéculations végétales les plus cultivées dans le monde grâce à leurs caractéristiques, biologiques agronomiques et technologiques.

Selon les résultats présentés, des perturbations de la croissance accompagnées d'un brunissement des racines traitées, un désordre nutritionnel et des perturbations de l'absorption de l'eau dans les graines de fève traitées ont été notés. La répartition de Cd entre feuille et racine a révélé un faible passage des ions métalliques vers les feuilles et une localisation préférentielle dans les racines.

D'après les résultats, le stress causé par la présence du cadmium dans la solution nutritive, engendre des désordres relatifs à la croissance des plantules de fève. Ces altérations se manifestent, à l'échelle de la plante entière, par une réduction de l'élongation racinaire et de l'expansion foliaire et une réduction des biomasses fraîche et sèche. Le système racinaire semble être plus affecté par le stress métallique. Ceci pourrait être expliqué par l'accumulation et la répartition du métal au sein de la plante.

En effet, le Cd est accumulé préférentiellement dans les racines qui montrent des teneurs en Cd plus élevées par rapport aux feuilles. Les racines semblent jouer le rôle d'organe piège pour le Cd afin de limiter les effets destructeurs du métal dans les feuilles.

Les plantules de fève semblent développer des systèmes de défense visant à réagir aux changements de leur milieu environnant. Ces systèmes luttent contre les espèces réactives indésirables en évitant leur accumulation.

A la lumière de l'ensemble des résultats que nous avons présentés, il semble que la réponse des plantules de fèves au stress causé par le Cd est très complexe.

*Références*

*bibliographiques*



## Références bibliographiques

- Adriano DC (2001) Copper. In: Trace elements in terrestrial environment, biogeochemistry, bioavailability, and risks of metal, 2nd Edition, pp. 499–546
- ALLOWAY, B.J. (1995). Heavy metals in soils. Blackie Academic & Professional, Glasgow, U. K. amelioration - A review. Science of the Total Environment 651, 2927–2942.4.
- Araki, R., Murata, J. et Murata, Y. (2011). A novel barley yellow stripe 1-like transporter (hvysl2) localized to the root endodermis transports metal-phytosiderophore complexes. Plant and Cell Physiology, 52(11):1931–1940.
- Arris sihem épouse chebira, (2008) : Etude Expérimentale de l'Élimination des Polluants Organiques et Inorganiques par Adsorption sur des Sous Produits de Céréales, doctorat en sciences en génie des procédés. 10-11p.
- ATSDR, (2008) : Draft Toxicological Profile for Cadmium. In ATSDR. Agency for Toxic Substances and Disease Registry, [En ligne]. <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp5.pdf>.
- ATSDR, (2008) : Draft Toxicological Profile for Cadmium. In ATSDR. Agency for Toxic Substances and Disease Registry, [En ligne]. <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp5.pdf>.
- Austruy A. (2012). Aspects physiologiques et biochimiques de la tolérance à l'arsenic chez les plantes supérieures dans un contexte de phytostabilisation d'une friche industrielle. Agricultural sciences. Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 300p.
- Baize D, (1997) : Un point sur les teneurs totales en éléments-traces métalliques dans les sols. INRA Éditions, Paris. France. pp. 408.
- Ballatori N, (2002) : Transport of toxic metals by molecular mimicry. Environ Health Perspect, 110 Suppl 5, 689-694.
- Barbalace J.K, inc, (2012) : EnvironmentalChemistry.com: Environmental, Chemistry & Hazardous Materials News, Careers & Resources, [En ligne]. <http://environmentalchemistry.com/yogi/periodic>.
- Barcelo J, Ch Pochenrieder, Andreu I (1986) Cadmium-induced decrease of water stress resistance in bush bean plants (*Phaseolus vulgaris* L. cv. Contender). I. Effects of Cd on water potential, relative water content and cell wall elasticity. J Plant Physiol 125: 17-25 .
- Barcelo J, Vázquez MD, Poschenrieder C (1988) Cadmium induced structural and ultrastructural changes in the vascular system of bush bean stems. Bot Acta 101: 254-261.

- BENACHOUR K., LOUADI K. et TERZO M., 2007 –Rôle des abeilles sauvages et domestiques ( Hymenoptera ; Apoidea) dans la pollinisation de la fève (*Vicia faba* L var major) (fabaceae) en région de Constantine (Algérie). Ann. Soc. Entomol. Fr. (n.S), 43(2) : 213-219.
- Berkelaar E, Hale BA (2003) Accumulation of cadmium by durum wheat roots: bases for citrate-mediated exceptions to the free ion model. Environ Toxicol Chem 22: 1155-1161.
- Berkelaar, E. et Hale, B. (2000). The relationship between root morphology and cadmium accumulation in seedlings of two durum wheat cultivars. Canadian Journal of Botany, 78:381–387.
- Bingham F T, Sposito G, Strong J E (1986) The effect of sulfate on the availability of cadmium. Soil Sci 141:172-177.
- Borchardt T ,(1985) : relationships between carbon and cadmium uptake in *Mytilus edulis*. Mar. Biol. 85:233-244 .
- Boulila Zoghalmi, L., Djebali, W., Chaïbi, W. and Ghorbel, M.H, 2006. “Modifications physiologiques et structurales induites par l’interaction cadmium-calcium chez la tomate (*Lycopersicon esculentum*) ”. Compte Rendu Biologies 329, 702-711.
- Bounab Sarah, Sahli Imen N.R 2014. Etude de l’activité de la peroxydase (POD) et de la catalase (CAT) chez *Lens culinaris* contaminée par le cadmium. Mémoire de Master. Université Constantine 1.
- Brink M., Belay G., 2006- Céréales et légumes secs. Ressources végétales de l’Afrique tropicale 1. Fondation PROTA/ Backhuys Publishers/CTA. Pays-Bas ; 327 P.
- Brooks, R., Chambers, M., Nicks, L. et Robinson, B. (1998). Phytomining. Trends in Plant Science, 3(9):359–362.
- Cataldo DA, Garland TR, Wildung RE (1981) Cd uptake kinetics in intact soybean plants. Plant Physiol 68:835–839
- Cataldo, D. A., Garland, T. R. et Wildung, R. E. (1983). Cadmium uptake kinetics in intact soybean plants. Plant Physiology, 73:844–848.
- Cataldo, D. A., McFadden, K. M., Garland, T. R. et Wildung, R. E. (1988). Organic constituents and complexation of nickel(ii), iron(iii), cadmium(ii), and plutonium(iv) in soybean xylem exudates. Plant Physiology, Vol. 86, No. 3:734–739.
- CATALDO, D.A., GARLAND, T.R. et WILDUNG, R.E. (1983). Cadmium uptake kinetics in intact soybean plants. Plant Physiology, 73, p 844-848.

- Chaux et Foury 1994 .production légumière secs, tome 3, légumineuse potagères, légume, fruits, technique et documentation Lavoisier F 75384 paris cedex 08, pp 3-15\*.
- Chiffolleau J.F, Gonzalez J.L, Miramand P, Thouvenin B, (1999) : Le cadmium: Comportement d'un contaminant métallique en estuaire. Programme scientifique Seine- Aval 10 : 31 p.
- Chugh LK Gupta VK Sawhney SK (1992)Effect of cadmium on enzymes of nitrogen metabolism in pea seedlings. *Phytochemistry* 31: 395-400.
- Cieslinski G, Nielsen GH, Hogue EJ (1996) Low-molecular-weightorganic acids in rhizosphere soils of durum wheat and their effect on Cd bioaccumulation. *Plant Soil* 180:267–276
- Clemens S (2006) Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants. *Biochimie* 88: 1707-1719 .
- Clemens, S. (2001). Molecular mechanisms of plant metal tolerance and homeostasis. *Planta*, 212:475–486.
- Clemens, S. (2006). Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants. *Biochimie*, 88(11):1707–1719.
- Clemens, S., Antosiewicz, D. M., Ward, J. M., Schachtman, D. P. et Schroeder, J. I. (1998). The plant cDNA lct1 mediates the uptake of calcium and cadmium in yeast. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 95(20):12043–12048.
- Clemens, S., Palmgren, M. G. et Kramer, U. (2002). A long way ahead : understanding and engineering plant metal accumulation. *Trends in Plant Science*, 7(7):309–315.
- Cobbett, C. S. (2000). Phytochelatins and their roles in heavy metal detoxification. *Plant Physiology*, 123:825–832.
- Cohen, C. K., Fox, T. C., Garvin, D. F. et Kochian, L. V. (1998). The role of iron-deficiency stress responses in stimulating heavy-metal transport in plants. *Plant Physiology*, 116:1063–1072.
- Cosio C, DeSantis L, Frey B, Diallo S, Keller C (2005) Distribution of cadmium in leaves of *Thlaspi caerulescens*. *J Exp Bot* 56:765-7755.
- Cosio, C., DeSantis, L., Frey, B., Diallo, S. et Keller, C. (2005). Distribution of cadmium in leaves of *thlaspi caerulescens*. *Journal of Experimental Botany*, 56:765–775.
- Cosio, C., Vollenweider, P. and Keller, C, 2005. “Localization and effects of cadmium in leaves of a cadmium-tolerant willow (*Salix viminalis* L.). I. Macrolocalization and phytotoxic effects of cadmium. *Environmental and Experimental Botany* 58, pp.64-74.

- Costa G, Michaut J, Morel J (1994) Influence of cadmium on water relations and gas exchanges, in phosphorus deficient *Lupinus albus* L.. *Plant Physiol Biochem* 32: 105-114
- Costa G, Morel JL (1994a) Efficiency of H<sup>+</sup>-ATPase activity on cadmium uptake by four cultivars of lettuce. *J Plant Nutr* 17:627-637.
- Costa G, Morel JL (1994b) Water relation, gaz exchange and amino acid content in Cd-treated lettuce. *J Plant Physiol Biochem* 32:561-570
- Costa, G. et Morel, J. L. (1994). Efficiency of h<sup>+</sup>atpase activity on cadmium uptake by fourcultivars of lettuce.*Journal of Plant Nutrition*, 17(4):627–637.
- Coullery P, (1997) : Comportement de métaux lourds en agrosystèmes tempérés à faible taux de pollution. Thèse de Doctorat. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne.
- Custos, J.-M. (2012).Modélisation de processus rhizosphériques : prélèvement de cadmium enprésence de ligand organique et modification du pH par les racines.Mémoire de doctorat,Université de Lorraine, Vandoeuvre-lès-Nancy.
- Dahmani-Müller H (2000)Phytoréhabilitation des sols pollués par des éléments métalliques : facteurs et mécanismes de prélèvement dans les sols et d'accumulation par les espèces métalliques. Thèse de Doctorat,ENGREF, Paris.
- Dahmani-Müller H, van Oort F, Balabane M (2001) Metal extraction by *Arabidopsis halleri* grown on an unpolluted soil amended with various metal-bearing solids: a pot experiment. *Environ Pollut* 114:77-84.
- Dajoz 2000 in Mezani 2011 element d'ecologie .Ed, dunod ,565 p.
- DalCorso, G., Manara, A., Piasentin, S., Furini, A., 2014. Nutrient metal elements in plants.
- De La Rosa G, Peralta-Videa JR, Montes M, Parsons JG, Cano-Aguilera I, Gardea-Torresdey JL (2004) Cadmium uptake and translocation in tumbleweed (*Salsola kali*), a potential Cd-hyperaccumulator desert plant species: ICP/OES and XAS studies. *Chemosphere* 55: 1159-1168.
- Dixit V, Pandey V, Shyam R (2001) Differential antioxidativeresponses to Cd in roots and leaves of pea (*Pisum sativum*L. cv.Azad). *J Exp Bot* 52:1101–1109
- EDF. (1995). 1XF0pDLUH HW HQYLURQQHPHQW \*XLGH SUDWLTXH SRXU OH FRQWU{OH GHV HIIOXHQWV HW GH O HQYLURQQHPHQW. DSRE (Eds).128 p.  
elements in soil-vegetables interface : Translocation, bioaccumulation, toxicity .
- Elmayan T, Tepfer M (1994) Synthesis of a bifunctional metallothionein/beta-glucuronidase fusion protein in transgenic tobacco plants as a means of reducing leaf cadmium levels. *Plant J* 6: 433-440.

- Ernst, W. H. O., Krauss, G.-J., Verkleij, J. A. C. et Wesenberg, D. (2008). Interaction of heavy metals with the sulphur metabolism in angiosperms from an ecological point of view. *Plant, Cell & Environment*, 31(1):123–143.
- FAO., 2012 -Agriculture et Environnement: Les défis du 21ème siècle. 21e Session.
- FAOSTAT., 2015 -Faostat Database. Rome: Economic and Social Development Department.
- Finger-Teixeira, A, Lucio Ferrarese, M.D.L., Soares R.A., da Silva, D. and Ferrarese-Filho, O, 2010. “Cadmium-induced lignification restricts soybean root growth”. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 73, pp.959-1964.
- Fismes, J., Echevarria, G., Leclerc-Cessac, E. et Morel, J. L. (2005). Uptake and transport of radioactive nickel and cadmium into three vegetables after wet aerial contamination.
- Florijn PJ, Nelemans JA, Van Beusichem ML (1991) Cadmium uptake by lettuce varieties. *Neth J Agric Sci* 39:103-11.
- Florijn PJ, Van Beusichem ML (1993) Uptake and Distribution of Cadmium in Maize Inbred Lines. *Plant Soil* 150:25-32.
- Frery N, Nessmann C, Girard F, Lafond J, Moreau T, Blot P, Lellouch J, Huel G (1993) Environmental exposure to cadmium and human birthweight. *Toxicology* 79:109-118 .
- Gallais et Bannerot, 1992. Amélioration des espèces végétales cultivées. INRA. Paris. 765 pp.
- Gallego Susana M., Liliana B. Pena, Roberto A. Barcia, Claudia E. Azpilicueta et al, 2012. Unravelling cadmium toxicity and tolerance in plants : Insight into regulatory mechanisms. *Environmental and Experimental Botany* 83, 33-46. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2012.04.006>.
- Gallego Susana M., Liliana B. Pena, Roberto A. Barcia, Claudia E. Azpilicueta et al, 2012. Unravelling cadmium toxicity and tolerance in plants : Insight into regulatory mechanisms. *Environmental and Experimental Botany* 83, 33-46. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2012.04.006>.
- Garin-M A, Simon O, (2004) : Fiche radionucléide: Cadmium 109 et environnement. Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire. Direction de l'environnement et de l'intervention - Service d'étude du comportement des radionucléides dans les écosystèmes.
- Gendre, D., Czernic, P., Conéjéro, G., Pianelli, K., Briat, J.-F., Lebrun, M. et Mari, S. (2007). Tcys13, a member of the ysl gene family from the hyper-accumulator *Thlaspi caerulescens*, encodes a nicotianamine-ni/fe transporter. *The Plant Journal*, 49(1):1–15.
- GERARD C., 1990 – La féverole, encyclopédique techniques agricoles. Partie production végétale : 2213p.

- Godt J, Scheidig F, Grosse-Siestrup C, Esche V, Brandenburg P, Reich A and Groneberg D (2006) The toxicity of cadmium and resulting hazards for human health. *J Occup Med Toxicol* 1: 22-277.
- Godt, J., Scheidig, F., Grosse-Siestrup, C., Esche, V., Brandenburg, P., Reich, A. and Groneberg, D, 2006. "The toxicity of cadmium and resulting hazards for human health". *Journal of Occupational Medicine and Toxicology* 1, pp. 22-27.
- Goyer A.G, Clarkson T.W, (2001) : Toxics effects of metals. Dans Casarett and Doull's toxicology, the basic sciences of poisons, fifth Edition. Éditeur: C.D. Klaassen. McGraw-Hill, Montréal.
- Goyer A.G, Clarkson T.W, (2001) : Toxics effects of metals. Dans Casarett and Doull's toxicology, the basic sciences of poisons, fifth Edition. Éditeur: C.D. Klaassen. McGraw-Hill, Montréal.
- Greger, M. et Lofstedt, M. (2004). Comparison of uptake and distribution of cadmium indifferent cultivars of bread and durum wheat. *Crop Science*, 44(2):501–507.
- Guimarães, M. d. A., Gustin, J. L. et Salt, D. E. (2009). Reciprocal grafting separates the roles of the root and shoot in zinc hyperaccumulation in *Thlaspi caerulescens*. *New Phytologist*, 184(2):323–329.
- Guo, W.-J., Meenam, M. et Goldsbrough, P. B. (2008). Examining the specific contributions of individual Arabidopsis metallothioneins to copper distribution and metal tolerance. *Plant Physiology*, 146(4):1697–1706.
- Gupta Neha, Kumar Yadav Krishna, Vinit Kumar, Sandeep Kumar et al, 2019. Trace elements in soil-vegetables interface : Translocation, bioaccumulation, toxicity and amelioration - A review. *Science of the Total Environment* 651, 2927–2942.4.
- Gupta Neha, Kumar Yadav Krishna, Vinit Kumar, Sandeep Kumar et al, 2019. Trace
- H. Biglow and al. "The American Monthly Magazine and Critical Review " Volume 4, Numero 1 p 69. Nov 1818.
- Haag-Kerwer A, Schaefe HJ, Heiss S, Walter C, Rausch T (1999) Cd exposure in Brassica juncea caused a decline in transpiration rate and leaf expansion without effect on photosynthesis. *J Exp Bot* 50:1827–1835
- HAMADACHE A., 2003. La féverole. Inst. Techn. Gr. Cult.(T.T.G.C), 13p. en bentonite, Magister, Université de Mostaganem, 89p.

- Hanikenne, M. et Nouet, C. (2011). Metal hyperaccumulation and hypertolerance : a model for plant evolutionary genomics. *Current Opinion in Plant Biology*, 14(3):252–259.
- Hart JJ, Welch RM, Norvell WA, Sullivan LA, Kochian LV (1998b) Characterization of cadmium binding, uptake, and translocation in intact seedlings of bread and durum wheat cultivars. *Plant Physiol* 116: 1413-1420.
- Hart, J. J., Welch, R. M., Norvell, W. A., Sullivan, L. A. et Kochian, L. V. (1998). Characterization of cadmium binding, uptake, and translocation in intact seedlings of bread and durum wheat cultivars. *Plant Physiology*, 116:1413–1420.
- Henson MC, Chedrese PJ (2004) Endocrine disruption by cadmium, a common environmental toxicant with paradoxical effects on reproduction. *Exp Biol Med (Maywood)* 229: 383-392
- Hernández LE, Cooke DT (1997) Modification of the root plasmamembrane lipid composition of Cd treated *Pisum sativum*. *J Exp Bot* 48:1375–1381
- INERIS (2000). Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques : Cadmium et ses dérivés. Ineris-DRC-01-25590-V1, décembre 2000.
- Jackson AP, Alloway BJ. (1992). “The transfer of Cadmium from agricultural soils to the human food chain”, In: Adriano DC, %LRJHRFKHPLVWU\ RI WUDFH PHWDOV, Lewis Publishers.
- Jarup L, (2002) : Cadmium overload and toxicity, *Nephrol.Dial. Transplant.* 17 Suppl 2: 35-39.
- Jarvis SC, Jones LHP, Hopper MJ (1976) Cadmium uptake from solution by plants and its transport from roots to shoots. *Plant Soil* 44:179-191.
- Johnson MD, Kenney N, Stoica A, Hilakivi-Clarke L, Singh B, Chepko G, Clarke R, Sholler PF, Lirio AA, Foss C, Reiter R, Trock B, Paik S, Martin MB (2003) Cadmium mimics the in vivo effects of estrogen in the uterus and mammary gland. *Nat Med* 9: 1081-1084. *Journal of Environmental Quality*, 34(5):1497–1507.
- Kabata-Pendias A, Pendias H, (2001) : Trace elements in soils and plants. 3rd CRC Press, Boca Raton, London, New-York, Washington D.C.
- Kaldi, R., Zekri, S., Maatougui, M.E.H., and Ben Yassine, A. (2002). L’Economie des Légumineuses Alimentaires au Maghreb et dans le Monde. Proceedings du 2ème séminaire du réseau REMAFEVE/REMALA, « Le devenir des Légumineuses Alimentaires dans le Maghreb », Hammamet, Tunisie, 100pp.

- Kim, D.-Y., Bovet, L., Maeshima, M., Martinoia, E. et Lee, Y. (2007). The abc transporter atpdr8 is a cadmium extrusion pump conferring heavy metal resistance. *The Plant Journal*, 50(2):207–218.
- Klassen R.D, (2001) : —Plant-Level Environmental Management Orientation: The Influence of Management Views and Plant Characteristics, *Production and Operations Management*, 10, 3, 257–275.
- Knecht JA, van Dillen M, Koevoets PLM, Schat H, Verkeij JAC, Ernst WHO (1994) Phytochelatins in Cd-sensitive and Cd-tolerant *Silene vulgaris*. *Plant Physiol* 104:255–261
- Korenkov, V., Park, S., Cheng, N.-H., Sreevidya, C., Lachmansingh, J., Morris, J., Hirschi, K. et Wagner, G. J. (2007). Enhanced cd<sup>2+</sup>-selective root-tonoplast-transport in tobacco expressing arabidopsis cation exchanger. *Planta*, 225:403–411.
- Korshunova, Y. O., Eide, D., Gregg Clark, W., Lou Guerinot, M. et Pakrasi, H. B. (1999). The irt1 protein from arabidopsis thaliana is a metal transporter with a broad substrate range. *Plant Molecular Biology*, 40:37–44.
- Kupper, H., Mijovilovitch, A., Meyer-Klaucke, W. et Kroneck, P. M. H. (2004). Tissue-and age-dependant differences in the complexation of cadmium and zinc in the cadmium/zinc hyperaccumulator *thlaspi caerulescens* (ganges ecotype) revealed by x-ray absorption spectroscopy. *Plant Physiology*, 134:748–757.
- Lafon D, M Boize, R Chakroun, D Chevalier, F Dor, F El-Ghissassi, M Falcy, S Girault, C Kairo, B La Rocca, R Maximilien, B Meek, J-U Mullot, M Ould-Elkhim, A-C Roudot, S Tissot, L Vian, (2011) : Valeur toxicologique de référence pour le cadmium et ses composés. ANSES (del'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail). 12-35p.
- Lane T.W, And F.M.M Morel, (2000) : A biological function for cadmium in marine diatoms. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 97: 4627–4631.
- Lane, T. W., Saito, M. A., George, G. N., Pickering, I. J., Prince, R. C. et Morel, F. M. M. (2005). The first cadmium enzyme - carbonic anhydrase 2 from the marine diatom *thalassiosira weissflogii*. *SSRL Scienc High*.
- Laumonier r ., 1979: culture legumineuse et maraichere , tome ÀÀÀ .ED.J.B BAILLIERE ,276P.
- Li L, Kaplan J (1997) Characterization of two homologous yeast genes that encode mitochondrial iron transporters. *J Biol Chem* 272: 28485-28493.



- Liu WJ, Zhu YG, Smith FA, Smith SE (2004) Do iron plaque and genotypes affect arsenate uptake and translocation by rice seedlings (*Oryza sativa* L.) grown in solution culture? *J Exp Bot* 55:1707–1713
- Lombi E, Zhao FJ, Dunham SJ, McGrath SP (2000) Cadmium accumulation in populations of *Thlaspi caerulescens* and *Thlaspi goesingense*. *New Phytol* 145:11-20.
- Lombi, E., Zhao, F. J., McGrath, S. P., Young, S. D. et Sacchi, G. E. (2001). Physiological evidence for a high-affinity cadmium transporter highly expressed in a *thlaspi caerulescens* ecotype. *New Phytologist*, 149:53–60.
- Lozano-Rodriguez E, Hernandez LE, Bonay P, Carpena-Riuz RO (1997) Distribution of Cd in shoot and root tissues of maize and pea plants: physiological disturbances. *J Exp Bot* 48:123–128
- Lozano-Rodriguez E, Hernandez LE, Bonay P, Carpena Ruiz RO (1997) Distribution of cadmium in shoot and root tissues of maize and pea plants: Physiological disturbances. *J Exp Bot* 48: 123-128.
- Lux, A., Martinka, M., Vaculík, M. et White, P. J. (2011). Root responses to cadmium in the rhizosphere : a review. *Journal of Experimental Botany*, 62(1):21–37.
- Maier EA, Matthews RD, McDowell JA, Walden RR, Ahner BA (2003) Environmental Cd levels increase phytochelatin and glutathione in lettuce grown in a chelator-buffered nutrient solution. *J Environ Qual* 32:1356–1364
- Martinka M, Lux A (2006) Intraspecific variation of *Silene dioica* L. in uptake and translocation of Cd related to endodermal development. In: Teixeira da Silva JA (ed) *Floriculture, ornamental and plant biotechnology. Advances and topical issues*, vol III, 1st ed. edn. GSB, UK, pp 312–316
- McLaughlin MJ, Williams CMJ, McKay A, Kirkham R, Gunton J, Jackson KJ, Thompson R, Dowling B, Partington D, Smart MK, Tiller KG (1994) Effect of cultivar on uptake of cadmium by potato tubers. *Aust J Agric Res* 45:1483-149.
- McLaughlin, M.J. and Singh, B.R., 1999, eds. “Cadmium in soils and plants”, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, pp 273.
- MCLAUGHLIN, M.J. et SINGH, B.R. (1999). *Cadmium in Soils and Plants*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 271.
- MENCH, M., MOREL, J.L. et GUCKERT, A. (1985). Liaison du cadmium avec la fraction macromoléculaire soluble des exsudats racinaires de maïs (*Zea mays* L.). *Compte-rendus de l'Académie des Sciences*, t. 301, Série III, p 379-382.

- MENCH,M.et MARTIN,E.(1991). Mobilization of cadmium and other metals from two soils by root exudates of *Zea mays*L., *Nicotiana tabacum* L. and *Nicotiana rustica*L. *Plant and Soil*, 132, p 187-196.
- Mikic A., 2011- Words denoting Faba bean (*vicia faba*) in European languages. *Ratar.Povrt./ Field Veg. Crop Res.* 48:233-238.
- Milner, M. J. et Kochian, L. V. (2008). Investigating heavy-metal hyperaccumulation using *thlaspi caerulescens* as a model system. *Annals of Botany*, 102(1):3–13.
- Morel, M., Crouzet, J., Gravot, A., Auroy, P., Leonhardt, N., Vavasseur, A. et Richaud, P.(2009). *Athma3*, a *p1b-atpase* allowing *cd/zn/co/pb* vacuolar storage in *arabidopsis*. *American Society of Plant Biologists*, 149 no. 2:894–904.
- MOREL,J.L., MENCH,M.et GUCKERT,A.(1986). Measurement of  $Pb^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$  and  $Cd^{2+}$  binding with mucilage exudates from maize (*Zea mays*L.) roots. *Biology and Fertility of Soils*, 2, p 29-34.
- N. Duc, P. Crill, D. Bastviken., 2010 - Implications of temperature and sediment characteristics on methane formation and oxidation in lake sediments *Biogeochemistry*, pp. 185-196.
- Nawrot T, Plusquin M, Hogervorst J, Roels HA, Celis H, Thijs L, et al., (2006) : Environmental exposure to cadmium and risk of cancer: a prospective population-based study. *Lancet Oncol* 7:119–126.
- Nemmiche Saïd, 2017, Oxidative Signaling Response to Cadmium Exposure. *TOXICOLOGICAL SCIENCES* 156, 4–10. doi: 10.1093/toxsci/kfw222.
- Nocito, F. F., Lancilli, C., Dendena, B., Lucchini, G. et Sacchi, G. A. (2011). Cadmium retention in rice roots is influenced by cadmium availability, chelation and translocation. *Plant, Cell & Environment*, 34(6):994–1008.
- Nouri. (2012). La réponse de la fève *Vicia faba* L au stress salin cas d'un sol sableux amendé.
- NUESSELY G. S., AND S. E. WEBB. 2004 -a. Insect Management for Leaf Vegetables (Lettuce, Endive and Escarole). Entomology & Nematology Department.
- Nzengue Y, (2008) : Comparaison des mécanismes de toxicité redox du cadmium, du cuivre et du zinc: place des métallothionéines et de p53. Thèse doctorat en biologie.
- Oomen, R. J. F. J., Wu, J., Lelièvre, F., Blanchet, S., Richaud, P., Barbier-Brygoo, H., Aarts, M. G. M. et Thomine, S. (2009). Functional characterization of *nrap3* and *nrap4* from the metal hyperaccumulator *thlaspi caerulescens*. *New Phytologist*, 181(3):637–650.

- Pedas, P., Ytting, C. K., Fuglsang, A. T., Jahn, T. P., Schjoerring, J. K. et Husted, S. (2008). Manganese efficiency in barley : Identification and characterization of the metal ion transporter HvIRT1. *Plant Physiology*, 148(1):455–466.
- Pence, N. S., Larsen, P. B., Ebbs, S. D., Letham, D. L. D., Lasat, M. M., Garvin, D. F., Eide, D. et Kochian, L. V. (2000). The molecular physiology of heavy metal transport in the Zn/Cd hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. *Proceedings of the National Academy of Sciences Of the United States of America*, 97(9):4956–4960.
- Persson, D. P., Hansen, T. H., Holm, P. E., Schjoerring, J. K., Hansen, H. C. B., Nielsen, J., Cakmak, I. et Husted, S. (2006). Multi-elemental speciation analysis of barley genotypes differing in tolerance to cadmium toxicity using SEC-ICP-MS and ESI-TOF-MS. *J. Anal. At. Spectrom.*, 21(10):996–1005.
- Pierre, Wavreille José, (2016). FEVROLE UNE LÉGUMINEUSE À GRAINES RICHES EN PROTÉINES ET EN ÉNERGIE , Les protéagineux De la production à la valorisation\* Abras Morgan et Cartryse Christine, Froidmont Eric, JAMAR Daniel, RONDIA.
- Pineros, M. A., Shaff, J. E. et Kochian, L. V. (1998). Development, characterization, and application of a cadmium-selective microelectrode for the measurement of cadmium fluxes in roots of *Thlaspi* species and wheat. *Plant Physiology*, 116:1393–1401.
- Plaza, S., Tearall, K. L., Zhao, F.-J., Buchner, P., McGrath, S. P. et Hawkesford, M. J. (2007). Expression and functional analysis of metal transporter genes in two contrasting ecotypes of the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. *Journal of Experimental Botany*, 58(7):1717–1728.
- Pokorny B, Al Sayegh-Petkovsek S, Ribaric-Lasnik C, Vrtacnik J, Doganoc DZ, Adamic M (2004) Fungi ingestion as an important factor influencing heavy metal intake in roe deer: evidence from faeces. *Sci Total Environ* 324:223-234.
- Poschenrieder C, Gunse B, Barcelo J (1989) Influence of Cd on water relations, stomatal resistance, and abscisic acid content in expanding bean leaves. *J Plant Physiol* 90:1365–1371
- Prasad MN. Ed V. 2004. Heavy Metal Stress in Plants. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Ramos I, Esteban E, Lucena JJ, Garate A (2002) Cadmium uptake and subcellular distribution in plants of *Lactuca sp* Cd-Mn interaction. *Plant Sci* 162: 761-767.
- Rauser WE, Ackerly CA (1987) Localisation of cadmium in granules within differentiating and mature root cells. *Can J Bot* 65:643-646.

- Redjala, T., Sterckeman, T. et Morel, J. L. (2009). Cadmium uptake by roots : Contribution of apoplast and of high- and low-affinity membrane transport systems. *Environmental and Experimental Botany*, 67(1):235–242.
- Redjala, T., Sterckeman, T. et Morel, J.-L. (2010a). Determination of the different components of cadmium short-term uptake by roots. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 173(6):935–945.
- Redjala, T., Sterckeman, T., Skiker, S. et Echevarria, G. (2010b). Contribution of apoplast and symplast to short term nickel uptake by maize and *Leptoplax emarginata*.
- Reeves R.D. et Baker A.J.M., 2000 : Metal-accumulating plants. In : *Phytoremediation of toxic metals-using plants to clean up the environment*. Raskin I., Ensley, B.D. (Eds.), John Wiley et Sons, New York, pp. 193-229.
- Rizwan Muhammad, Ali Shafaqat, Adrees Muhammad, Ibrahim Muhammad et al, 2017. A critical review effects, tolerance mechanisms and management of cadmium in vegetables. *Chemosphere* 182, 90-105. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.05.013>.
- Rodecap KD, Tingey DT, Tibbs JH (1981) Cd-induced ethylene production in bean plant. *Z Pflanzenphysiol* 105:65–74
- Ros R Cooke DT Martinez-Cortina C Picazo I (1992) Nickel and cadmium-related changes in growth, plasma membrane lipid composition, ATPase hydrolytic activity and oration pumping of rice (*Oryza sativa* L. CV. Bahia) shoots. *J Exp Bot* 43:1475-1481.
- Rousselet. E, (2007) : Réponse cellulaire vis-à-vis de l'exposition au cadmium chez les animaux, thèse doctorat en biologie. Université Joseph Fourier-Grenoble 1. 19-72p.
- Salt D.E. et Krämer U., 2003 : Mechanisms of metal hyperaccumulation in plants. In : Raskin I., Ensley B.D. (Eds.), *Phytoremediation of Toxic Metals : Using plants to Clean up the Environment*. John Wiley, New York, pp. 231-246.
- Salt, D. E. et Wagner, G. J. (1993). Cadmium transport across tonoplast of vesicles from roots. evidence for a  $cd^{2+}/h^{+}$  antiport activity. *The Journal of Biological Chemistry*, 268(17):12297–12302.
- Salt, D. E., Prince, R. C., Pickering, I. J. et Raskin, I. (1995b). Mechanisms of cadmium mobility and accumulation in Indian mustard. *Plant Physiology*, 109:1427–1433.
- Sandalio, L.M., Dalurzo, H.C., Gómez, M., Romero-Puertas, M.C. and Del Rio. 2001. “Cadmium-induced changes in the growth and oxidative metabolism of pea plants”. *Journal of Experimental Botany* 52 (364), pp. 2115-2126.

- Sanità di Toppi, L. and Gabbrielli, R, 1999. “Response to cadmium in higher plants”. *Environmental and Experimental Botany* 41, pp.105–130
- Satarug S, Moore M.R, (2004) : Adverse health effects of chronic exposure to low-level cadmium in foodstuffs and cigarette smoke. *Environ Health Perspect* 112:1099–1103.
- Schat, H., Llugany, M., Vooijs, R., Hartley-Whitaker, J. et Bleeker, P. M. (2002). The role of phytochelatins in constitutive and adaptive heavy metal tolerances in hyperaccumulator and non-hyperaccumulator metallophytes. *Journal of Experimental Botany*, 53(379):2381–2392.
- Sela M, Garty J, Tel-Or E, (1989) The accumulation and the effect of heavy metals on the water fern *Azolla filiculoides*. *New Phytol* 112: 7-12.
- Senden, M., van der Meer, A., Verburg, T. et Wolterbeek, H. (1995). Citric acid in tomato plant roots and its effect on cadmium uptake and distribution. *Plant and Soil*, 171:333–339.
- Shim, D., Hwang, J.-U., Lee, J., Lee, S., Choi, Y., An, G., Martinoia, E. et Lee, Y. (2009). Orthologs of the class a4 heat shock transcription factor *hsfa4a* confer cadmium tolerance in wheat and rice. *The Plant Cell Online*, 21(12):4031–4043.
- Slovačková L, Klecová S, Šimonová E, Henselová M, Hudačková J (2007) Antioxidant enzymes of tolerant (*Brassica juncea* L.) and susceptible [*Vigna radiata* (L.) Wilczek] plants to Cd. In: Bláha L (ed) Influence of abiotic and biotic stressors to property of plants 2007. Proceedings VUŘV v.v.i., Prague-Ruzyne, pp 355–362
- Smolders E, McLaughlin MJ (1996a) Chloride increases cadmium uptake in Swiss chard in a resin buffered nutrient solution. *Soil Sci Soc Am J* 60: 1443-1447 .
- Smolders E, McLaughlin MJ (1996b) Effect of Cl on Cd uptake by Swiss chard in nutrient solutions. *Plant Soil* 179:57-644.
- Souguir, D., El Ferjani, E., Ledoigt, G. and Goupil, P, 2008. “Exposure of *Vicia faba* and *Pisum sativum* to copper-induced genotoxicity”. *Protoplasma* 233, pp. 203-207.
- Staessen J.A, Roels H.A, Emelianov D, Kuznetsova T, Thijs L, Vangronsveld J, Fagard R (1999) : Environmental exposure to cadmium, forearm bone density, and risk of fractures: prospective population study. *Public Health and Environmental Exposure to Cadmium (PheeCad) Study Group, Lancet* 353: 1140-1144.
- Sterckeman, T., Redjala, T. et Morel, J. L. (2011). Influence of exposure solution composition and of plant cadmium content on root cadmium short-term uptake. *Environmental and Experimental Botany*, 74(0):131 – 139.

- Sun Q, Wang XR, Ding SM, Yuan XF (2005) Effects of interaction between Cd and plumbum on phytochelatins and glutathione production in wheat (*Triticum aestivum* L.). *J Integr Plant Biol*(*Acta Bot Sin*) 47:435–442
- Sun, Q., Ye, Z. H., Wang, X. R. et Wong, M. H. (2007). Cadmium hyperaccumulation leads to an increase of glutathione rather than phytochelatins in the cadmium hyperaccumulator *Sedum alfredii*. *Journal of Plant Physiology*, 164(11):1489 – 1498.
- Szalai G, Janda T, Galan-Goldhirsh A, Pa'ldi E (2002) Effect of Cd treatment on phytochelatin synthesis in maize. *Acta Biol Szeged* 46:121–122
- Thomine, S., Lelièvre, F., Debarbieux, E., Schroeder, J. I. et Barbier-Brygoo, H. (2003). AtNramp3, a multispecific vacuolar metal transporter involved in plant responses to iron deficiency. *The Plant Journal*, 34(5):685–695.
- Thomine, S., Wang, R., Ward, J. M., Crawford, N. M. et Schroeder, J. I. (2000). Cadmium and iron transport by members of a plant metal transporter family in arabidopsis with homology to nramp genes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 97(9):4991–4996.
- Tommasini, R., Vogt, E., Fromenteau, M., Hörttensteiner, S., Matile, P., Amrhein, N. et Martinoia, E. (1998). An abc-transporter of arabidopsis thaliana has both glutathione-conjugate and chlorophyll catabolite transport activity. *The Plant Journal*, 13(6):773–780.
- Tsyganov VE, Belimov AA, Borisov AY, Safronova VI, Georgi M, Dietz KJ, Tikhonovich IA (2007) A chemically induced new pea (*Pisum sativum*) mutant SGECd with increased tolerance to, and accumulation of, Cd. *Ann Bot* 99:227–237
- Ueno, D., Koyama, E., Yamaji, N. et Ma, J. F. (2011a). Physiological, genetic, and molecular characterization of a high-cd-accumulating rice cultivar, jarjan. *Journal of Experimental Botany*, 62(7):2265–2272.
- Ueno, D., Milner, M. J., Yamaji, N., Yokosho, K., Koyama, E., Clemencia Zambrano, M., Kasikie, M., Ebbs, S., Kochian, L. V. et Ma, J. F. (2011b). Elevated expression of tchma3 plays a key role in the extreme cd tolerance in a cd-hyperaccumulating ecotype of *Thlaspi caerulescens*. *The Plant Journal*, 66(5):852–862.
- Uraguchi, S., Watanabe, I., Yoshitomi, A., Kiyono, M. et Kuno, K. (2009b). Characteristics of cadmium accumulation and tolerance in novel cd-accumulating crops, *Avena strigosa* and *Crotalaria juncea*. *Journal of Experimental Botany*, 57(12):2955–2965.
- VanDeMortel, J. E., Schat, H., Moerland, P. D., VanThemaat, E. V. L., VanDerEnt, S., Blankestijn, H., Ghandilyan, A., Tsiatsiani, S. et Aarts, M. G. M. (2008). Expression diffe-

- rences for genes involved in lignin, glutathione and sulphate metabolism in response to cadmium in *arabidopsis thaliana* and the related zn/cd-hyperaccumulator *thlaspi caerulescens*. *Plant Cell and Environment*, 31(3):301–324.
- Vassilev A, Yordanov I (1997) Reductive analysis of factors limiting growth of cadmium-treated plants: a review. *Bulg J Plant Physiol* 23: 114-133.
  - Vassilev A, Yordanov I, Tsonev T (1997) Effects of Cd<sup>2+</sup> on the physiological state and photosynthetic activity of young barley plants. *Photosynthetica* 34: 293-302.
  - Vazquez MD, Poschenrieder C, Barcelo J (1992) Ultrastructural effects and localization of low cadmium concentrations in bean roots. *New Phytol* 120: 215-226.
  - Verbruggen, N., Hermans, C. et Schat, H. (2009). Molecular mechanisms of metal hyperaccumulation in plants. *New Phytologist*, 181(4):759–776.
  - Verbruggen, N., Hermans, C. et Schat, H. (2009). Molecular mechanisms of metal hyperaccumulation in plants. *New Phytologist*, 181(4):759–776.
  - Vinkel B (2001) Analyse de la composition en éléments traces dans le grain de variétés de blé - Programme QUASAR. Institut de Santé Publique, d'Epidémiologie et de Développement.
  - Vollenweider, P., Cosio, C., Gunthardt-Goerg, M. S. et Keller, C. (2006). Localization and effects of cadmium in leaves of a cadmium-tolerant willow (*salix viminalis* L.) : Part ii microlocalization and cellular effects of cadmium. *Environmental and Experimental Botany*, 58(1-3):25–40.
  - Waalkes M.P, (2003) : Cadmium carcinogenesis. *Mutat Res* 533:107–120.
  - Wagner GJ (1993) Accumulation of cadmium in crop plants and its consequences to human health. *Adv Agron* 51: 173-212.
  - Wang Y, Zhang X, Zhang H, Lu Y, Huang H, Dong X, Chen J, Dong J, Yang X, Hang H., 2012 -Coiled-coil networking shapes cell molecular machinery. *Mol Biol Cell* 23(19):3911-22.
  - Weggler K, McLaughlin MJ, Graham RD (2004) Effect of chloride in soil solution on the plant availability of biosolid-borne cadmium. *J Environ Qual* 33:496-504.
  - Weggler-Beaton K, McLaughlin MJ, Graham RD (2000) Salinity increases cadmium uptake by wheat and Swiss chard from soil amended with biosolids. *Aust J Soil Res* 38:37-455.
  - Weigel HJ, Jager HJ (1980) Subcellular distribution and chemical form of cadmium in bean plants. *Plant Physiol* 67:480-48.
  - Welch, R. M. et Norvell, W. A. (1999). Mechanisms of cadmium uptake, translocation and deposition in plants. In McLaughlin, M. J. et Singh, B. R., éditeurs : *Cadmium in soils and plants*, pages 125–150. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

- Welch, R. M. et Norvell, W. A. (1999). Mechanisms of cadmium uptake, translocation and deposition in plants. In McLaughlin, M. J. et Singh, B. R., éditeurs : Cadmium in soils and plants, pages 125–150. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- WELCH, R. M. (1995). Micronutrient nutrition of plants. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 14, p 49-82.
- White, P. J. et Broadley, M. R. (2003). Calcium in plants. *Annals of Botany*, 92:487–511.
- WHO (2000) Air Quality Guidelines for Europe, chapter 6.2, WHO Regional Office for Europe, Copenhagen, Denmark, pp 11.
- Wojas, S., Hennig, J., Plaza, S., Geisler, M., Siemianowski, O., Skodowska, A., Ruszczyska, A., Bulska, E. et Antosiewicz, D. M. (2009). Ectopic expression of arabidopsis abc trans-porter mrp7 modifies cadmium root-to-shoot transport and accumulation. *Environmental Pollution*, 157(10):2781 – 2789.
- Wojcik M, Vangronsveld J, D'Haen J, Tukiendorf A (2005) Cadmium tolerance in *Thlaspi caerulescens*. II. Localization of cadmium in *Thlaspi caerulescens*. *Environ Exp Bot* 53: 163-171.
- Wong, C. K. E. et Cobbett, C. S. (2009). Hma p-type atpases are the major mechanism for root-to-shoot cd translocation in arabidopsis thaliana. *New Phytologist*, 181(1):71–78
- ZAGHOUANE O., 1991 .the situation of faba bean (*vicia faba*) in Alegria .option méditerranéenne , present statut and future perspects of faba bean production I.C.A.R.D.A.serie A .N° 10.pp 123-125.
- Zhang G., Fukami M. et Sekimoto H., 2000 : Genotypic differences in effects of cadmium on growth and nutrient compositions in wheat. *J. Plant. Nutr.* 23 : 1337-1350.
- Zhao FJ, Hamon RE, Lombi E, McLaughlin MJ, McGrath SP (2002) Characteristics of Cd uptake in two contrasting ecotypes of the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. *J Exp Bot* 53:535–543
- Zheng N, Wang Q et 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. *Sci Total Environ.* 383: 81-89.
- Zorrig W, (2010) : Recherche et caractérisation de déterminants contrôlant l'accumulation de cadmium chez la laitue "*Lactuca sativa*", thèse doctorat en Physiologie végétale et biologie moléculaire. Université Tunis El Manar. 15-20 et 24-29p.



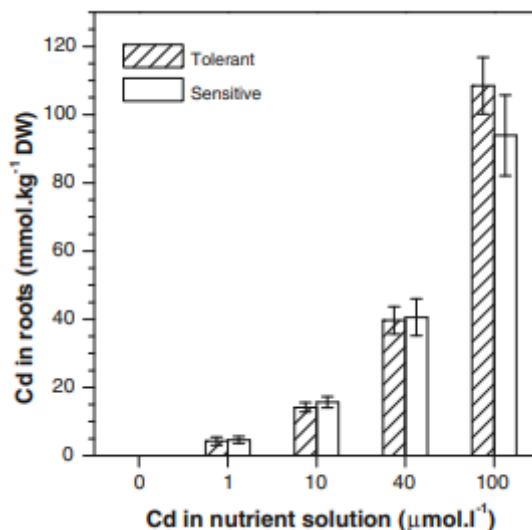
# LES ANNEXS

**Annexe 01** : Evaluation de la superficie et production de la fève et féverole en Algérie

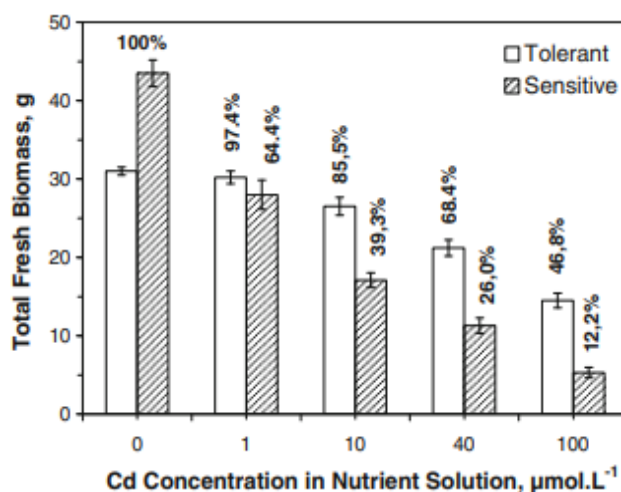
( FAOSTAT ,2015) :

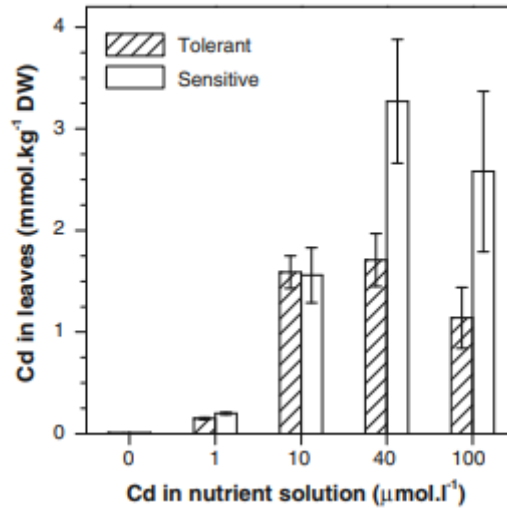
Compagne agricole	Superficie (ha)	Production (qx)	Rendement (qx/ha)
2000/2001	31416	211760	6.64
2001/2002	33565	228880	6.82
2002/2003	34028	306810	9.02
2003/2004	36767	320450	8.72
2004/2005	35031	268330	7.66
2005/2006	33537	242986	7.25
2006/2007	31284	279735	8.94
2007/2008	30688	235210	7.66
2008/2009	32278	364949	11.31
2009/2010	27782	366252	8.93
2010/2011	27937	2483465	8.92
2011/2012	30172	2577002	8.75
2012/2013	30833	2969634	9.80
2013/2014	30833	2959716	9.61
2014/2015	30055	2495373	8.37

**Annexe 02 :** Dépendance de la concentration de Cd ( $\text{mmol kg}^{-1}$  DW) dans le racines de cultivars *Vicia faba L.* (Giza 40 tolérante au Cd et sensible au Cd Gizeh 2) sur la concentration de Cd ( $\text{l mol}^{-1}$ ) en solution nutritive. Les données les points représentent la moyenne  $\pm$  erreur standard ( $n = 5$ )

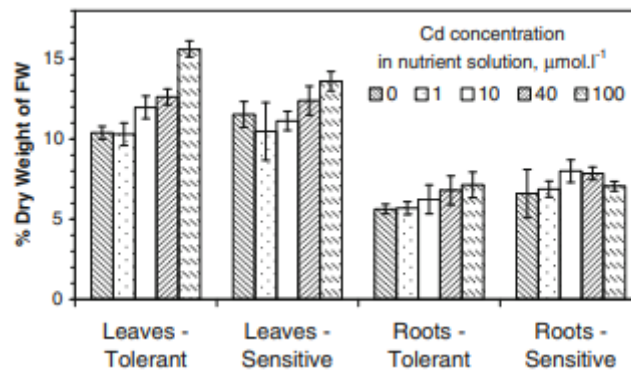


**Annexe 03 :** Dépendance de la concentration de Cd ( $\text{mmol kg}^{-1}$  DW) dans les feuilles de cultivars *Vicia faba L.* (Cd-tolérant Giza 40 et Cdsensible Giza 2) sur la concentration de Cd dans la solution nutritive. Les données les points représentent la moyenne  $\pm$  erreur standard ( $n = 5$ )





**Annexe 4** : Dépendance de la production totale de biomasse végétale de *Vicia faba L.* cultivars (Giza 40 tolérant au Cd et Giza 2 sensible au Cd) sur le Cd concentration en solution nutritive (umol l-1 ). Les nombres représentent production de biomasse exprimée en% du témoin (0 umol l-1 Cd) (n =5)



**Annexe 5** : Dépendance de la production de biomasse en poids sec (feuilles et racines) de cultivars *Vicia faba* (Giza 40 tolérante au Cd et sensible au Cd Gizeh 2) sur la concentration de Cd dans la solution nutritive (umol l-1).La production de biomasse est exprimée en% du poids frais. Les points de données représentent la moyenne ± erreur standard (n = 5)

**Annexe 6** : facteur de translocation chez les cultivars sensible et tolérant.

FT[C]	FT [1]	FT [10]	FT [40]	FT [100]
Sensible	0.05	0.106	0.081	0.026
Tolérant	0.048	0.0113	0.044	0.011

## Résumé

Le cadmium fait partie des métaux lourds. C'est un élément naturel présent dans certains minerais comme le zinc ou les phosphates, sous forme d'impuretés. Ses caractéristiques physico-chimiques font qu'il est utilisé dans l'industrie électrique, en métallurgie mais aussi dans des pigments ou comme stabilisant pour les matières plastiques. Il est considéré comme un métal lourd toxique. Une contamination en Cd du sol entraîne une exposition des racines via la solution du sol et la phytotoxicité de Cd se traduit par une diminution de la biomasse et la teneur en eau des plantes. Son effet est plus important que la contamination est élevée.

L'objectif de travail consiste à suivre l'accumulation et la translocation de cadmium chez la fève (*Vicia faba L.*). Les graines sont cultivées dans une solution nutritive contenant différentes doses de chlorure de cadmium ( $\text{CdCl}_2$ ), les doses retenues sont 0, 1, 10, 40, 100  $\mu\text{mol l}^{-1}$ . Face au stress cadmique, nous avons noté que les cultivars tolérant et sensible au Cd a transféré le vers les parties aériennes mais la translocation est faible et l'accumulation plus forte dans les racines que dans les parties aériennes, les résultats obtenus montrent que les cultivars sensibles ont une grande capacité à mobiliser le cadmium car les feuilles du cultivar sensible contiennent une concentration du cadmium environ deux fois plus élevée que celle du tolérant.

**Mots clé :** cadmium, phytotoxicité, fève (*Vicia faba L.*), accumulation, translocation.

## Abstract

Cadmium is one of the heavy metals. It is a natural element present in certain minerals such as zinc and phosphates, in the form of impurities. Its physicochemical characteristics make it used in the electrical industry, in metallurgy but also in pigments or as a stabilizer for plastics. It is considered a toxic heavy metal. Cd contamination of the soil results in exposure of the roots via the soil solution and the phytotoxicant of Cd results in a decrease in biomass and water content of plants. Its effect is greater as the contamination is high.

The objective of the work is to follow the accumulation and translocation of cadmium in the bean (*Vicia faba L.*). The seeds are grown in a nutrient solution containing different doses of cadmium chloride  $\text{CdCl}_2$ , the doses used are 0, 1, 10, 40, 800, 100  $\mu\text{mol l}^{-1}$ . Faced with cadmic stress, we noted that cultivars tolerant and sensitive to Cd transferred the towards the aerial parts but the translocation is weak and the accumulation higher in the roots than in the aerial parts, the results obtained than the sensitive cultivars have a great capacity to mobilize cadmium because the leaves of the susceptible cultivar contain a concentration of cadmium approximately twice that of the tolerant.

**Keywords:** cadmium, phytotoxicity, bean (*Vicia faba L.*), accumulation, translocation.

## المخلص

الكادميوم هو احد المعادن الثقيلة ، وهو عنصر طبيعي موجود في معادن معينة مثل الزنك والفسفات في شكل شوائب. خصائصه الفيزيائية و الكيميائية تجعله يستخدم في الصناعة الكهربائية ، و في علم المعادن و يستخدم أيضا في الأصباغ و مثبت للبلاستيك ، يعتبر من المعادن الثقيلة السامة يؤدي تلوث التربة بالكادميوم إلى التسمم النباتي بتعرضه للجذور عن طريق محلول التربة و انخفاض في الكتلة الحيوية و محتوى الماء في النبات و يكون تأثيره اكبر عندما يكون التلوث مرتفع.

الهدف من هذا العمل هو تقييم تراكم و انتقال الكادميوم في الفول ( *Vicia faba L.* ). تزرع البذور في محلول مغذي يحتوي على جرعات مختلفة من Cdc12، الجرعات المستخدمة هي 0، 1، 10، 40، 100 ميكرومول لتر 1- . في مواجهة الإجهاد الكادمي، لاحظنا أن الأصناف المتحملة و الحساسة للكادميوم نقلته نحو الأجزاء الهوائية لكن الإزاحة كانت ضعيفة و تراكم اقوي في الجذور على الأجزاء الهوائية، وظهرت النتائج المتحصل عليها أن الصنف الحساس لديه قدرة كبيرة على حركة تنقل الكادميوم ، لان أوراق الصنف الحساس تحتوي على حوالي ضعف تركيز الكادميوم بالنسبة لصنف المتحمل.

الكلمات المفتاحية : الكادميوم – السمية النباتية – الفول ( *Vicia faba L.* )- التراكم – الانتقال -الأصناف المقاومة و المتحملة.