

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA**

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

Département des Biotechnologies

**THESE DE DOCTORAT ES**

En Agronomie

Spécialité : Agro-Ressources

**EFFETS DU CADMIUM SUR LA CROISSANCE DE BLE  
TENDRE**

**(*Triticum aestivum L.*)**

Par

**BOUZIANI Yamna**

Devant le jury composé de

Mr. SNOUSSI S.A.	Professeur, U.de Blida 1	Président
Mr. BENMOUSSA .M.	Professeur, U.de Blida 1	Directeur de thèse
Mme. BRADEA.M	Professeur, U. de Blida 1	Examinatrice
Mr. REGUIEG.L	Professeur, ENSA d'Elharrach	Examineur
Mr. LAZALI.M	MCA, U de Khemis	Examineur
Mr. BOUSALHIH.B	MCA, U. de Khemis	Examineur

Blida, Septembre 2020

## Résumé

Le cadmium est l'un des éléments métalliques de trace les plus dangereux quelque soit pour le végétal ou la santé humaine. Sur le blé qui une plante largement cultivé pour ses graines et son paille ; on à étudié l'effet d'une gamme de concentration de cadmium (0 ; 50mg/L ; 100mg/L ; 150mg/L et 200mg/L) sur les paramètres de germinations, La croissance relative des plantules, le taux de chlorophylle a et b, la proline, les sucres solubles et le taux d'accumulation de Cd de quatre variétés de blé tendre (*Triticum aestivum* L) appréciées par nous agriculteurs Anza Arz Hiddab et Ain abid. Les résultats montrent une phytotoxicité croissante suivant l'augmentation de la dose en Cd sur le taux de germination, longueur des coléoptiles et racelles le poids sec des racines et coléoptiles l'indice de tolérance comparé avec le témoin pour les quatre variétés étudiés néanmoins la variété Hiddab se montre plus sensible ; Où on note une réduction importante de la longueur des racelles par rapport aux autre paramètres.

Une réduction importante de la croissance relative des plantules des quatre variétés mais d'une manière différente. Une perturbation des différents processus physiologiques est enregistrée, diminution de l'assimilation chlorophyllienne graduellement avec l'augmentation de la dose en Cd sur la chlorophylle a et b comparés avec les témoins, augmentation des taux de la proline et les sucres solubles et le taux de Cd dans les plantules suivant l'augmentation de la concentration du Cd.

**Mots clés :** Cadmium, indice de tolérance ; phytotoxicité l'assimilation chlorophyllienne, processus physiologique, proline.

## Abstract

The wheat is being a plant largely cultivated for its seeds and its straw, therefore, the research of tolerant varieties to this dangerous element for the plant or the human health is necessary. Its concentration increases day after day in the ground considering the development of the farming which involves the intensive contributions of this polluting metal element. The objective of this study is to test the effect of a range of cadmium concentration from 0 to 200mg/L  $Cd^{+2}$  on the germination parameters of four varieties of bread wheat Anza, Arz, Hiddab and Ain abid. The results show that the phytotoxicity increases, according to the Cd amount on the rate of germination, root and shoot length, root and shoot dry weight and tolerance index compared with varieties studied, nevertheless, Hiddab variety shows more sensitivity.

An important reduction of the relative growth of the seedlings of the four varieties has been noticed but in a different way. A disturbance of the various physiological processes is observed, a decrease of the photosynthesis gradually with the increase of the rate in Cd on the chlorophyll a and b compared with the control, increase of the rates of the proline, the soluble sugars and the rate of Cd in seedlings following the increase in concentration of Cd.

**Key words:** Cadmium, tolerance index, phytotoxicity, the photosynthesis, process physiological, proline

## المخلص

يعد الكاديوم من أخطر العناصر المعدنية سواء بالنسبة للنبات أو صحة الإنسان. بالنسبة لنبات القمح الذي يزرع على نطاق واسع من أجل بذوره و قصته، قمنا بدراسة تأثير مجموعة تراكيز مختلفة من الكاديوم (0; 50 ملغ / لتر; 100 ملغ / لتر; 150 ملغ / لتر و 200 ملغ / لتر) على معايير الإنتاج، النمو العام للشتلات، نسب الكلوروفيل أ و ب ، السكريات القابلة للذوبان و معدل تراكم الكاديوم على أربعة أنواع من القمح اللين المفضلة عند الفلاحين (أنزا، أرز، هدا ب و عين أبيد).

أبرزت النتائج أن معدل السمية يتزايد بتزايد جرعة الكاديوم على كل المعايير المدروسة: نسبة الإنتاج، معدل النمو و مؤشر القابلية مقارنة مع الشواهد. خاصة النوع هدا ب الذي كان أكثر حساسية لهذا المعدن.

انخفاض ملحوظ للنمو العام للأنواع الأربعة ولكن بمعدلات متفاوتة. حيث سجلنا اضطراب في مختلف العمليات الفسيولوجية، وانخفاض في استيعاب الكلوروفيل تدريجيا مع زيادة الجرعة على الكلوروفيل أ و ب مقارنة بالشواهد، وزيادة في السكريات القابلة للذوبان و البرولين و معدل تراكم الكاديوم في الشتلات.

المصطلحات: الكاديوم، مؤشر الإنتاج، العمليات الفسيولوجية، البرولين

## DEDICACES

Je dédie ce modeste travail à :

- Mes parents, surtout ma mère pour son aide précieuse et son encouragement ;
- Mes frères : Ali, Mustapha et Hichem et mon beau frère Mohammed
- Mes sœurs : Fatiha, Soumia et Louiza et mes belles sœurs Chérifa et Fulla
- Sans oublier les petites Rawnak et Hind

Sans oublier mes copines, mes amis de près et de loin.

**M<sup>elle</sup> B. YAMNA**

## REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail :

Je commencerai par remercier et rendre grâce à Dieu le tout puissant pour m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à bon terme cette thèse.

Je tiens à présenter mes remerciements les plus profonds à monsieur le professeur BENMOUSSA M. qui m'a encadré et m'a permis de mener à bien ce travail grâce à son dévouement et ses conseils.

Mes vifs remerciements s'adressent également à :

- A M<sup>r</sup> S.A. SNOUSSI, qui me fait l'honneur d'accepter de présider le jury, et d'apporter son jugement sur ce travail.
- A M<sup>r</sup> LAZALI, qui a bien voulu examiner et apprécier ce travail.
- A M<sup>r</sup> REGUIEG L pour avoir accepté d'examiner et juger ce travail.
- A M<sup>r</sup> BOUSALHIH pour avoir accepté d'examiner et juger ce travail.
- M<sup>me</sup> BRADEA M, qui me fait l'honneur d'accepter de juger ce travail.

A tous mes enseignants et professeurs.

Aux personnels de département des Biotechnologies de l'université de SAAD DAHLEB de Blida.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude aux personnes qui ont contribué à la réalisation de ce travail.

M<sup>elle</sup> B.YAMNA

## SOMMAIRE

RESUME	
REMERCIEMENTS	
LISTES DES FIGURES ET TABLEAUX	
TABLES DES MATIERES	
INTRODUCTION	13
CHAPITRE1 : METAUX LOURDS ET L'ENVERONNEMENT	
1.1. Notion des métaux lourds	16
1.2. Origine de contamination du sol	17
1.2.1 Sources naturelles de contamination	17
1.2.2 Sources anthropiques de contamination (d'origine humaine)	18
CHAPITRE 2 : CAS DU CADMIUM	
2.1.Elément du cadmium	21
2.2. Origine naturelle du cadmium	21
2.3. Origine anthropique du cadmium	20
2.3.1. Rejets de l'activité industrielle	20
2.3.2. . Rejets d'origine agricole	23
2.4.Biodisponibilité du cadmium	24
2.4.1. Formes de cadmium dans le sol	24
2.4.2. Facteurs influençant la biodisponibilité du cadmium	25
2.4.2.1. pH du sol	25
2.4.2.2. Matière organique	25
2.4.2.3. Capacité d'échange cationique (CEC)	26
2.4.2.4. Température du sol	26
2.4.2.5. Compétition et synergie entre éléments	26
CHAPITRE 3 : CADMIUM ET LA PLANTE	
3.1.Phytotoxicité du cadmium	28
3.1.1. Effet du cadmium sur la nutrition minérale	29
3.1.2. Effet du cadmium sur la croissance	30
3.1.3. Effet du cadmium sur les processus métabolique	31

3.1.4. Cadmium induit un stress oxydatif	32
3.2. Mécanismes de défense de la plante	33
3.3. Absorption racinaire	40
3.3.1. Absorption foliaire	41
3.3.2. Accumulation du cadmium	41
CHAPITRE 4 : RAPPEL SUR LA CULTURE DU BLE TENDRE	
4.1. Origine géographique et génétique du blé tendre	44
4.2. Classification	45
4.3. Caractères morphologiques	45
4.4. Cycle végétatif	48
CHAPITRE 5 : MATERIELS ET METHODES	
5.1. Objectif de l'étude	51
5.2. Matériel végétal	51
5.3. Condition de l'expérimentation	51
5.4. Essai de germination	51
5.4. 1. Paramètres de germination	53
5.5. Essai de culture	54
5.5.1. Paramètres étudiés	55
5.6. Analyses statistiques	56
CHAPITRE 6 : RESULTATS ET DISCUSSIONS	
6.1. Analyses des paramètres de l'essai de germination	57
6.1.1. Résultats	57
6.1.2. Discussion	66
6.2. Analyse des paramètres de l'essai de culture	69
6.2.1. Résultats	70
6.2.2. Discussion	79
Conclusion	83
Annexes	
Références	
Publication	

## LISTE DES FIGURES

1	Production des espèces réactives de l'oxygène (ROS) par les métaux lourds	31
2	Effets biologiques cellulaires des espèces réactives de l'oxygène	33
3	Structure d'une phytochélatine (d'après Steffens, 1990). n = 2 à 11	35
4	Régulation de la biosynthèse des phytochélatines (PCs) et du glutathion (GSH) chez les plantes.	36
5	Formation et accumulation de complexes phytochélatines-métal à haut poids moléculaire dans les vacuoles à partir de l'exemple des ions cadmium Cd <sup>2+</sup> .	37
6	Coupe d'un grain de blé	46
7	taux de germination des variétés étudiées	57
8	Effet de différentes concentrations de cadmium sur la variation de l'allongement des coléoptiles et des racelles pour les variétés de blé tendre étudiées.	58
9	Effet de différentes concentrations de cadmium sur la variation du poids de la matière fraîche des coléoptiles et des racines pour les variétés de blé tendre étudiées.	59
10	Effet de différentes concentrations de cadmium sur la variation de la biomasse relative de la matière fraîche des coléoptiles et des racines pour les variétés de blé tendre étudiées.	59
11	Effet de différentes concentrations de cadmium sur la variation du poids de la matière sèche des coléoptiles et des racines pour les variétés de blé tendre étudiées.	60
12	Effet de différentes concentrations de cadmium sur la variation de la biomasse relative de la matière sèche des coléoptiles et des racines pour les variétés de blé tendre étudiées.	60

13	Effet de différentes concentrations de cadmium sur la phytotoxicité des coléoptiles et des racines pour les variétés de blé tendre étudiées.	62
14	Effet de différentes concentrations de cadmium sur la vigueur et la tolérance des plantules des variétés de blé tendre étudiées	63
15	Corrélation l'indice de tolérance en fonction de l'indice de vigueur des plantules des variétés de blé tendre étudiées sous l'effet des différentes concentration de CdCl <sub>2</sub> .	63
16	Effet de différentes concentrations de cadmium sur la variation de la biomasse fraîche des feuilles et des racines pour les variétés de blé tendre étudiées.	68
17	Effet de différentes concentrations de cadmium sur la variation de la biomasse relative de la matière fraîche des feuilles et des racines pour les variétés de blé tendre étudiées	69
18	Effet de différentes concentrations de cadmium sur la variation de la biomasse sèche des feuilles et des racines pour les variétés de blé tendre étudiées.	70
19	Effet de différentes concentrations de cadmium sur la variation de la biomasse relative de la matière sèche des feuilles et des racines pour les variétés de blé tendre étudiées.	70
20	Effet des différentes concentrations de cadmium sur le rapport entre masse sèche et masse fraîche des parties aériennes et des racines pour les variétés de blé tendre étudiées	71
21	Effet des différentes concentrations de cadmium sur le rapport entre masse sèche et masse fraîche relative des parties aériennes et des racines pour les variétés de blé tendre étudiées	72
22	Effet de différentes concentrations de cadmium sur l'assimilation de la chlorophylle a des variétés de blé tendre étudiées.	73
23	Effet de différentes concentrations de cadmium sur l'assimilation de la chlorophylle c des variétés de blé tendre étudiées	74
24	Effet de différentes concentrations de cadmium sur la proline des variétés de blé tendre étudiées	75
25	Effet de différentes concentrations de cadmium sur les sucres solubles des variétés de blé tendre étudiées	76

- 26 Effet de différentes concentrations de cadmium sur son accumulation par les variétés de blé tendre étudiées 77
- 27 Corrélation de la croissance relative et taux du Cd dans les parties aériennes des variétés étudiées

## LISTE DES TABLEAUX

1	Principales sources anthropiques de pollution des sols par les métaux lourds les plus fréquents	20
2	Teneurs moyennes ( $\mu\text{g.g}^{-1}$ ) en cadmium des différentes roches de la croute terrestre	21
3	influence de la variété sur la concentration moyenne en Cd, Cu et Zn en $\text{mg.kg}^{-1}$ de matière sèche de blé tendre français	41
4	Caractéristiques des variétés étudiées	51
5	Test de corrélation de Person entre les différents paramètres étudiés	67

## INTRODUCTION

Les métaux lourds sont des constituants naturels de tous les écosystèmes et on les trouve dans l'atmosphère, l'hydrosphère, la lithosphère et la biosphère. Leur distribution dans l'environnement procède de deux origines : l'une, naturelle est le résultat de processus géogéniques comme l'érosion, les précipitations géochimiques de roches et de l'eau de source, l'activité volcanique et bactérienne (Sanita di Toppi et Gabbrielli, 1999; Baize et Sterckeman, 2001); l'autre, relève des activités anthropogéniques. En effet, ces dernières années, le développement des activités industrielles a provoqué un accroissement considérable de la teneur en métaux lourds dans l'environnement où ils peuvent parvenir de différentes manières.

- Sous forme gazeuse, dissoute ou de particules liées, les polluants peuvent pénétrer dans le sol par voie aérienne (déposition sèche),
- En utilisant l'eau comme vecteur de transport (précipitation, eau de surface, déposition humide)
- Ou encore via des solides organiques tels les boues d'assainissement, le compost, les fertilisants les engrais surtout phosphatés et les pesticides, etc...

Chez les végétaux, certains métaux lourds sont indispensables aux processus physiologiques majeurs, en particulier la respiration, la photosynthèse ou l'assimilation des macronutriments (Cu, Zn, Ni, Fe, Co) (Kabata-Pendias et Pendias, 2001). Certains de ces métaux sont aussi impliqués dans les processus moléculaires tels que le contrôle de l'expression des gènes, la biosynthèse des protéines, des acides nucléiques, des substances de croissance, de la chlorophylle et des métabolites secondaires, le métabolisme lipidique ou la tolérance au stress (Rengel, 1999).

En outre, certains métaux lourds peuvent se présenter sous différents états d'oxydation ( $\text{Cu}^{2+} + e^- \rightarrow \text{Cu}^+$ ). Ils jouent ainsi un rôle d'accepteurs ou de donneur d'électrons, très important dans les multiples systèmes enzymatiques mettant en

jeu des réactions d'oxydoréduction (Chaignon, 2001). Pour autant, les métaux lourds n'ont pas tous une fonction connue à ce jour dans le métabolisme de la plante et certains sont considérés comme des éléments toxiques (Hg, Cr, Ni, Pb et Cd) (Kabata-Pendias et Pendias, 2001). Tous les métaux lourds peuvent, à partir d'une concentration seuil, induire une toxicité chez les plantes.

De nombreuses études ont montré que la présence d'éléments traces métalliques et plus particulièrement le Cd dans le milieu de culture peut se traduire, au-delà d'une certaine limite, par l'apparition de symptômes d'intoxication, accompagnés d'une inhibition de la croissance pondérale des plantes, d'une réduction de l'activité photosynthétique et d'une diminution de l'absorption des nutriments (Zhou et Qiu, 2005 ; Clemens, 2006 ; Verbruggen et al ; 2009 et DalCorso et al, 2013). Ces propriétés physiques et chimiques sont proches de celles du zinc et du calcium, lui permettent de traverser les barrières biologiques et de s'accumuler dans les tissus. On l'identifie comme étant 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 strates 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 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).

Quant au blé, il constitue l'aliment de base d'un tiers de l'humanité, lui fournissant ces calories et protéines, plus que toute autre plante cultivée, dont il a besoin des apports en éléments fertilisants en ce qui concerne l'azote , le phosphore et le potassium pour compléter le manque de la partie fournie par le sol qui toujours insuffisante pour une production optimale.

En Algérie, Suivant les efforts déployés pour augmenter sa production, l'utilisation intensive des engrais surtout ceux du fond et particulièrement l'engrais phosphaté crée un autre problème qui est la pollution du sol par les métaux lourds particulièrement le Cd ; d'après Szolnoki et al, (2013) Le contenu de cadmium

dans des engrais de phosphate s'étend entre 2 et 200 mg/kg. Cela augmente l'exposition de la plante au stress par ces éléments dangereux quelque soit pour elle ou l'être humain suivant la chaîne alimentaire.

Dans ce contexte, Le présent travail a pour objectif de montrer l'effet de cet élément toxique sur le processus de germination, les paramètres physiologiques et son accumulation sur quatre variétés de blé tendre afin d'identifier la plus sensible et la plus résistante au cadmium.

## CHAPITRE 1

### METAUX LOURDS ET L'ENVIRONNEMENT

#### 1.1. Notion des métaux lourds

Un métal est une matière, issue le plus souvent d'un minerai ou d'un autre métal. Il est un bon conducteur de chaleur et d'électricité. On appelle en général métaux lourds les éléments métalliques naturels, métaux ou dans certains cas métalloïdes, les métaux caractérisés par une masse volumique élevée, supérieure à 5 grammes par cm<sup>3</sup> (Alloway et Aayres, 1997).

Ils sont présents dans tous les compartiments de l'environnement, mais en général en quantités très faibles. On dit que les métaux sont présents "en traces". Ils sont aussi "la trace" du passé géologique et de l'activité de l'homme.

La classification en métaux lourds est d'ailleurs souvent discutée car certains métaux toxiques ne sont pas particulièrement "lourds" (le zinc), tandis que certains éléments toxiques ne sont pas tous des métaux (l'arsenic par exemple). Pour ces différentes raisons, la plupart des scientifiques préfèrent à l'appellation métaux lourds, l'appellation "éléments en traces métalliques" ou "éléments traces" (Nieboer et Richardson (1980).

Les éléments Traces Métalliques (ETM) sont des éléments naturellement présents dans les sols dont certains sont indispensables aux plantes, on parle des oligo-éléments. À trop faible dose ils provoquent des carences dans l'organisme, mais ils deviennent toxiques à haute concentration, c'est le cas du cuivre (Cu), du nickel (Ni), du zinc (Zn) et du fer (Fe), par exemple le zinc à la concentration millimolaire, est un oligo-élément qui intervient dans de nombreuses réactions enzymatiques (déshydrogénase, protéinase, peptidase) et joue un rôle important dans le métabolisme des protéines, glucides et des lipides (Kabata-Pendias et Pendias 2001). Il en va de même pour d'autres ETM dont le caractère

indispensable n'est pas démontré et en parallèle, ils ont un caractère polluant avec des effets toxique pour les organismes vivants même à faible concentration, comme le cas du cadmium (Cd), du mercure (Hg) et du plomb(Pb).

L'exposition excessive aux métaux lourds peut conduire à des effets très néfastes sur la santé humaine. Or les produits végétaux sont à la base de la chaîne alimentaire donc ils contribuent à l'imprégnation de l'homme par ces métaux lourds, d'où l'intérêt d'étudier et de contrôler l'accumulation des métaux lourds dans les végétaux.

### 1.3. Origine de contamination du sol

Les métaux se répartissent dans les sols sous des formes variées. On les trouve sous forme échangeable dans les argiles et la matière organique qui leur permet d'être absorbés par les plantes, sous forme de complexes ou associés à des molécules organiques. Ils peuvent être inclus dans des phases cristallines ou directement adsorbés sur des particules d'oxydes ou d'hydroxydes de fer, d'aluminium et de manganèse. Enfin, ils peuvent être retenus dans les restes d'un organisme vivant qui les contenait. La forme des métaux dans les sols dépend de manière dynamique de leur composition minéralogique, des conditions de salinité, de pH, d'oxydo-réduction, de la granulométrie du sol, de sa teneur en eau, de la présence de ligands en solution et de micro-organismes. Tous ces facteurs influencent la solubilisation des métaux ou au contraire, leur précipitation ou leur adsorption (Nowak, et al 2003, Laperche et al, 2005). Les interactions entre les différents compartiments du sol ont lieu par l'intermédiaire de la solution du sol qui transporte les métaux sous toutes leurs formes, solubles ou particulières. La forme sous laquelle les éléments traces sont présents dans le sol conditionne leur mobilité et leur biodisponibilité.

Ils peuvent y'avoir deux origine :

#### 1.2.1 Sources naturelles de contamination

En dehors de toute intervention de l'homme, les sols ont une concentration naturelle en métaux provenant de l'altération de la roche-mère. Elle s'effectue sur une échelle de temps de l'ordre de plusieurs milliers d'années et est la source principale de contamination naturelle du sol en métaux par exemple dans les sols

non pollués, le contenu en cadmium est généralement entre 0,1 et 2 ppm et la plupart du temps il est inférieur à 1 ppm (Kabata-Pendias et al, 2001).

D'autres sources de contamination naturelle des sols par les métaux sont identifiables, mais leur contribution est relativement faible comparée à l'apport d'origine géologique. Citons Denis-Baize, (1997) et Nriagu, (1989) :

- Le cycle biogéochimique entre les sols et les plantes. Celles-ci absorbent des métaux dans le sol ou bien par voie atmosphérique, puis les redéposent à la surface (feuilles mortes, décomposition des végétaux...).
- Processus d'accumulation, dans un horizon du sol, des métaux provenant d'un autre horizon (illuviation).
- Apport par lessivage du sol et érosion en surface.
- Apports lointains d'origine atmosphérique : volcans (émissions d'As, Hg, Ni, Zn), feux de forêt (émission de Zn), embruns marins (émissions de Hg, Na), poussières et aérosols transportés par les vents.

### **1.2.2 Sources anthropiques de contamination (d'origine humaine)**

Ce type de contamination intervient sur une échelle de temps beaucoup plus courte, de l'ordre de la décennie, voire moins. On distingue deux types (Bliefer et Perraud, 2001) :

- Les contaminations diffuses, mettant en jeu un faible nombre de polluants aux concentrations peu variables provenant de sources non stationnaires ou de grande étendue, ou bien d'un grand nombre de sources. Dans ce cas, la pollution se fait par voie atmosphérique sous forme de poussière et d'aérosols issus de l'activité industrielle, des chauffages domestiques, des automobiles, etc., se déposant sur les sols, sur les végétaux et sur les eaux de surface sous forme de précipitations sèches (transport par les vents, sédimentation) ou humides (pluie, neige, grêle), ou par interception de particules en suspension (brouillards). On parlera alors de sol pollué.
- Les contaminations ponctuelles, qui peuvent faire intervenir un grand nombre de polluants fortement concentrés, sur des zones localisées. C'est typiquement le cas d'une usine ou d'une mine, dans ce cas on préférera parler de site pollué ; mais il peut s'agir également d'apports agricoles bien délimités : engrais (notamment phosphatés, riches en cadmium), boues de station d'épuration

(contenant la plupart des métaux toxiques), traitements phytosanitaires (pesticides et autres), lisiers de porcs (chargés en zinc), compost, sulfate de cuivre (la « bouillie bordelaise » employée dans les vignes), etc.

Les principales sources anthropiques de pollution des sols par les métaux lourds les plus fréquents sont résumés dans le tableau 1.1

Tableau 1.1: Principales sources anthropiques de pollution des sols par les métaux lourds les plus fréquents (Denis Baize, 1997 et Sandrine Gombert et al 2005)

El	Sidérurgie (fer/acier)	Métallurgie des non-Ferreux	Combustion des carburants fossiles	Incinération des ordures ménagères	Circulation automobile, transport	Industrie du verre	Boues de stations d'épuration	Autre
Cd	X	X	X	X	Usure des pneus	X	X	Piles, engrais phosphaté, pigment
Cr	X		X	X		X	X	Industrie du ciment
Cu		X	X		Usure ferroviaire		X	Bouillie bordelaise compost
Pb	X		X	X	X		X	Minutions, chasse, insecticides
Zn	X	X	X	X	X		X	Lisiers du porcs

## CHAPITRE 2

### CAS DU CADMIUM

#### 2.4. Élément du cadmium

Le cadmium, découvert en 1817 par le chimiste allemand Stohmeyer est un métal malléable d'aspect blanc bleuâtre, qui présente une grande résistance à l'oxydation et une bonne conductibilité électrique (Juste *et al*, 1995). Le cadmium (groupe IIB de la table périodique des éléments chimiques) est un polluant ubiquitaire classé 7ème parmi les 20 principaux toxiques, en raison de son influence négative sur les systèmes enzymatique cellulaires (Sanita di Toppi et Gabrielli, 1999). Le cadmium est un élément non nécessaire pour les plantes et il est hautement toxique. Sa toxicité est considérée de 2 à 20 fois plus élevée que celle des autres métaux lourds (Das et al, 1997).

#### 2.5. Origine naturelle du cadmium

Le cadmium est présent de façon naturelle dans la croûte terrestre. Au cours des temps géologiques, cet élément a suivi un cycle qui à une distribution hétérogène de sa concentration à la surface du globe (Brignon et Malherbe, 2005).

La moyenne des concentrations en cadmium sur la terre est estimée entre 0.1 et 0.5 ppm. Toutefois certaines roches peuvent accumuler des concentrations très importantes comme les phosphates marins et les phosphorites qui possèdent des teneurs pouvant aller jusqu'à 500ppm (International Cadmium Association's website, 2009). Le tableau 2.1 présente les teneurs en cadmium dans les différentes roches de la croûte terrestre.

Tableau 2.1 : Teneurs moyennes ( $\mu\text{g.g}^{-1}$ ) en cadmium des différentes roches de la croûte terrestre (N'Guessan, 2008)

Element s (mg/Kg)	Roches magmatiques			Roches sédimentaires		
	Roches basique s	Roches intermédiaire s	Roche s acides	Roches sédimentaire s argileuses et sableuses	Gré s	Carbonate s
Cd	0.13- 0.22	0.13	0.09- 0.20	0.22-0.30	0.05	0.035

L'altération et l'érosion de ces roches va libérer une quantité importante de cadmium qui seront transportées par les eaux continentales. L'activité volcanique et les feux de forêts ont également été signalés comme une source naturelle d'émission atmosphérique de cadmium. Généralité sur le cadmium.

### 2.3 Origine anthropique du cadmium

#### 2.3.1 Rejets de l'activité industrielle

Elles sont en premier lieu liées aux activités de transformation primaire des métaux, c'est-à-dire aux industries d'extraction (mines) et aux industries métallurgiques. Au sein de ces dernières, deux grandes classes se distinguent : la transformation des minerais ferreux, centrée sur la production de fer et d'acier, et celle des métaux non-ferreux tels que l'aluminium, le cuivre, le zinc, etc. Certains métaux sont liés à l'une ou à l'autre par exemple le chrome, qui entre dans la composition des aciers, ou le cadmium, sous-produit du zinc, ou aux deux c'est le cas de l'arsenic. La transformation d'énergie par combustion de carburants fossiles ainsi que le raffinage du pétrole sont également des sources importantes de pollution en raison de la présence de traces dans les combustibles. Même si les éléments considérés y sont présents en très faible concentration, la quantité de matériau consommé (dans le cas d'une centrale électrique à charbon par exemple) implique une émission de métaux non négligeable. De même, la plupart des métaux lourds sont envoyés dans l'atmosphère par les incinérateurs de déchets à très haute température. Enfin, certains métaux sont spécifiquement

utilisés dans des industries particulières, comme le cadmium pour les piles (accumulateurs Ni-Cd), l'arsenic pour la conservation du bois (Martin et al, 2005) ou le plomb pour les munitions. Le transport routier reste néanmoins une source de pollution de cadmium liée à l'usure des pneumatiques.

### 2.3.2. Rejets d'origine agricole

Il faut signaler la part importante de la contamination d'origine agricole, qui se différencie des pollutions précédemment décrites par le fait qu'elle a pour finalité d'ensemencer directement les sols en substances diverses, dont le but est de fertiliser le sol (engrais, boues) ou de se débarrasser des êtres vivants nuisibles aux cultures (pesticides, herbicides, etc.) (He et al., 2005). Ces épandages variés ont cependant pour conséquence néfaste la contamination directe et quasi-immédiate des sols en métaux lourds.

En effet, l'apport d'engrais phosphatés, contribue à l'enrichissement des sols en cadmium dont les teneurs varient selon l'origine géographique des phosphates (Robert et Juste, 1998). Certains engrais phosphatés contiennent plus de 50 mg de Cd / Kg sol sec (Mortvedt et Beaton, 1995). C'est également le cas du Co, Cr, Mn, Ni et Zn présents sous forme d'impuretés dans les engrais (Bourrelier et Berthelin, 1998). Cette pollution est d'autant plus grave que les métaux peuvent très vite passer des sols vers les nappes phréatiques par lessivage, et contaminer ainsi l'eau potable.

Le problème particulier des boues de stations d'épuration est particulièrement critique à cet égard puisqu'il s'agit d'épandre des déchets potentiellement hautement toxiques, car très chargés en métaux lourds et pas seulement, dont certains très dangereux et dont on ne sait pratiquement rien concernant les boues de stations d'épuration. Il est d'autre part paradoxal que le refus (louable) de rejeter dans l'environnement des eaux fortement polluées se traduise par une gestion des déchets de ce processus allant à l'encontre de l'idée de départ. Plus marginalement, certaines pratiques anciennes d'arrosage avec des eaux de gouttière issues de canalisations en zinc ont pu contaminer notablement certaines zones en zinc et en cadmium.

Néanmoins, durant ces dernières années, conscients du risque avéré de ces produits chimiques, plusieurs gouvernements ont émis des réglementations limitant la présence de métaux lourds dans ces produits.

## 2.5. Biodisponibilité du cadmium

La biodisponibilité est l'aptitude d'un élément à passer d'un compartiment quelconque du sol dans un être vivant, (bactérie, végétal, animal ou homme) le plus souvent via la solution du sol.

### 2.5.1. Les formes de cadmium dans le sol

Les principales formes du cadmium présentes en solution sont  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{CdSO}_4$ ,  $\text{CdCl}^+$  et  $\text{CdHCO}_3^+$  en l'absence de ligands organiques (Sposito, 1989). Le cadmium forme des complexes avec les principaux acides organiques carboxyliques (acide citrique, oxalique, malique, etc.) susceptibles de se trouver dans les zones superficielles des sols cultivés. Ces associations modifient son comportement aux interfaces et peuvent faciliter, dans certaines conditions (formations de complexes stables), son entraînement avec la phase liquide. Le très faible produit de solubilité du carbonate de Cd ( $\text{CdCO}_3$ ) limite fortement la concentration du métal en solution dans les sols calcaires. Dans ce cas, les carbonates ( $\text{CaCO}_3$ ,  $(\text{Ca},\text{Mg})\text{CO}_3$ ...) constituent également une phase de sorption dominante qui contrôle la distribution de l'élément et sa mobilité dans le milieu (McBride, 1980 ; Martin-Garin, 2000).

D'autres constituants solides du sol sont susceptibles d'interférer avec le cadmium et de limiter sa mobilité. On retiendra principalement le rôle joué par la matière organique et par les argiles (par ordre croissant d'affinité kaolinite < illite < smectite) ainsi que l'importance du pH et de la composition cationique de la solution du sol (notamment  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  et  $\text{Fe}^{3+}$ ) dans le contrôle de ces réactions aux interfaces solide/solution.

## 2.5.2. Facteurs influençant la biodisponibilité du cadmium

Dans les sols, le cadmium est considéré comme un élément relativement mobile par rapport à d'autres métaux en traces tels que le cuivre ou le plomb (Bourrelier et Berthelin, 1998). Son comportement dans la solution du sol (disponibilité au transport ou immobilisation) et aux interfaces solution/solide et solution/plante (phytobiodisponibilité) dépend d'un grand nombre de paramètres :

### 2.5.2.1. pH du sol

La solubilité d'un élément trace dépend en grande partie du pH du sol. Un pH faible augmente généralement la phytobiodisponibilité des ETM car les protons (ions H<sup>+</sup>) ont une plus grande affinité pour les charges négatives des colloïdes du sol et entrent alors en compétition avec les ETM vis-à-vis de ces sites, ce qui induit un relargage des ETM dans l'eau des pores du sol (Greger, 2004). L'adsorption et la complexation du Cd sont des processus compétitifs, qui dépendent de la teneur en ligands et en cations, en particuliers en protons.

Le pH a un effet important sur l'adsorption de Cd : divers travaux ont montré que la sorption du Cd augmente considérablement avec l'accroissement du pH du sol (Christensen 1984 ; Sauvé et al. 2000). La compétition avec d'autres cations métalliques, en particulier Ca<sup>2+</sup>, inhibe l'adsorption du Cd (Alloway 1995 ; Christensen 1984). De nombreuses études ont montré qu'une augmentation de pH suite à un chaulage conduisait à une diminution de la biodisponibilité et une diminution du prélèvement par les végétaux (Krebbs et al ; 1998 ; Tyler and Olsson, 2001).

### 2.5.2.2. Matière organique

L'apport de matières organiques va avoir une influence sur la mobilité du cadmium et va avoir tendance à diminuer sa biodisponibilité. Ainsi, des apports de fumiers, lisiers ou boues vont contribuer à piéger le cadmium. La sorption du Cd augmente également avec la teneur en matière organique du sol (Sauvé et al. 2000). Sauvé et al. (2000) ont montré que la rétention du Cd par le sol était 30 fois plus élevée dans un sol riche en matière organique que dans un sol minéral.

#### 2.5.2.3. Capacité d'échange cationique (CEC)

La CEC du sol est un paramètre global qui représente la quantité maximale de cations qu'un poids déterminé de sol peut retenir, autrement dit, le total des charges négatives du sol disponibles pour la fixation de cations métalliques ou d'ions H<sup>+</sup>. Les cations dissous dans la solution du sol sont attirés par des composants chargés négativement (principalement les argiles, les oxydes de métaux et la matière organique) qui sont les contributeurs les plus importants à la CEC du sol (Bargagli, 1998). Plus la CEC du sol est élevée, plus les cations métalliques sont adsorbés ou complexés par ses constituants et donc moins assimilables par les plantes.

#### 2.5.2.4. Température du sol

La température du sol joue un rôle indirect sur les réactions géochimiques et influence également l'activité biologique du sol et par conséquent la production de substances acides ou complexantes issues de la biodégradation de matières organiques. L'élévation de la température agit directement sur la dissolution de composés fixant les ETM, facilitant leur absorption par les plantes (Deneux- Mustin et al. 2003; Remon, 2006).

Serpaud et al. (1994) ont montré qu'entre 10°C et 30°C, l'effet de la température sur la capacité d'adsorption des sédiments n'est pas très significatif. Par contre, ces auteurs ont remarqué une diminution de l'adsorption entre 30°C et 40°C, surtout dans le cas du Cu, Zn et Cd. Pourtant dans le cas du plomb, l'influence de la température dans cet intervalle de température (10 - 40°C) n'est pas significative.

#### 2.5.2.5. Compétition et synergie entre éléments

Le cadmium entre en compétition avec de nombreux cations divalents et notamment avec le calcium et emprunte de nombreux transporteurs à l'exception des transporteurs de type COPT (Clemens *et al*, 1998 ; Hall et Williams, 2003). Il peut également emprunter une autre famille de transporteurs appelée LCT (Low affinity Cation Transporter) qui permet plutôt l'entrée de calcium lorsque les plantes ne sont pas soumises à un milieu pollué par des ETM. En fait, une augmentation de calcium dans le milieu conduit à une diminution de l'absorption

de cadmium, suggérant une compétition entre  $\text{Ca}^{+2}$  et  $\text{Cd}^{+2}$  au niveau de la surface racinaire (Kim et al. 2002 ; Sarwar et al, 2010). D'autres études démontrent cependant un effet de synergie entre le cadmium et des éléments tels que le zinc ou le calcium (Larbi et al, 2002 ; Ghnaya et al, 2005 ; Sbartai et al, 2012).

Il est également connu que le chlorure de sodium ( $\text{NaCl}$ ) augmente la biodisponibilité des métaux lourds dans le sol. En effet, les ions chlorures ( $\text{Cl}^-$ ) forment des complexes stables avec les ions  $\text{Cd}^{2+}$ . Ce processus de complexation semble augmenter la mobilité des ions  $\text{Cd}^{2+}$  dans le sol ainsi que leur biodisponibilité (Ghnaya et al ; 2007). De ce fait, l'enrichissement du sol en  $\text{NaCl}$  stimule le prélèvement de Cd par les plantes (Xu et al ; 2010).

## **CHAPITRE 3**

### **CADMIUM ET LA PLANTE**

Le niveau d'accumulation de cadmium varie considérablement entre espèces comestibles. Cette variabilité peut être naturellement expliquée par les conditions de cultures, mais aussi par une variabilité interspécifique, laquelle concerne notamment le niveau d'accumulation dans les différents organes.

Les plantes peuvent absorber du cadmium à partir des racines, mais également à partir des organes aériens, ou bien par l'intermédiaire des deux. Les quantités absorbées par les racines dépendent de la concentration et de la solubilité du métal dans la solution du sol, mais également de ses capacités de migration du sol vers la surface des racines.

#### 4.5. Phytotoxicité du cadmium

Le cadmium est un élément toxique pour la plupart des organismes. Diverses études menées en Europe et aux USA montrent qu'une proportion non négligeable du blé (tendre ou dur) dépasse les teneurs réglementaires en Cd (Chaudri et al. 1995 ; Girling et Peterson 1981 ; Harris et Taylor 2004 ; Mench et al. 2001 ; Wenzel et al. 1996).

IL est connu pour sa phytotoxicité. Celle-ci se manifeste tout d'abord par une réduction de croissance, des chloroses, qui peuvent être suivies de nécroses et de la mort de la plante dans le cas d'une intoxication aiguë. La concentration critique, à partir de laquelle le Cd perturbe le fonctionnement des plantes non adaptées au métal varie de 8 à 12 mg/kg (Balsberg Pålsson, 1989). Ses effets dépendent évidemment de la dose et de l'espèce considérée, voire de la population étudiée.

L'origine de la phytotoxicité n'est pas complètement éclaircie et serait à attribuer à une perturbation, soit de la photosynthèse, soit de la nutrition minérale (Fe, Ca, Mg, K et P) (DalCorso et al. 2008).

#### 4.5.1. Effet du cadmium sur la nutrition minérale

Le cadmium est un élément très mobile et sa présence dans la solution du sol lui permet de rentrer en compétition avec les autres éléments indispensables et provoque une perturbation de la nutrition minérale de la plante (Benavides et *al.*, 2005).

Cette perturbation induite par le cadmium s'exprime soit par l'inhibition d'absorption ; cas de potassium, comme montre plusieurs études, une diminution dramatique des concentrations de potassium ont été observées, en présence de cadmium, chez le lupin blanc (Zornoza et *al.*, 2002), le pois (Sandalio et *al.*, 2001), l'orge (Guo et *al.*, 2007) et le pin sylvestre (Kim et *al.*, 2003), soit par :

- Une compétition avec un élément essentiel, cas de calcium au niveau de la surfaceracinaire ;
- Ou bien selon Barcelo et *al.* (1988), par la séquestration des ions  $\text{Ca}^{2+}$  sous forme de cristaux d'oxalate dans les vaisseaux de xylème chez les plantes traitées avec du cadmium ;
- Une augmentation d'accumulation d'un élément, cas de zinc comme montre les travaux de (Girling et Peterson, 1981) sur le Maïs et ceux de Zorrig et *al.*, 2010) sur la laitue. Cette augmentation pourrait correspondre à une stratégie de protection développée par la plante ou par une induction directe ou indirecte de l'expression des systèmes de transport de zinc par le cadmium.

Le cadmium altère aussi l'activité de certaines enzymes telles que la nitrate réductase et du nitrite réductase dans les racines et les feuilles en présence de cadmium (Chaffei et *al.*, 2004).

Le déséquilibre de la balance ionique induit par le cadmium affecte directement et/ou indirectement plusieurs processus métaboliques se traduisant à l'échelle phénologique par des signes de carence et des troubles de croissance (Boulila Zoghlami, 2006).

#### 4.5.2. Effet du cadmium sur la croissance

La croissance est un processus commun à tous les organismes vivants. Sa réduction est une des réponses les plus fréquentes et la première observable lorsque des plantes sont soumises à un stress (Adriano, 2001 ; Sandalio *et al*, 2001 ; Sobkowiak et Deckert, 2003).

Les racines sont les organes qui sont directement en contact avec les substances toxiques, par conséquent, elles se développent sur des sols contaminés, qui présentent rapidement des modifications détectables de leurs paramètres de croissance (Baker et Walker, 1989) qui sont très sensible au traitement par le Cd.

Schützendübel *et al* (2001) ont montré que des concentrations de 5 et 50 $\mu$ M de Cd induisent une réduction de 20% et 90% respectivement de l'élongation racinaire chez *Pinus sylvestris* suite à une exposition de 12 h. Une prolongation de la durée du traitement des racines en présence de 50 $\mu$ M de Cd a montré un arrêt de la croissance, La réduction de l'élongation racinaire peut être causée par une inhibition de la division cellulaire et de la synthèse des polysaccharides pariétaux (Ernst *et al*, 1992 ; Punz et Sieghart, 1993).

De même, L'exposition à long terme au cadmium produit au niveau des feuilles, l'apparition du phénomène de chlorose due à une diminution de la teneur en chlorophylle (Padmaja *et al*, 1990 ; Stobart *et al*, 1985 ; Lagriffoul *et al*, 1998 ; Larsson *et al*, 1998 ; Di Cagno *et al*, 1999; Baryla *et al*, 2001 ; Fodor, 2002 ; Cosio *et al*, 2005).

Il est toutefois important de noter que le cadmium n'affecte pas la croissance de toutes les plantes avec la même sévérité qui diffère aussi entre les variétés d'une même espèce. En effet, sur des sites très contaminés en métaux lourds, et en particulier en cadmium, certaines espèces végétales telles que *Arabidopsis halleri* et *Thlaspi caerulescens* sont capables de croître, se développer, et se reproduire (Dahmani-Müller *et al*, 2001 ; Wojcik *et al*, 2005). Ces espèces végétales hypertolérantes sont aussi hyperaccumulatrices de cadmium.

#### 4.5.3. Effet du cadmium sur les processus métabolique

La réduction de croissance causée par la présence du cadmium dans le milieu peut être expliquée par l'effet de ce dernier sur les processus métaboliques de la plante, parlant de l'équilibre hydrique, la photosynthèse ; processus primaire fournisseur d'énergie chez les plantes (Krupa et Baszynski, 1995 ; Mysliwa-Kurdziel et Stralka, 2002 ; Mysliwa-Kurdziel *et al.*, 2002).

L'inhibition de la photosynthèse causée par le Cd est due à un désordre de l'ultrastructure des chloroplastes, la diminution de synthèse de la chlorophylle, de la plastoquinone, des caroténoïdes, le transport des électrons, l'inhibition de l'activité des enzymes du cycle de Calvin et la déficience en CO<sub>2</sub> due à la fermeture des stomates (Seregin et Ivanov, 2001; Sandalio *et al.*, 2001; Mishra *et al.*, 2006). Il affecte les composants des photosystèmes II (PSII) en altérant leurs structures et/ou leurs activités (Van Assche et Clijsters, 1985 ; Sigfridsson *et al.*, 2004) et ce à cause des changements irréversibles de leurs conformations suite à la formation des liaisons thiols avec le cadmium (Dafré *et al.*, 1996).

La fermeture stomatique est due essentiellement aux variations du potentiel de turgescence dans les cellules de garde. Elle se déclenche suite à une accumulation des ions Ca<sup>2+</sup> dans le cytosol des cellules de garde (MacRobbie et Kurup, 2007). Le cadmium provoque également une réduction de la transpiration ainsi qu'une augmentation de la résistance stomatique accompagnée d'un accroissement de la teneur en acide abscissique (ABA) (Sharma et Kumar., 2002 ; Fediuc *et al.*, 2005).

Étant chimiquement semblables aux ions Ca<sup>2+</sup>, les ions Cd<sup>2+</sup> gagnent les cellules de garde par les canaux de Ca<sup>2+</sup> tension-dépendants et une fois dans le cytosol, ils imitent leur activité (Perfus-Barbeoch *et al.*, 2002).

### 3.1.4 Cadmium induit un stress oxydatif

Le stress oxydatif ou stress oxydant est un type d'agression des constituants de la cellule du aux espèces réactives azotées oxydantes qui vont s'attaquer aux membranes cellulaires, aux protéines et à l'ADN.

ROS = Reactive Oxygen Species sont produites lorsque la réduction de l'oxygène par les cytochromes de la chaîne respiratoire s'accompagne inévitablement d'une production de radicaux oxygénés incomplète, parmi lesquelles le radical superoxyde ( $O_2^{\cdot-}$ ), le radical perhydroxyle ( $HO_2^{\cdot}$ ), le radical hydroxyle ( $\cdot OH$ ), le radical peroxyde ( $RO_2^{\cdot}$ ) et le radical alkoxyde ( $RO^{\cdot}$ ) ainsi que des formes non radicalaires comme le peroxyde d'hydrogène ( $H_2O_2$ ) Bartosz, 1997 ; Parent *et al.*, 2008) (Figure 1)

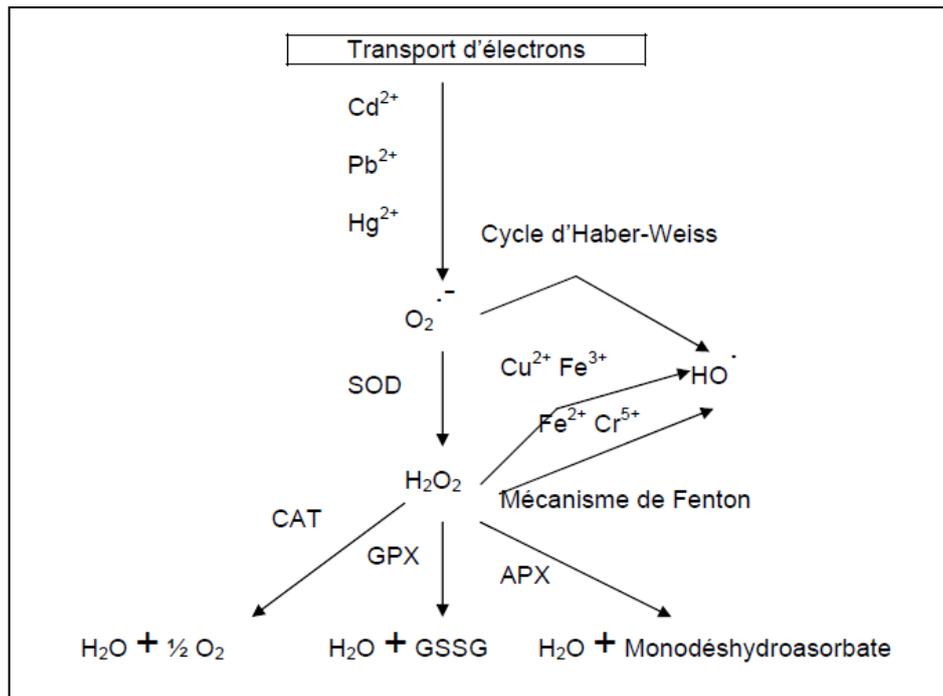


Figure 3.1 : Production des espèces réactives de l'oxygène (ROS) par les métaux lourds (D'après Benavides *et al.*, 2005).

Les ROS ont tendance, par leurs propriétés oxydantes à arracher des électrons à d'autres molécules comme les lipides membranaires, les protéines ou l'ADN des chromosomes aboutissant à la destruction des constituants cellulaires essentiels (Figure 2).

Cependant, plusieurs auteurs ont montré que ces ROS jouent un rôle important dans le système de défense contre les pathogènes (Doke, 1997; Bolwell et al, 2002) et permettent la lignification et le déclenchement d'autres processus comme la mort cellulaire programmée (Teichmann, 2001).

Elles jouent le rôle d'une molécule signal et alertent la cellule de la présence du stress environnant (Rentel et Knight, 2004; Maksymiec, 2007).

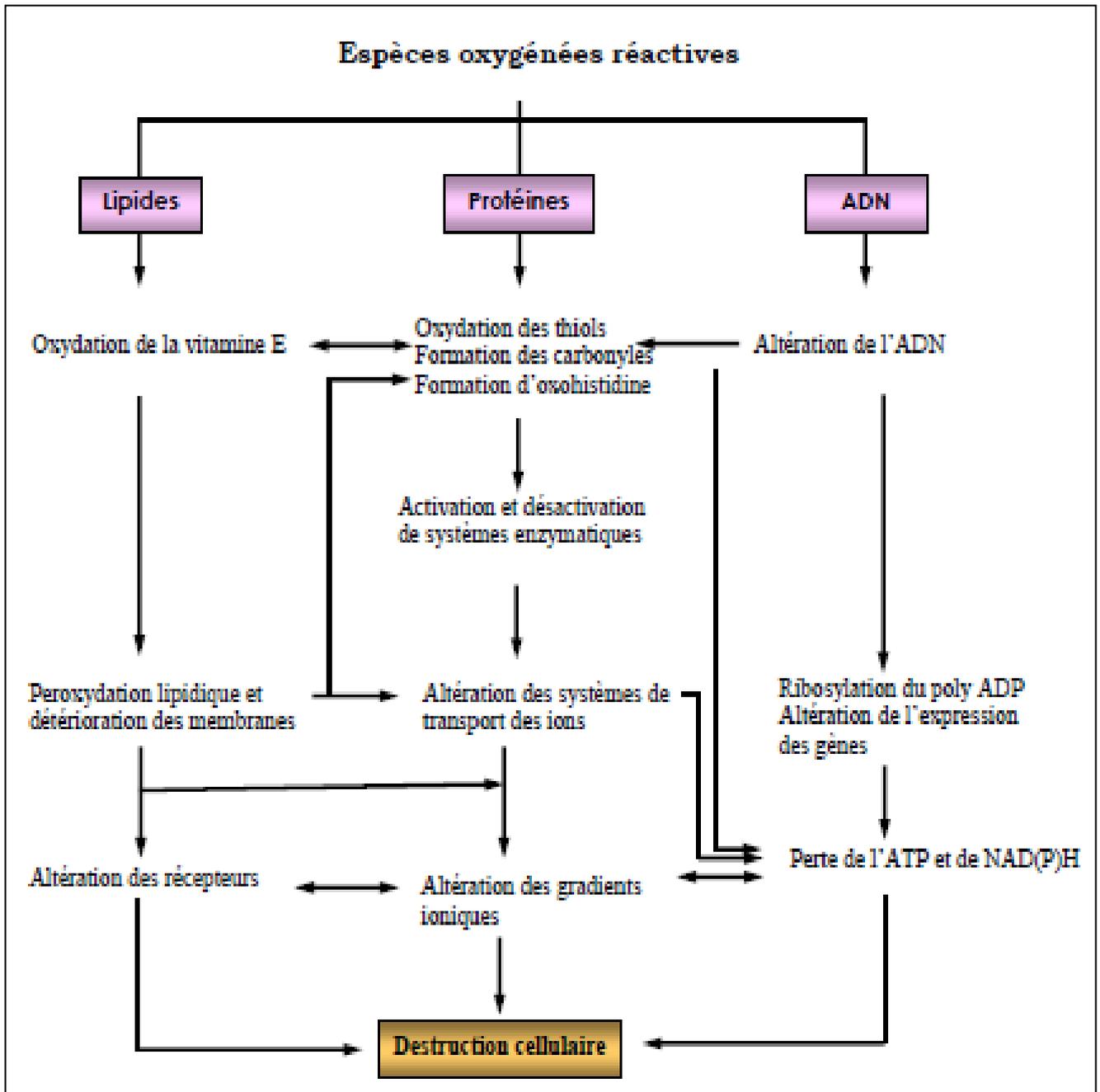


Figure 3.2 : Effets biologiques cellulaires des espèces réactives de l'oxygène (Lefèvre et al, 1998).

Le cadmium peut induire une accumulation de ROS en perturbant certaines voies métaboliques ou en inactivant des enzymes du système anti-oxydant, contribuant ainsi à l'épuisement de la réserve cellulaire de molécules anti-oxydantes (Sanita di Toppi et Gabbrielli, 1999).

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 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).

#### 4.6. Mécanismes de défense de la plante

Les dommages engendrés par le prélèvement de cadmium par la plante sont importants et pour les éviter les plantes ont mis en place diverses stratégies, mécanismes de tolérance qui sont capables d'accumuler, de stocker et d'immobiliser le métal et des mécanismes d'exclusion limitent la pénétration du métal, l'excluant ainsi des tissus de la plante; ce système de défense fonctionne au niveau racinaire et met en jeu, outre les processus de chélation et de séquestration.

##### 3.2.1 La chélation

Chez les végétaux, les principaux ligands intracellulaires sont représentés, soit par des petites molécules acido-basiques (amphotères), soit par des peptides chélateurs qu'on les appelle phytochélatines (PC) capables de former des complexes stables avec les métaux.

- Les phytochélatines ; de nature peptidique, ces molécules sont classées dans une petite famille apparentée aux MT, avec lesquelles elles partagent d'assez nettes similarités de structure et de fonction : elles sont très riches en Cys [formule générale (Glu-Cys) $n$ -Gly (avec  $n = 2$  à  $11$ )] (figure3) et leur synthèse est stimulée par la présence de métaux lourds (Cd, Cu, Zn, etc...)

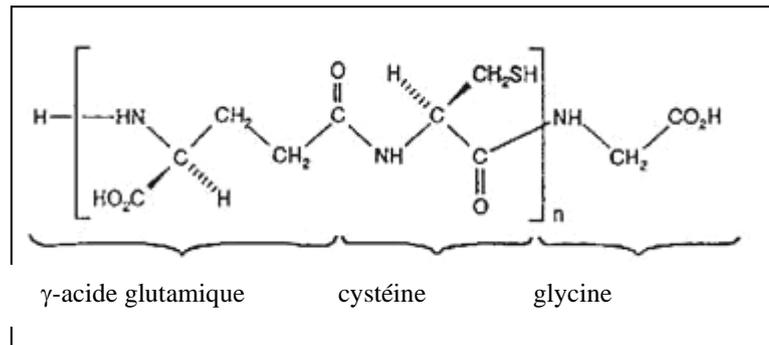


Figure 3.3 : Structure d'une phytochélatine (d'après Steffens, 1990).  $n = 2$  à  $11$   
(Verbruggen *et al*, 2009)

Ils sont synthétisés à partir du glutathion par la phytochélatine synthase (PS) (Zhu *et al*, 1999a) (Figure 4).

Le cadmium forme avec les phytochélatines des complexes de faible masse moléculaire (LMW). Le complexe PC-Cd (LMW) n'affecte pas le métabolisme au niveau du cytoplasme. Il est acheminé vers la vacuole.

Une fois dans la vacuole, les complexes PC-Cd (LMWs) s'agrègent les uns aux autres par des ponts sulfures pour former des complexes de masse moléculaire élevée (HMW) (Clemens, 2006 ; DalCorso *et al*, 2008). Ce cycle se termine par la dissociation de ces complexes, à cause du pH vacuolaire, provoquant la libération des ions  $\text{Cd}^{2+}$  qui seront pris en charge par les acides organiques présents, tels que le malate, le citrate ou encore l'oxalate.

Les PCs sont recyclées et réexportées dans le cytoplasme pour capter d'autres ions et les réacheminer dans la vacuole (Sanità di Toppo *et al*, 1999).

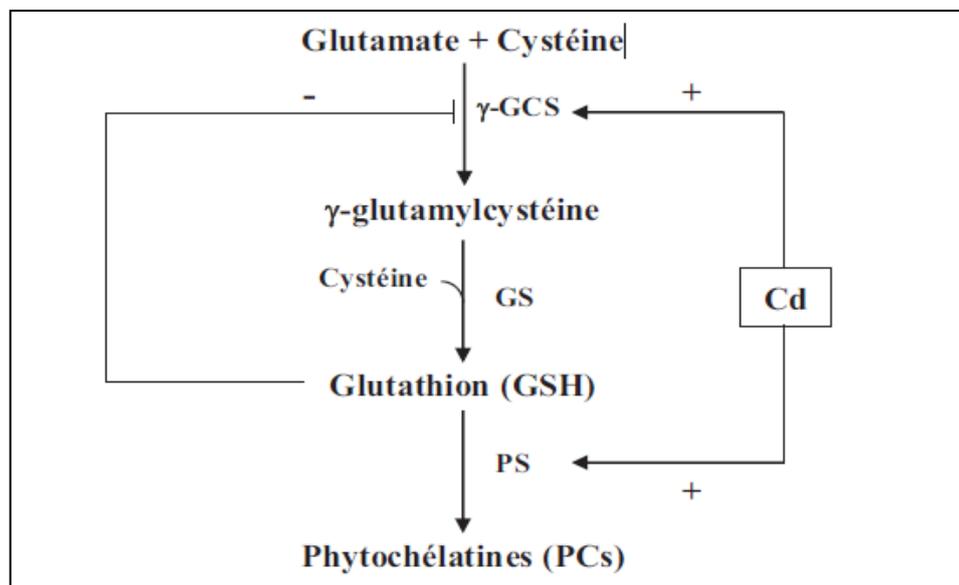


Figure 3.4 : Régulation de la biosynthèse des phytochélatines (PCs) et du glutathion (GSH) chez les plantes zoorig. Le cadmium augmente la transcription de la  $\gamma$ -glutamylcystéine synthase ( $\gamma$ -GCS) et active la phytochélatine synthase (PS), ce qui induit la production des PCs et l'épuisement du GSH. La  $\gamma$ -glutamylcystéine synthase peut être également inhibée par rétrocontrôle négatif exercé par le GSH (Zhu et al, 1999a).

Le rôle des phytochélatines dans la chélation des métaux et du cadmium en particulier, en relation avec la tolérance au cadmium, a fait l'objet de nombreuses études rapportées par Cobett (2000), Benavides *et al.* (2005) et Clemens (2006).

A titre d'exemple, en utilisant *Brassica juncea*, Haag-Kerwer *et al.* (1999) montrent que l'accumulation du cadmium s'accompagne d'une induction rapide de la biosynthèse de phytochélatines (Figure 5), théoriquement suffisante pour assurer une protection des processus physiologiques de la plante.

Outre les phytochélatines, d'autres composées interviennent dans la complexation des ions métalliques au niveau cellulaire :

- **Les métallothionéines (MT)** sont des protéines largement distribuées dans le monde vivant. On les rencontre chez de nombreux procaryotes et chez la plupart des eucaryotes. Ces protéines sont caractérisées par leur richesse en cations métalliques (essentiellement Cu et/ou Zn) et par leur forte proportion de résidus cystéines (environ 30 %).

Elles se distinguent aussi par leur faible masse moléculaire (6 à 8 kDa et 60 à 75 acides aminés) et par l'absence de résidus aromatiques. Ils sont codés par des gènes qui sont classés en deux groupes (MT1 et MT2). Chez certaines plantes supérieures, incluant *A. thaliana*, on a remarqué l'existence de deux autres types de metallothionéines, MT3 et MT4 en plus des classes 1 et 2 de metallothionéines (Goldsbrough, 2000).

D'après (Dietz et al, 1999) les metallothionéines peuvent fonctionner comme antioxydants et probablement intervenir dans la réparation de la membrane plasmique.

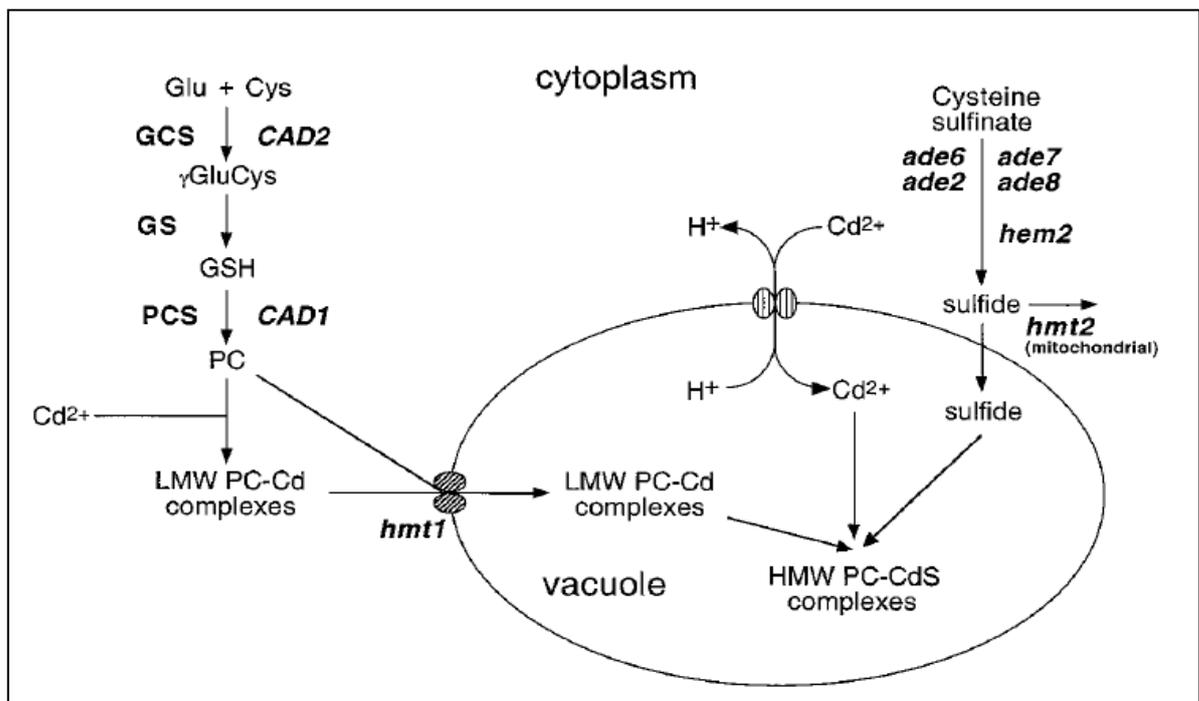


Figure 3.5 : Formation et accumulation de complexes phytochélatines-métal à haut poids moléculaire dans les vacuoles à partir de l'exemple des ions cadmium Cd<sup>2+</sup> (Cobbett, 2000).

➤ **Les acides organiques** : on parle des diverses molécules telles que des acides dicarboxyliques (acides fumarique, malique, oxalique) ou des acides tricarboxyliques (comme l'acide citrique) intervenant dans le phénomène d'accumulation.

On observe une synthèse intense de ces molécules en présence des métaux lourds. Citant l'exemple des complexes Cd-citrate ont été identifiés dans la sève xylémique collectée chez la tomate traitée par le cadmium (Senden et al, 1995).

➤ **Les acides aminés libres** : tels que la proline, l'histidine et la cystéine, s'accumulent lors d'un stress métallique et pourraient être eux aussi impliqués dans la chélation de divers métaux lourds (Briat et Lebrun, 1999 ; Hall, 2002).

### 3.2.2. Séquestration vacuolaire

La vacuole constitue généralement le lieu de stockage majoritaire du cadmium, car elle est moins sensible aux oxydations que des organites comme les chloroplastes. Le cadmium entre en compétition avec de nombreux cations divalents et notamment avec le calcium et emprunte de nombreux 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 (Cohen et al. 1998 ; Korshunova et al. 1999 ; Pedas et al. 2008 ; Pence et al. 2000 ; Thomine et al. 2000).

Le cadmium semble emprunter davantage de transporteurs membranaires que les autres ETM probablement parce qu'il est l'un des ETM les plus mobiles dans le sol et qu'il entre ainsi davantage en compétition avec les éléments essentiels au développement des plantes comme le calcium, le cuivre, le zinc ou le fer (Sanita di Toppi et Gabrielli, 1999).

Ainsi que sa présence active l'assimilation des sulfates et amplifient la biosynthèse de cystéine, de glutathion et de phytochélatines en activant la transcription des gènes impliqués (Harada *et al*, 2002 ; Nocito *et al*, 2002 ; Sakulkoo *et al*, 2005 ; Roth *et al*, 2006 ; Mishra *et al*, 2009). La réorientation du métabolisme soufré vers la production de glutathion limite la disponibilité en acides aminés soufrés pour la biosynthèse des protéines.

### 3.2.3. Autre mécanisme de défense

Les plantes mettent en œuvre d'autres stratégies de défense contre le stress induit par le cadmium, l'accumulation dans les feuilles âgées, en général, elle augmente avec l'âge des feuilles. Chez *Armeria maritima* subsp. *halleri*, dans les feuilles marron (les plus âgées), les concentrations en Cu, Cd, Zn et Pb sont 3 à 8 fois celles des jeunes feuilles (Dahmani-Muller, 1999). Cette observation suggère un transport interne depuis des feuilles vertes, encore actives d'un point de vue photosynthétique, vers les feuilles qui sont sur le point de tomber, préservant ainsi la photosynthèse tout détoxiquant la plante. D'après Salt *et al*, (1995), L'accumulation du cadmium dans les trichomes pourrait également être considérée comme une stratégie de tolérance au cadmium.

La biosynthèse d'éthylène au niveau racinaire serait alors un messenger stimulant la lignification capable de limiter les flux de métaux dans les systèmes vasculaires et accélérant la réponse anti-oxydante par induction de l'activité ascorbate peroxydase, ainsi que la synthèse de métallothionéines (Sanita di Toppi and Gabbrielli, 1999).

### 3.3. Absorption racinaire

La voie principale d'absorption des métaux se fait par simple diffusion au travers de l'apoplaste du cortex racinaire et de l'endoderme (voie apoplastique). Le transport des éléments métalliques à travers la paroi cellulaire se fait passivement (non métabolique et donc dans le sens du gradient de concentration) par les pores du réseau de la cellulose, de l'hémicellulose et des glycoprotéines (Briat et Lebrun, 1999). Par la suite, au niveau de l'endoderme, le transport de certains métaux semble être aussi bien passif, partiellement passif qu'actif (Prasad et Hagemeyer, 1999). Ce dernier autorise un transfert contre le gradient de concentration (voie symplastique).

Le cadmium étant un métal facilement absorbé par les racines des plantes (Wagner, 1993) il est probable qu'il puisse entrer dans les cellules de plantes par l'intermédiaire de plusieurs systèmes de prélèvement des cations essentiels (Clemens, 2006). Certains auteurs suggèrent que 30 % du Cd est prélevé de manière passive, tandis que le reste est prélevé de manière active, probablement couple à H<sup>+</sup>-ATPase [131]. Chez le riz, le maïs et le soja, l'absorption est réalisée principalement par des transporteurs membranaires (Cataldo *et al*, 1988) de d'autres ions divalents en particulier du fer et du zinc (Cosio *et al*, 2004 ; Benavides *et al*, 2005 ; Clemens, 2006) Cependant chez le blé dur l'absorption du cadmium est effectuée par simple diffusion et par des transporteurs (Hart *et al*, 1998b).

#### 3.4. Absorption foliaire

La contamination par voie aérienne est surtout due aux dépôts de surface foliaire qui peuvent être partiellement enlevés par lavage est généralement faible, sauf lorsque les retombées atmosphériques sont importantes : dans certains lieux comme les zones industrielles ou pour certains éléments comme le Pb, à cause des résidus de combustion de l'essence plombée. Cependant, il a été montré (surtout pour Pb et Cd) que, même dans les zones rurales, les dépôts atmosphériques peuvent contribuer de manière significative à la concentration en éléments-traces des tissus internes des plantes. Harrison & Johnston (1987) ont estimé dans les zones rurales que 10 % à plus de 60 % du Pb et du Cd (chez plusieurs espèces de plantes) peuvent être attribuées aux dépôts atmosphériques, ces pourcentages variant avec la taille des particules, la solubilité des métaux de ces particules, le temps, les conditions environnementales et les caractéristiques de la surface des plantes (Zwickert, 1992).

#### 3.5. Accumulation du cadmium

Le cadmium ne s'accumule pas de la même manière dans les végétaux, ce qui est démontré clairement par (Kuboi *et al*. 1986 et Coullery, 1997) On parle alors d'une accumulation interspécifique. Certaines plantes accumulent des

quantités inhabituelles de cadmium, alors elles sont qualifiées hyperaccumulatrices, ainsi, plus de 400 espèces hyperaccumulatrices sont recensées, dont plus de 300 pour le nickel et seulement une seule pour le cadmium. Boyd, 1998). Parmi les plantes consommables, aucune ne peut être classée dans cette catégorie. Les plantes cultivées les moins accumulatrices de cadmium sont les légumineuses. Les graminées, les liliacées, les cucurbitacées et apiacées sont moyennement accumulatrices. Les chénopodiacées, les brassicacées et les astéracées sont les plus accumulatrices (Kubois et al 1986).

De même, on observe une déférence d'accumulation dans la même espèce, on parle alors d'une accumulation intra spécifique. 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).

Cependant les différences intervariétales varient en fonction des conditions de culture, chez le blé par exemple ces différences sont en fonction du sol et du niveau d'exposition, et peuvent ainsi varier d'un site à un autre ou d'une année à une autre (Vinkel, 2001)

Tableau 3.1: influence de la variété sur la concentration moyenne en Cd, Cu et Zn en mg.kg<sup>-1</sup> de matière sèche de blé tendre français (Tremel-Schaub, 2010).

Variétés	Cd
Ritma	0.06
Sidéral	0.079
Soissons	0.087
Trémie	0.086

A l'échelle de la plante entière, l'accumulation se diffère d'un organe à un autre, d'après Wagner, (1993) il y a généralement moins de Cd dans les feuilles que dans les racines, et encore moins dans les fruits et dans les graines. 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).

En revanche, les plantes hyperaccumulatrices de cadmium stockent ce métal de manière différente selon les espèces. En citant l'herbe à aiguilles (*Bidens pilosa*) et l'érigéron du Canada (*Conyza canadensis*) (Astéracées) contiennent davantage de cadmium dans les parties aériennes que dans les racines, ce qui correspond au résultat attendu pour les hyperaccumulatrices de nombreux ETM (Sun et al, 2009 ; Wei et al, 2009).

Au niveau cellulaire, l'accumulation du cadmium se fait presque exclusivement dans les vacuoles comme montre plusieurs études (Vazquez et al, 1992). Cependant, Certaines plantes peuvent accumuler le cadmium en grande quantité au niveau des parois, Lozano-Rodriguez et al, 1997; Ramos et al, 2002) par exemple l'hyperaccumulatrice *Sedum alfredii* et la ramie (*Beckmeria nivea*) fixent respectivement plus de 60 et 50 % du cadmium présent dans la plante au niveau des parois (Ni et Wei, 2003 ; Wang et al, 2008) soit présent dans différents types de structures simultanément (Dahmani-Müller, 2000).

## CHAPITRE 4

### RAPPEL BIOLOGIQUE SUR LA CULTURE DU BLE TENDRE

#### 4.1. Origine géographique et génétique du blé tendre

##### 4.1.1. Origine géographique

La culture du blé est ancienne; elle remonte au néolithique peut être même au mésolithique, vers 7000 ans avant (JC) (Moule, 1971).

L'origine géographique des blés demeure encore discutée; selon VAVILOV cité par AURIAU (1967) et MOULE (1971) ; les trois groupes d'espèces du genre *Triticum* auraient trois centres d'origines différentes :

- Le foyer Syrien et Nord Palestinien serait le centre d'origine du groupe diploïde  $2n = 14$  chromosomes.
- Le foyer Abyssinien serait le centre de diversification des blés tétraploïdes  $2n = 28$  chromosomes.
- Le foyer Afghano - Indien serait le centre des blés hexaploïde  $2n = 42$  chromosomes ; dont appartient le blé tendre.

L'Afrique serait un centre secondaire de diversification.

##### 4.1.2. Origine génétique

Le blé tendre est un hexaploïde, possède trois génomes AA ; BB et DD constitués chacun de sept paires de chromosomes homologues  $[(2 \times 7) \times 3]$  soit 42 chromosomes (Feillet, 2000).

D'après BONJEAN, (2001) le blé tendre « *Triticum aestivum* » est apparu après la domestication des blés diploïdes et tétraploïdes. Il est issu d'un double croisement naturel entre une graminée sauvage diploïde *Aegilops squarrosa* également appelé *Triticum tauschii* et l'amidonnier tétraploïde *Triticum turgidum ssp.dicoccum*.

#### 4.2. Classification

D'après la classification proposée par DAHLGREENET CLIFFORD (1985) cités par BONJEAN et PICARD, (1990), les céréales à paille sont des monocotylédones qui appartiennent toutes au super ordre comméliniflorales. Cet ensemble comprend quatre ordres : Commélinales, Cypéales, Hydalettales et Poales ; ce dernier comporte sept familles dont celle des graminées qui regroupe environ dix mille espèces pour 750 genres, très cosmopolites ; dont le blé tendre est l'une de ses espèces.

#### 4.3. Caractères morphologiques

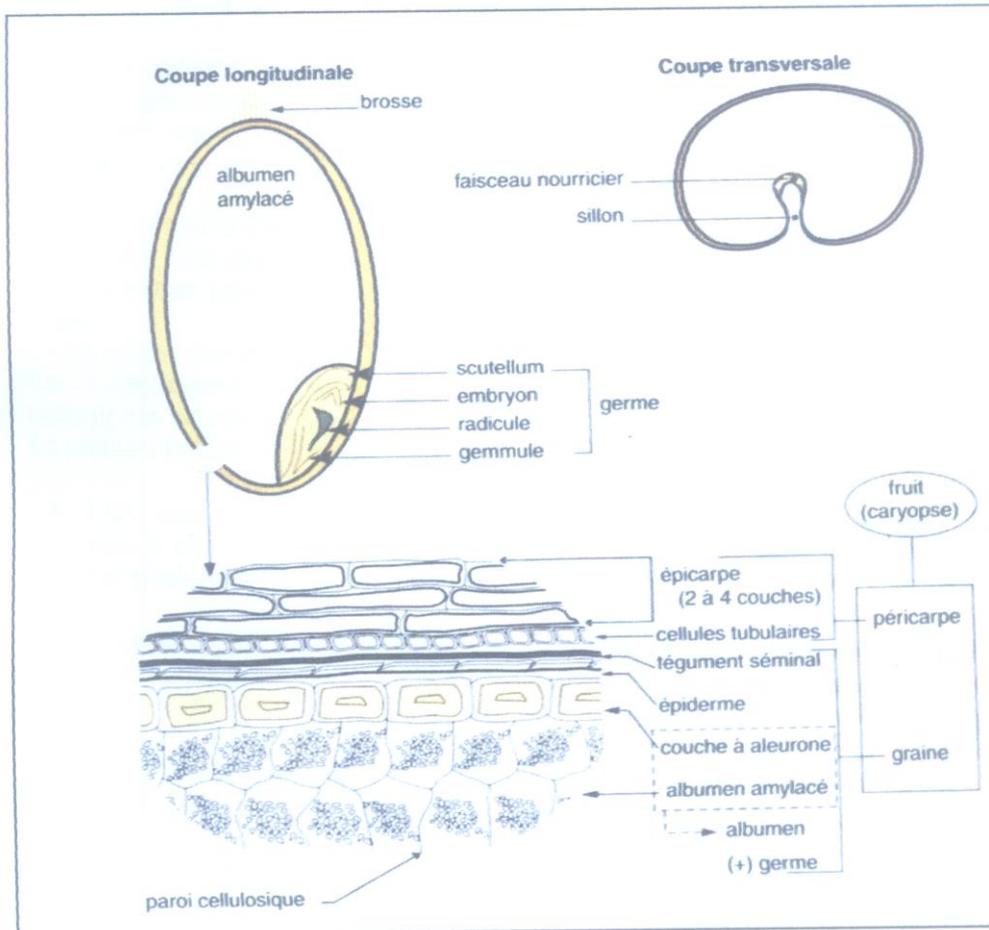
Le blé est une plante herbacée, annuelle monocotylédone qui comprend :

- Un système racinaire fasciculé disposant au cours de son développement de deux systèmes racinaires successifs :
  - Primaire ou séminale, fonctionnel de la levée au début de tallage ;
  - Secondaire ou de tallage, apparaissant au moment où la plante émet ses talles.
- Des tiges qui sont des chaumes, cylindriques, pleines. Elles présentent des faisceaux conducteurs de sève, régulièrement entrecroisés et renferment des fibres à parois épaisses assurant la solidité de la structure. Les chaumes sont interrompus par des **nœuds** qui sont une succession de zones d'où émerge une longue **feuille**, qui d'abord engaine la tige puis s'allonge en un **limbe** étroit à nervures parallèles.
- **L'inflorescence** est un **épi** formé de deux rangées **d'épillets** situés de part et d'autre de son axe **le rachis**, chaque épillet regroupe 1 à 5 **fleurs** à l'intérieur de deux **glumes**. Chaque fleur est dépourvue de pétales, et entourée de deux **glumelles**. Elle contient trois **étamines** à anthères en forme de x (pièces males), un ovaire surmonté de deux **styles plumeux** (pièces femelles) La fleur du blé est dite **cleistogame**, c'est à dire le plus souvent, le pollen est relâché avant que les étamines ne sortent de la fleur, à cause de ce caractère, **l'autofécondation** est le mode de **reproduction** le plus fréquent chez les blés.

Après fécondation l'ovaire donnera le grain de blé qui est à la fois le fruit et la graine. En effet, les enveloppes du fruit sont soudées à celles de la graine ; on appelle ce type de fruit un **caryopse**.

Une coupe du grain fait apparaître trois parties :

- Les enveloppes qui représentent 14 à 15% du poids du grain, comprennent :
  - Le péricarpe, enveloppe du fruit ;
  - Le tégument de la graine ou testa et le tégument du nucelle ou bande hyaline l'assise protéique (60% du poids des enveloppes), constitue de cellules à aleurone, riches en protéines.
    - L'albumen ou amande : représente 83 à 85% du poids du grain, est composé de 70% d'amidon et de 7% de gluten. Il est généralement farineux, sa coupe facile, présente un aspect translucide.
    - Le germe représente 2 à 3% du grain (Roussel et Chiron, 2003) ; il constitue la future plante et assure l'identité génétique de la variété (Armand et Germain, 1992). Il comprend :
      - Le cotylédon ou scutellum, séparé de l'amande par une assise diastatique destinée à la digestion future de l'albumen au profit de la plantule. Il est riche en protéines, matières grasses et vitamines (B<sub>1</sub>, A et E) ;
      - La plantule avec sa gemmule recouverte d'un étui, la coléoptile, sa tigelle courte, et sa radicule, recouverte d'un étui, la coléorhize (Soltner, 1988).



(Source FEILLET P, 2000.)

Figure 4.1: Coupe d'un grain de blé

### 4.3. Cycle végétatif

Le blé est une plante à cycle végétatif annuel, dans lequel une série d'étapes séparées par des stades repères, permettent de le diviser en trois périodes :

- La période végétative, durant laquelle la plante ne différencie que des feuilles et des racines ;
- La période reproductrice, s'étale de l'initiation florale jusqu'à la fécondation ;
- La période de maturation, de la fécondation jusqu'à la maturation des grains.

#### 4.3.1. Période végétative

##### 4.3.1.1. Germination

D'après BELAID (1986), la germination est le passage de la semence de l'état de vie ralentie à l'état de vie active ; la graine ne peut germer que si deux sortes de conditions sont réunies, l'une propre à la graine et l'autre relative au milieu.

1/ Les conditions liées à la graine :

- Elle doit être vivante, c'est à dire avoir une faculté germinative qui réponde aux normes des semences (>85%). Cette faculté se maintient pendant 3 à 4 ans et décroît ensuite plus ou moins vite selon les variétés et les conditions de récolte et de conservation.
- Elle doit être également mure physiologiquement

2/ Les conditions liées au milieu

- L'humidité, pour réhydrater les cellules et permettre la mise en solution et la circulation des réserves ;
- L'oxygène, pour oxyder les réserves que la plantule va utiliser ;
- La température, pour accélérer les réactions chimiques et la division cellulaire.

Cette phase présente quelques particularités. Après humidification de la semence, sort une radicule, puis une coléoptile, étui de la première feuille, qui s'allonge vers la surface au niveau de laquelle il se laisse percer par la première feuille.

#### 4.3.1.2. Levée et début tallage

Durant cette phase, la plante émet plusieurs apex susceptible de donner plusieurs tiges : Les talles.

Le tallage est fonction de la variété, les conditions climatiques notamment les températures, de la nutrition hydrique et minérale, de la profondeur, date et densité de semis.

Un tallage excessif est cependant peu intéressant, car il augmente les besoins en eau et en éléments minéraux de la plante et la plupart des talles restent stériles (DOCTCHEV, 1986 In BELAID, 1987)

#### 4.3.2. Période reproductrice

Elle comporte 3 phases principales :

##### 4.3.2.1. Phase de formation des ébauches d'épillets (phase A-B de Jonard)

La période reproductrice débute par la différenciation et l'élongation des entre-nœuds de la tige principale.

Ce stade marque le début de la formation des ébauches d'épillets. Il a été appelé stade d'initiation florale ou stade A (Jonard) ; par la suite, les autres ébauches d'épillets apparaîtront successivement puis sur l'épillet, deux renflements latéraux deviennent visibles, ce sont les ébauches de glumes (stade B de Jonard).

##### 4.3.2.2. Phase de spécialisation florale (phase B de Jonard)

A partir du stade B, on assiste à la différenciation des pièces florales :

- Stade B<sub>1</sub> : apparition des ébauches de glumes;
- Stade B<sub>2</sub> : apparition des ébauches de glumelles;
- Stade C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub> et C<sub>4</sub>: apparition des ébauches de fleurs.

Cette phase se termine au moment de la différenciation du stigmate.

#### 4.3.2.3 Phase épiaison-fécondation (phase D-E-Fde Jonard)

L'inflorescence sort de la gaine de la dernière feuille, peu après la méiose, c'est l'épiaison notée au stade 50% d'épi sortis qui permet également de mesurer la précocité des variétés.

La fécondation (stade F) suit de quelques jours l'épiaison. La durée de cette phase est variable selon les variétés et le climat, car chez le blé la phase dure 10-12 jours à 14°C, 4-5 jours à 18°C.

#### 4.3.2.4. Période de maturation

GESLIN et JONARD (1948), cités par MOULE, (1980) ont signalé que cette période comprend trois phases principales :

- Une phase de multiplication cellulaire intense, caractérisée par un accroissement du poids d'eau et de matière sèche dans le grain. A la fin de cette phase, l'amande encore verte a pris sa forme définitive, l'albumen est devenu laiteux : c'est le stade laiteux.
- Une phase d'enrichissement en glucides et protides alors que le poids d'eau dans le grain demeure constant : c'est le palier hydrique qui est une période critique : si à ce moment, la circulation d'eau est faible et l'évapotranspiration est trop forte, un dessèchement brusque de la plante se traduit sans que les réserves aient eu le temps de migrer. Le grain privé de ses réserves sera ridé et léger, c'est le phénomène de l'échaudage.

Dans les conditions normales, le grain est au stade pâteux.

- Une phase de dessiccation : caractérisée par une diminution rapide du poids d'eau. Le grain devient demi-dur puis dur, cassant à maturité ; c'est le stade propice à la moisson avec un taux d'humidité de 15-16% (HERVE et al 1989).

## CHAPITRE 5

### MATERIELS ET METHODES

#### Objectif de l'étude

Cette étude a pour but d'évaluer le comportement de quatre variétés de blé tendre (*Triticum eastivum*) Anza, Arz, Ain abid et Hiddab vis-à-vis le cadmium (Cd). Ceci dans le but de connaître ses effets sur la germination et la croissance, phases très importante dans la production végétale. Par ailleurs, nous avons également étudié des paramètres physiologiques et biochimiques pour déterminer la sensibilité et les stratégies adaptatives des variétés par rapport à ce polluant.

Le métal lourd envisagé dans ce travail a été sélectionné en raison des propriétés toxiques qu'il présente pour la contamination des cultures et la pollution des sols agricoles.

#### 5.1. Matériel végétal

L'essai a porté sur quatre variétés de blé tendre (*Triticum eastivum*) Anza, Arz, Ain abid et Hiddab (semence de l'année), qui ont fait l'objet de cette étude. Les semences ont été fournies par l'ITGC (Institut technique des grandes cultures) et leurs caractéristiques sont bien détaillées dans le tableau 5.1.

#### 5.2. Condition de l'expérimentation

L'essai s'est déroulé dans la serre en polycarbonate du laboratoire des biotechnologies du département de biotechnologie de l'université de Blida 1, durant l'année 2016. Les semences sont désinfectées à l'hydrochlorite de sodium à 2% pendant 10 minutes puis rincées avec de l'eau distillée pour éliminer les contaminations fongiques.

Tableau 5.1 : Caractéristiques des variétés étudiées

Variétés		ARZ	ANZA	HIDDAB	AIN ABID
Caractéristiques morphologiques	Compacité de l'épi	Lâche	Demi-lâche	Très lâche	Lâche
	Couleur de l'épi	Fortement coloré	Blanc	Blanc	Blanc
	Hauteur de la plante à la maturité	95 à 100cm	Courte	90 - 110 cm	/
	Alternativité	Hiver	Hiver	Hiver	Hiver
	Cycle végétatif	Semi précoce	Précoce	Semi précoce à précoce	Semi précoce
	Tallage	Fort	Fort	Moyen à fort	Fort
Caractéristiques culturales	Résistance :				
	✓ Au froid	Résistante	Résistante	Résistante	Tolérante
	✓ A la verse	Résistante	Résistante	Résistante	Résistante
	✓ A la sécheresse	Résistante	Résistante	Tolérante	Tolérante
	✓ Egrenage	Résistante	Résistante	Moyenne	Résistante
	Résistance aux maladies				Résistante
	✓ Rouille jaune	Résistante	Tolérante	Très sensible	nt sensible
	✓ Septoriose	Moyennement sensible	Tolérante	Moyennement sensible	
	✓ Fusariose	Moyennement sensible		Moyennement sensible	
	Date de semis	Nov.-déc.	Mi-nov. au mi-déc.	Nov.- Déc.	Nov.- Déc.
Productivité	Dose de semis (Kg/ha)	120	120-140	100-140	120
	Fertilisation (u/ha) :	46 – 70	46 – 70	46 – 90	46 – 70
	Azotés	46	46	46	46
	Phosphaté	48	48	48	48
	Potassique				
	Rendement en grain optimal	30 qx/ha	60 qx/ha	60 qx/ha	35 qx/ha
	Poids de mille grains (PMG)	élevé	Elevé	Elevé	élevé

### 5.2.1. Essai de germination

Les semences sont placées sur des rondelles de papier buvard tapissant les boîtes de pétries à 10 cm de diamètre et humidifiées par 10 ml de l'eau distillée, concernant le témoin ou solution de cadmium, le test est effectué sur 100graines/variété à l'ordre de 10 graines/ boîte de Pétri exposées à des concentrations croissantes de Chlorure de Cadmium (0 ; 50 ; 100 ; 150 et 200 mg/l). Les boîtes de Pétri sont conservées à l'obscurité à 25°C pendant 7 jours.

Après sept jours de germination ; 10 plantules de chaque boîte de Pétri ont été pris pour mesurer la longueur des tiges et des racelles par un mètre ruban ainsi que le poids frais et le poids sec après séchage à l'étuve durant 72 heures à 70°C.

#### 5.2.1.1. Paramètres de germination

##### 1. Taux de germination

C'est le pourcentage maximal de grains germés sur le nombre total de grains mis à germer, elle s'exprime en pourcentage (%).

##### 2. L'Allongement des coléoptiles et des racelles

La longueur de la coléoptile et de la racelle de chaque plantule issue de la germination est mesurée à l'aide d'une mètre ruban pour chaque variété et chaque traitement.

##### 3. Poids frais et poids sec des coléoptiles et des racelles

Les masses de matière fraîche des coléoptiles et des racelles des plantules sont déterminées à l'aide d'une balance de précision. Celles de la matière sèche sont déterminées après dessiccation à l'étuve à 70°C, pendant 72 h.

##### 4. Indice de tolérance (IT)

Il est déterminé suivant la formule citée par Iqbal et Rahmati, 1992 :

$$\text{Index de tolérance IT} = \frac{\text{longueur de la racine de traitement}}{\text{longueur de racine de controle}} \times 100$$

##### 5. Indice de vigueur (IV)

##### 6. Phytotoxicité des coléoptiles et des racelles

Elles sont déterminées suivant les formules suivantes :

Phytotoxicité des coléoptiles (%) =

$$\frac{\text{longueur de coléoptile de controle} - \text{longueur de coléoptile de traitement}}{\text{longueur de coléoptile de controle}} \times 100$$

## Phytotoxicité des racines (%)

$$\frac{\text{longueur de racine de controle} - \text{longueur de racine de traitement}}{\text{longueur de de controle}} \times 100$$

### 5.2.2. Essai de croissance

Les semences sont semées dans du terreau dans des alvéoles et irriguées par des solutions chargées en cadmium suivant un plan aléatoirement complet ; 10 répétitions pour chaque traitement de chlorure de cadmium [0, 50, 100, et 150 et 200 mg/l] sont utilisées.

Après un mois de culture (stade pré tallage), les parties aériennes des plantes ont été séparées des racines. Afin d'éliminer le cadmium non absorbé par la plante, les racines ont été lavées trois fois par l'eau, la matière fraîche des parties aériennes et des racines a été pesée immédiatement après la récolte. Les échantillons ont été ensuite placés dans des tubes thermorésistants et ont été soumis à dessiccation pendant 72 h à 70°C. La matière sèche des différents échantillons (parties aériennes et racines) a ensuite été pesée.

#### 5.2.2.1. Paramètres étudiés

##### 1. Poids frais et sec de la biomasse racinaire et foliaire

Les masses de matière fraîche sont déterminées à l'aide d'une balance de précision. Celles de la matière sèche sont déterminées après dessiccation à l'étuve à 70°C, pendant 72 h.

##### 2. Taux de l'assimilation chlorophyllienne

Chlorophylle a, b et c sont déterminées en utilisant la méthode de Francis et al (1970), qui consiste à faire une macération de 0.1g de matière fraîche des feuilles dans 10ml d'un mélange de 75% d'acétone et 25% d'éthanol avec une concentration de 80 et 40% successivement ; 48 heures après, on procède à une lecture à 645 ,663 et 470 nm de la densité optique par spectrophotomètre. Le taux de chlorophylle est déterminé par les formules suivantes :

- Chl a ( $\mu\text{g/g MF}$ ) =  $12,7 \times \text{DO (663)} - 2,59 \times \text{DO (645)} \times V / (1000 \times W)$ .
- Chl b ( $\mu\text{g/g MF}$ ) =  $22,9 \times \text{DO (645)} - 4,68 \times \text{DO (663)} \times V / (1000 \times W)$ .
- Chl c ( $\mu\text{g/g MF}$ ) =  $1000 \times \text{DO (470)} - [1,82 \times \text{Chl a} - 85,02 \times \text{Chl b}] / 100$

V : volume de la solution extraite et W le poids de la matière fraîche de l'échantillon.

### 3. Croissance relative

La croissance relative =  $(\text{Masse des plantes traitées} / \text{Masse des plantes témoins}) \times 100$

### 4. Dosage de la proline

La proline est dosée selon la technique utilisée par [127]. Le principe est la quantification de la réaction proline-ninhydrine par mesure spectrophotométrique. La proline se couple avec la ninhydrine en formant un complexe coloré. L'intensité de la coloration est proportionnelle à la quantité de proline dans l'échantillon. On procède à la lecture de la densité optique des échantillons avec le spectrophotomètre à la longueur d'onde de 528 nm. La détermination de la teneur de la proline est réalisée selon la formule:  $\text{Proline } (\mu\text{g/g MF}) = \text{DO}_{528} \times 0.62$

### 5. Dosage des sucres soluble

Les sucres solubles totaux (saccharose, glucose, fructose, leur dérivés méthyles et les polysaccharides) sont dosés par la méthode de (Dubois et al. 1965). Elle consiste à prendre 100mg de matériel végétal (feuilles) dans des tubes à essai, on ajoute 2ml d'éthanol à 80% pour faire l'extraction des sucres, à température ambiante pendant 48 heures. Au moment de dosage, les tubes sont placés dans l'étuve à 80°C pour faire évaporer l'alcool.

Dans des tubes en verre propres, on met 2ml de la solution à analyser, on ajoute 1ml de phénol à 5% et 5 ml d'acide sulfurique concentré 96% tout en évitant de verser de l'acide contre les tubes. On obtient une solution jaune orangé à la surface, puis à l'aide d'un vortex, la solution est agitée pour homogénéiser la couleur, puis à placer au bain marie pendant 10 à 20mn à température de 30°C. La détermination de la teneur des sucres solubles est réalisée selon la formule:

$$\text{Sucres solubles } (\mu\text{g/g MF}) = \text{DO}_{490} \times 1.657.$$

## 6. Extraction et dosage du cadmium

La minéralisation a lieu sous hotte aspirante dans un godet en téflon, des masses de 0.25g de chaque échantillon de matière sèche ont été pesées, en ajoutant un volume de 7ml d'acide nitrique ( $\text{HNO}_3$ ) à 69% et 1ml d'eau oxygénée ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) à 30%, les godets sont fermés hermétiquement avec des pinces et laissés à la température ambiante pendant une heure, par la suite les godets ont été placés dans une étuve réglée à une température de  $110^\circ\text{C}$  pendant 120min.

Après refroidissement, les échantillons ont été filtrés dans des fioles jaugées de 50ml, préparé au préalable, les godets sont rincés plusieurs fois avec de l'eau bi distillée, les fioles sont complétées au trait de jauge par l'eau bi distillée et conservées dans un réfrigérateur à  $4^\circ\text{C}$  pour éviter toute contamination jusqu'au moment de l'analyse par spectrophotométrie d'absorption atomique. (CRAPC, 2018)

### 5.2.3. Analyses statistiques

L'analyse statistique des résultats obtenus a été réalisée par le logiciel SPSS© version 2000 pour Windows™. La comparaison entre les moyennes des différents traitements a, également, été établie par une ANOVA suivie du test de Tukey pour la comparaison des moyennes. Ceci afin de pouvoir sélectionner les concentrations ayant un impact significatif sur la germination. De même, la corrélation de Pearson entre les paramètres aux différentes concentrations en cadmium a également été étudiée.

## CHAPITRE 6

### RESULTATS ET DISCUSSIONS

#### 6.1. Analyses des paramètres de l'essai de germination

La germination ou l'embryogénèse tardive, est la première phase du développement d'une plante (Tourte *et al* ; 2005), dans laquelle la graine retourne à la vie active après une période de dormance (Théron, 1964 ; Meyer *et al* ; 2004). Lors de la germination l'embryon augmente de volume par l'utilisation de l'énergie provenant de l'oxydation des réserves sous l'influence de l'action des différentes enzymes hydrolasiques, qui dégage progressivement les enveloppes qui l'entourent et la sortie de la coléoptile et des radicelles. Dans cette phase la graine a besoin de conditions externes et internes favorables pour un développement normal.

Dans notre étude on va étudier l'effet de la présence du cadmium dans le milieu sur les paramètres de germination.

##### 6.1.1. Résultats

###### 6.1.1.1. Taux de germination

Les résultats de la figure 6.1.1.1 montrent que les graines de l'essai sont viables. En effet, dans les boîtes de Pétri témoins les quatre variétés présentent une bonne faculté germinative. Concernant l'effet du cadmium sur ce paramètre, l'analyse de la variance ne révèle pas une différence significative de l'effet cadmium-variété sur ce paramètre, alors qu'on a constaté une différence significative de l'effet variétale sur le taux de germination. La variété Hiddab semble la plus sensible vis-à-vis de la présence du Cd dans le milieu suivi par Ain abid, Arz et Anza.

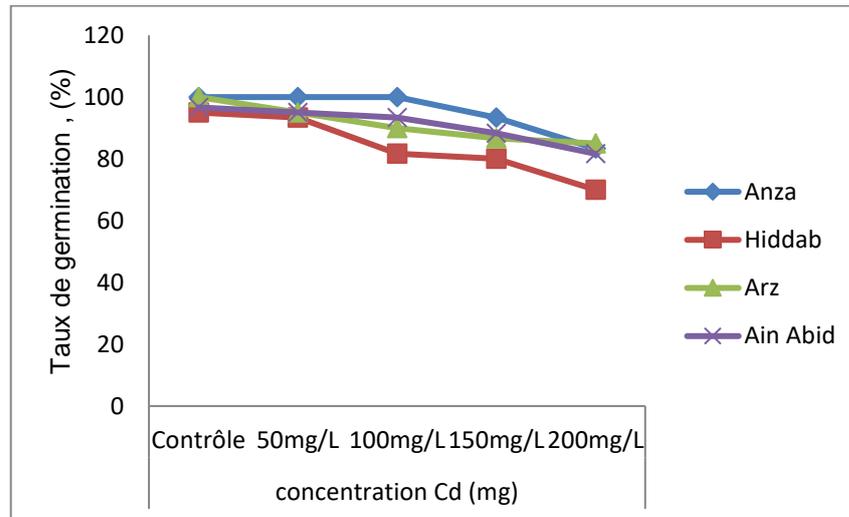


Figure 6.1.1.1: taux de germination des variétés étudiées

#### 6.1.1.2. L'allongement de la coléoptile et de la radicelle

Une diminution importante de l'allongement des coléoptiles et des radicelles a été notée chez les quatre variétés de blé tendre traitées par le cadmium comme le montre la figure ci-dessous, la réduction était progressive suivant l'augmentation des concentrations du milieu en cadmium allant de 50 à 200mg/l comparé aux témoins avec un taux de réduction de 77.29% et 86.67% des coléoptiles et des radicelles successivement.

L'analyse statistique révèle une différence très hautement significative ( $P=0.000$ ) de l'effet du cadmium sur ces paramètres.

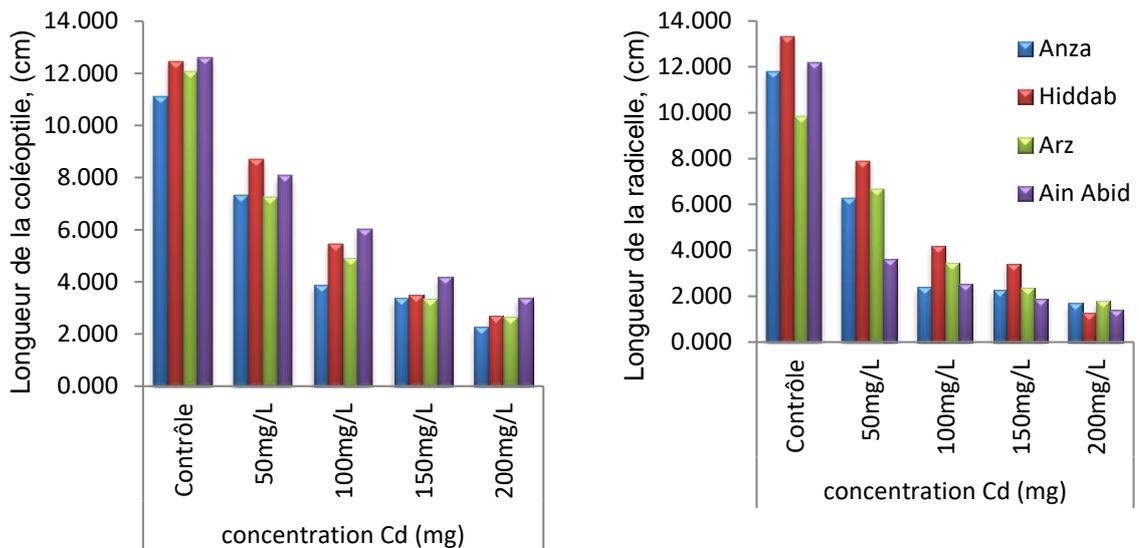


Figure 6.1.1.2. Effet de différentes concentrations de cadmium sur la variation de l'allongement des coléoptiles et des racinelles pour les variétés de blé tendre étudiées. Des plantules issues de la germination des semences ont été exposées à différentes concentrations de  $\text{CdCl}_2$  durant 7 jours. Les prélèvements ont été effectués plante par plante. Les valeurs sont des moyennes de 10 répétitions. Les barres d'erreur correspondent aux erreurs standards.

### 6.1.1.3. Analyse de la biomasse

Afin d'avoir des données quantitatives sur l'effet du traitement en cadmium sur la production de la biomasse (coléoptiles et racinelles), nous avons déterminé le poids de la matière fraîche et de la matière sèche des parties aériennes et des racinelles pour chacune des variétés étudiées (Figure 6.1.1.3; Figure 6.1.1.4 ; Figure 6.1.1.5; Figure 6.1.1.6).

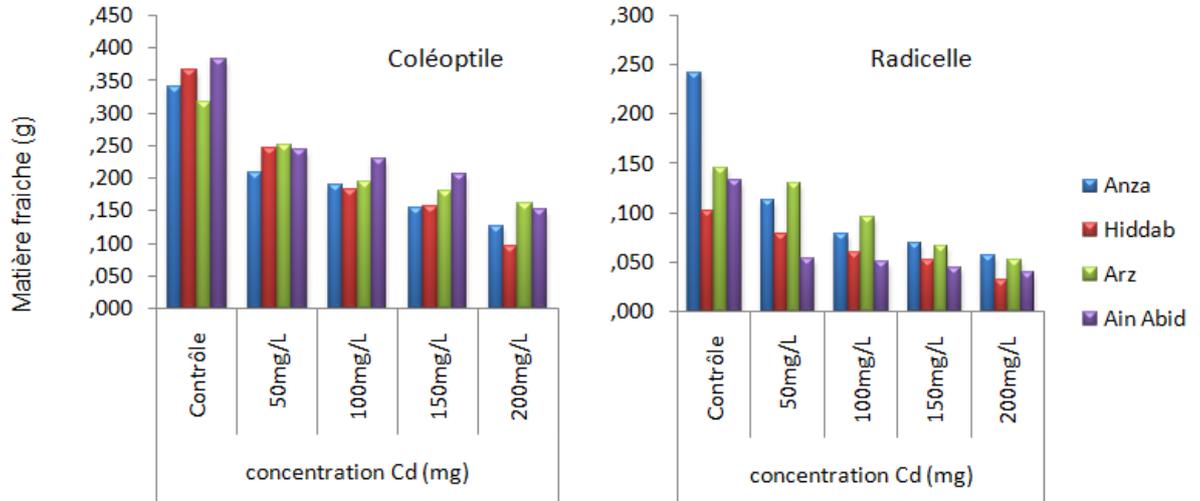


Figure 6.1.1.3. Effet de différentes concentrations de cadmium sur la variation du poids de la matière fraîche des coléoptiles et des racines pour les variétés de blé tendre étudiées. Des plantules issues de la germination des semences ont été exposées à différentes concentrations de  $CdCl_2$  durant 7 jours. Les prélèvements ont été effectués plante par plante. Les valeurs sont des moyennes de 10 répétitions. Les barres d'erreur correspondent aux erreurs standards.

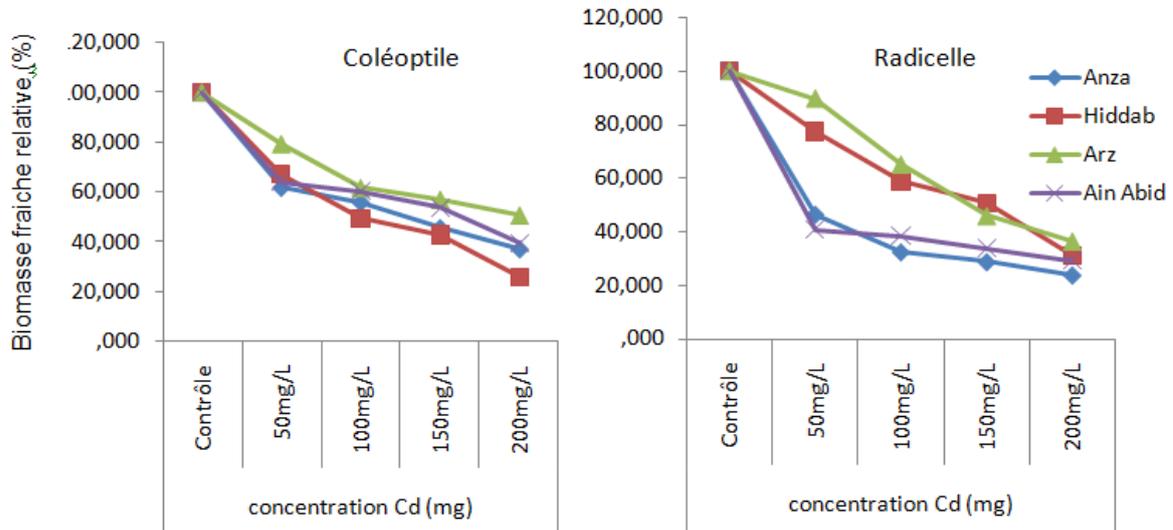


Figure 6.1.1.4. Effet de différentes concentrations de cadmium sur la variation de la biomasse relative de la matière fraîche des coléoptiles et des racines pour les variétés de blé tendre étudiées. Cette biomasse fraîche relative est exprimée par référence à la biomasse mesurée sur des plantules témoins germées en absence de cadmium; elle est exprimée en pourcentage. Des plantules issues de la germination des semences ont été exposées à différentes concentrations de  $CdCl_2$  durant 7 jours. Les prélèvements ont été effectués plante par plante. Les valeurs sont des moyennes de 10 répétitions. Les barres d'erreur correspondent aux erreurs standards.

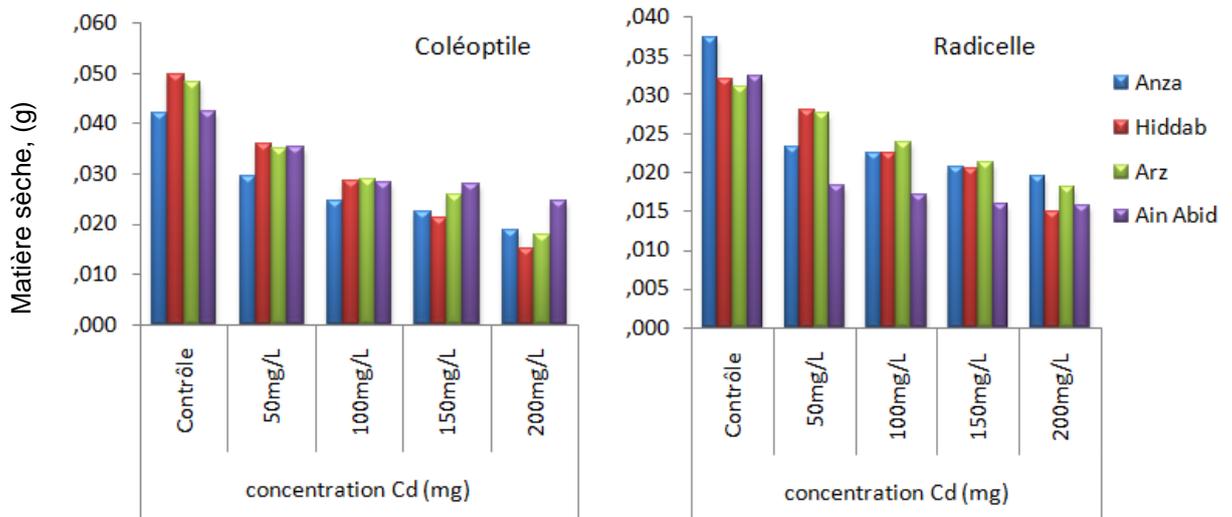


Figure 6.1.1.5. Effet de différentes concentrations de cadmium sur la variation du poids de la matière sèche des coléoptiles et des racines pour les variétés de blé tendre étudiées. Des plantules issues de la germination des semences ont été exposées à différentes concentrations de  $CdCl_2$  durant 7 jours. Les prélèvements ont été effectués plante par plante. Les valeurs sont des moyennes de 10 répétitions. Les barres d'erreur correspondent aux erreurs standards.

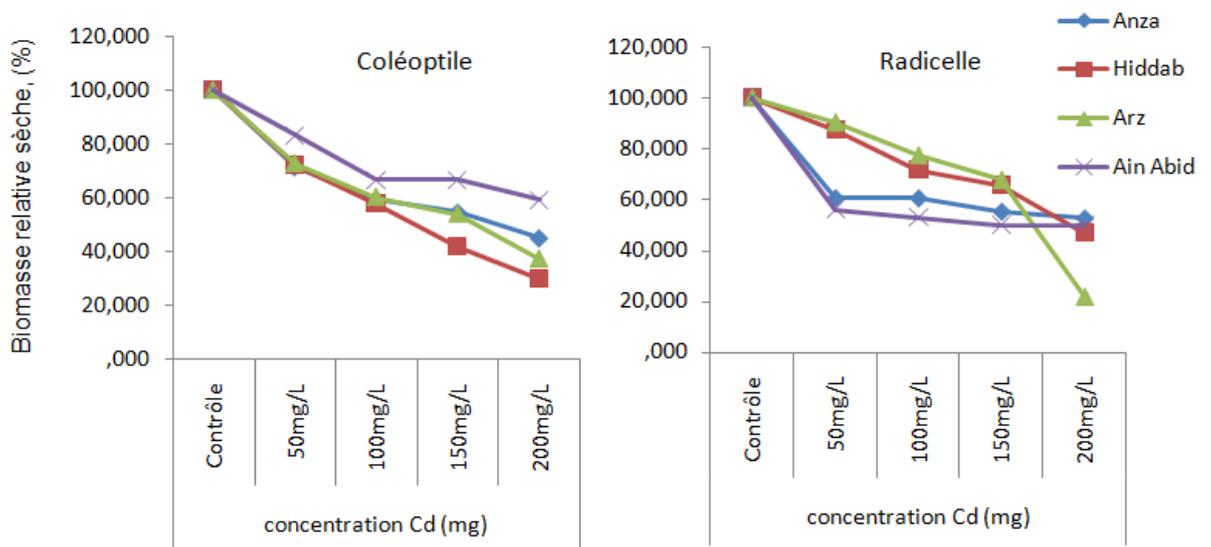


Figure 6.1.1.6. Effet de différentes concentrations de cadmium sur la variation de la biomasse relative de la matière sèche des coléoptiles et des racines pour les variétés de blé tendre étudiées. Cette biomasse sèche relative est exprimée par référence à la biomasse mesurée sur des plantules témoins germées en absence de cadmium; elle est exprimée en pourcentage. Des plantules issues de la germination des semences ont été exposées à différentes concentrations de  $CdCl_2$  durant 7 jours. Les prélèvements ont été effectués plante par plante. Les valeurs sont des moyennes de 10 répétitions. Les barres d'erreur correspondent aux erreurs standards.

La présence du cadmium dans le milieu induit une chute considérable de la masse fraîche des racines à 50 mg/l des variétés Anza et Ain abid avec des valeurs de 53.5% et 59.39% respectivement par rapport aux valeurs mesurées des plantes témoins non soumises au cadmium. Après, la diminution était progressive suivant l'augmentation de la concentration de cadmium dans le milieu jusqu'à une réduction de 76.14% et 70.68% à 200mg/l de concentration de Cd (Fig6.1.1.3, Fig6.1.1.4).

Pour les autres variétés, la réduction est proportionnelle à l'augmentation de la concentration du cadmium qui atteint 68.63% et 63.7% pour les variétés Hiddab et Arz respectivement à la concentration de 200mg/l.

En ce qui concerne les coléoptiles, le cadmium induit une réduction progressive allant de la plus faible concentration en Cd (50mg/l) avec une baisse de 38.3%, 32.89%, 20.76% et 35.87% pour les variétés Anza, Hiddab, Arz et Ain Abid, et elle continue à s'accroître avec l'augmentation de la concentration de cadmium dans le milieu. Cette dernière il provoque des réductions de biomasse des coléoptiles de 62.95%, 73.92%, 49.38% et 60.21% chez les plantes des variétés Anza, Hiddab, Arz et Ain abid, respectivement, lorsqu'elles ont germées en présence de 200 mg/l de CdCl<sub>2</sub>.

La variation du poids des matières sèches des coléoptiles et des racines des plantules en fonction de la concentration de cadmium dans le milieu présente une allure générale identique à celle obtenue pour la variation de la biomasse fraîche (Fig 6.1.1.5, Fig 6.1.1.6)

#### 6.1.1.4. Analyse de la phytotoxicité

Etant donné que le cadmium est classé comme une substance très toxique, l'évaluation du degré de sa toxicité sur les racines et les coléoptiles des variétés de blé tendre étudiées est un paramètre important. La figure 6.1.1.7 montre l'effet des différentes concentrations de milieu en cadmium sur les plantules.

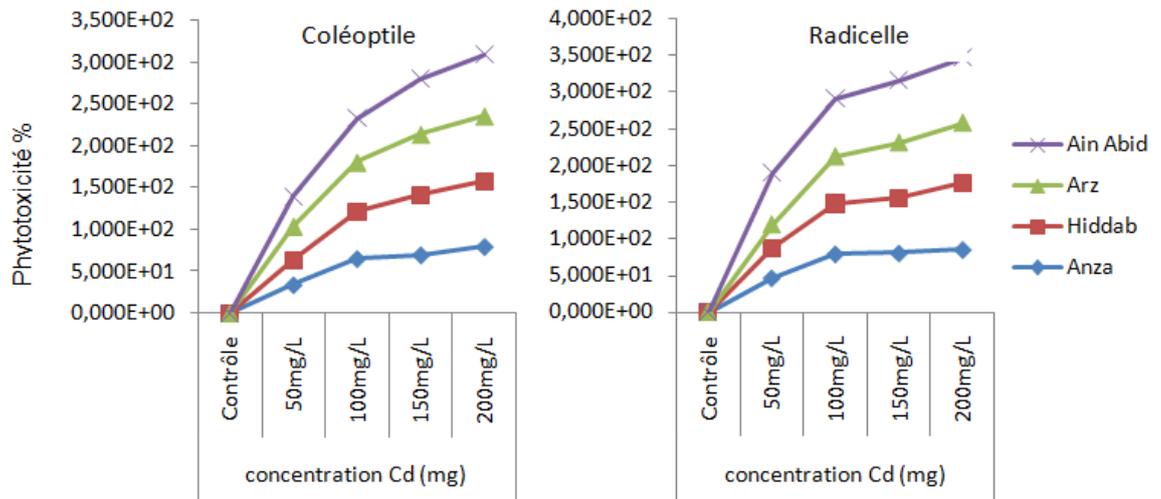


Figure 6.1.1.7 : Effet de différentes concentrations de cadmium sur la phytotoxicité des coléoptiles et des racines pour les variétés de blé tendre étudiées. Des plantules issues de la germination des semences ont été exposées à différentes concentrations de  $\text{CdCl}_2$  durant 7 jours. Les prélèvements ont été effectués plante par plante. Les valeurs sont des moyennes de 10 répétitions. Les barres d'erreur correspondent aux erreurs standards.

La phytotoxicité du cadmium est notable dès sa présence dans le milieu même à une faible concentration où elle devient plus sévère en augmentant la concentration du Cd pour les coléoptiles ainsi que les racines. Cependant, la réponse des plantules diffère d'une variété à une autre. L'analyse de la variance montre un effet très hautement significatif ( $P=000$ ) de l'interaction variété-concentration sur ce paramètre. La variété Anza semble la plus tolérante et garde sa stabilité dès qu'on accroît la concentration de 100 mg/l, contrairement aux autres variétés notamment Ain Abid qui semble être la plus sensible.

### 6.1.1.5. Analyse de l'indice de vigueur et l'indice de tolérance

Savoir si une graine capable de germer dans un milieu chargé en Cd et si elle continue à croître dans ce milieu, tous ça est pu être évident par la détermination de l'indice de vigueur et celle de tolérance ainsi que la corrélation entre ces deux indices (Fig 6.1.1.8 et Fig 6.1.1.9).

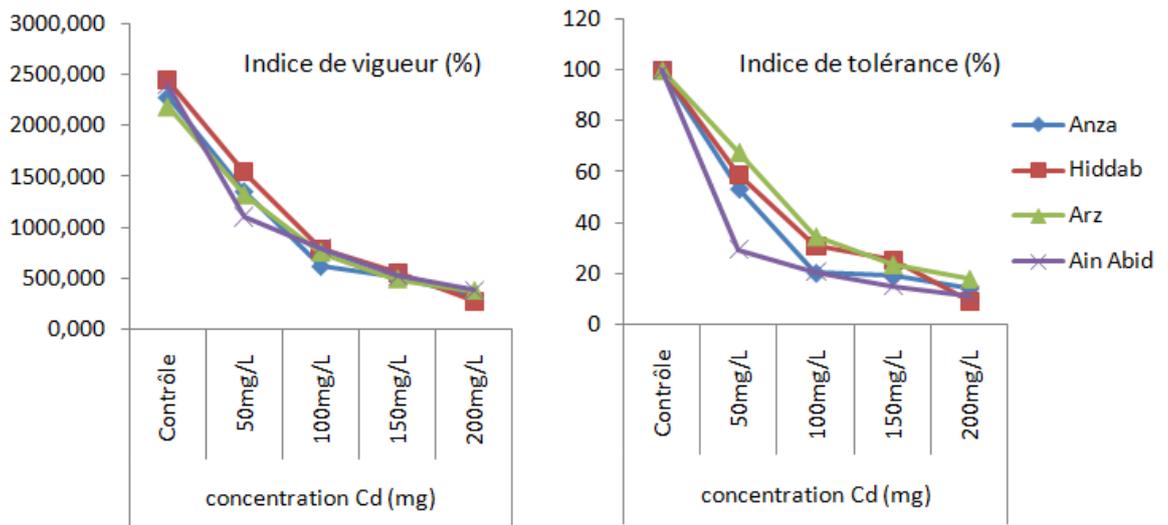


Figure 6.1.1.8 : Effet de différentes concentrations de cadmium sur la vigueur et la tolérance des plantules des variétés de blé tendre étudiées. Des plantules issues de la germination des semences ont été exposées à différentes concentrations de CdCl<sub>2</sub> durant 7 jours. Les prélèvements ont été effectués plante par plante. Les valeurs sont des moyennes de 10 répétitions. Les barres d'erreur correspondent aux erreurs standards.

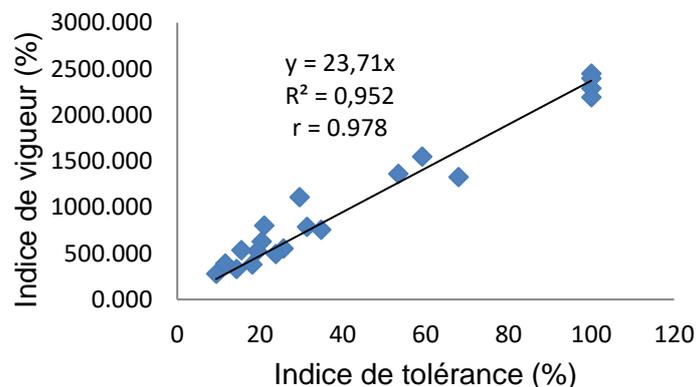


Figure 6.1.1.9 : Corrélation de l'indice de tolérance en fonction de l'indice de vigueur des plantules des variétés de blé tendre étudiées.

L'indice de tolérance a diminué d'une façon considérable pour les quatre variétés notamment la variété Ain abid ce qui confirme l'effet perturbateur du Cd dès sa présence dans le milieu même à faible concentration, après il décroît légèrement suivant l'augmentation du cadmium (Fig 6.1.1.8). Les variétés semblent déclencher leur propre stratégie afin de maintenir leur hémostasie contre le Cd.

En ce qui concerne l'indice de vigueur, les plantules perdent leurs vigueurs suivant l'augmentation de la concentration du Cd dans le milieu (Fig 6.1.1.8). La diminution présente une allure généralement identique à celle de la variation de l'indice de tolérance ; et la courbe de corrélation entre ces deux paramètres confirme cette compatibilité entre les deux indices par une corrélation proportionnelle très élevée (Fig 6.1.1.9).

### 6.1.2. Discussion

Dans cette partie du travail, les semences des quatre variétés choisies ont été exposées aux différentes concentrations du cadmium, pour voir l'effet de ce dernier sur le processus de germination. Les variétés se comportent différemment en fonction de la concentration du cadmium dans le milieu. Durant cette phase la graine a besoin de conditions externes et internes favorables pour un développement normal.

Plusieurs études montrent le négatif impact et la toxicité des métaux lourds sur le processus de germination et la croissance des plantules (Datta J.K et al, (2011), Ahsan, N et al, (2007).

La germination des graines décroît significativement suivant les concentrations du Cd dans le milieu, cette diminution peut s'expliquer par La réduction de l'activité d'amylase (Amirjani, 2012).

Il est toutefois important de noter que  $\alpha$ -amylase est l'enzyme majeure impliquée dans la dégradation initiale de l'amidon dans les formes les plus solubles tandis que la phosphorylase et la  $\beta$ -amylase aident à la nouvelle conversion à libérer les sucres qui permettent la nutrition de la germination de la graine, cette dernière se traduit par une activation des activités enzymatiques dans toutes les parties de la graine (embryon et tissus de réserves), conduisant à la croissance de l'embryon et à la constitution d'un germe.(Labbe,2004) .

Les mesures de l'allongement des coléoptiles et des racelles ainsi que leurs poids frais et secs des variétés soumises aux différentes concentrations du cadmium sont significativement affectés. On note une réduction progressive suivant l'augmentation de la concentration du Cd dans le milieu, particulièrement chez les racelles qui semblent être les plus sensible, cela peut être du à leur localisation au premier point de contact avec le milieu externe chargé en cadmium [Yang, M.G., et al 1998, Amirjani M.R; 2012], ainsi que la perturbation de l'équilibre de certaines hormones de croissance (Hasenstein *et al*, 1988).

En ce qui concerne la phytotoxicité des racelles et des coléoptiles, la présence du Cd influe significativement ce paramètre, cependant sa sévérité

varie d'une variété à une autre suivant cet ordre croissant : Anza, Hiddab, Arz et Ain abid.

L'étude de ce paramètre nous a permis de classer les variétés étudiées en variété tolérante et résistante, ainsi que la vigueur des jeunes plantules soumises aux stress en Cd. Les deux paramètres varient proportionnellement selon le coefficient de corrélation comme montre le tableau 6.2

Notre étude a permis de décrire le comportement des quatre variétés de blé tendre étudiées en terme d'effet du cadmium sur les paramètres germinatifs. D'après les résultats, les variétés se comportent d'une manière différente et tolèrent la présence du Cd dans le milieu différemment. Il est donc important de déterminer la réponse physiologique des variétés à différentes concentrations de Cd dans le milieu.

Tableau 6.2 : Test de corrélation de Pearson entre les différents paramètres étudiés									
		TG	LC	LR	PSC	PSR	IT	Phyto_C	Phyto_R
TG	Corrélation de Pearson	1,00	,620**	,547**	,638**	,599**	,585**	-,650**	-,586**
	Sig. (bilatérale)		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	N	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00
LC	Corrélation de Pearson	,620**	1,00	,947**	,959**	,840**	,944**	-,994**	-,944**
	Sig. (bilatérale)	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	N	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00
LR	Corrélation de Pearson	,547**	,947**	1,00	,905**	,929**	,982**	-,952**	-,982**
	Sig. (bilatérale)	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	N	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00
PSC	Corrélation de Pearson	,638**	,959**	,905**	1,00	,823**	,913**	-,952**	-,913**
	Sig. (bilatérale)	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00
	N	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00
PSR	Corrélation de Pearson	,599**	,840**	,929**	,823**	1,00	,942**	-,867**	-,942**
	Sig. (bilatérale)	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00
	N	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00
IT	Corrélation de Pearson	,585**	,944**	,982**	,913**	,942**	1,00	-,955**	-1,000**
	Sig. (bilatérale)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00
	N	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00
Phyto_C	Corrélation de Pearson	-,650**	-,994**	-,952**	-,952**	-,867**	-,955**	1,00	,955**
	Sig. (bilatérale)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00
	N	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00
Phyto_R	Corrélation de Pearson	-,586**	-,944**	-,982**	-,913**	-,942**	-1,000**	,955**	1,00
	Sig. (bilatérale)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	N	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00

\*\* . La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).

TG : taux de germination, LC : longueur des coléoptiles, LR : longueur des radicules, PSR : poids sec des coléoptiles, PSR : poids sec des radicules, IT : indice de tolérance, IV : indice de vigueur, Phyto-C : phytotoxicité des coléoptiles, Phyto-R : phytotoxicité de radicules.

## 6.2. Analyses des paramètres de l'essai de culture

### 6.2.1. Résultats

#### 6.2.1.1. Effet du cadmium sur la production de la biomasse

L'effet le plus habituel et le moins spécifique de cadmium consiste en une réduction de la croissance des différentes parties de la plante selon sa concentration dans le milieu. Dans ce contexte, l'étude du comportement des variétés soumises à ce type de stress est recherchée.

Après un mois de croissance dans un milieu chargé en Cd à différentes concentrations ; l'analyse de la biomasse fraîche et sèche sont représentées par les figures 6.2.1.1, 6.2.1.2, 6.2.1.3 et 6.2.1.4.

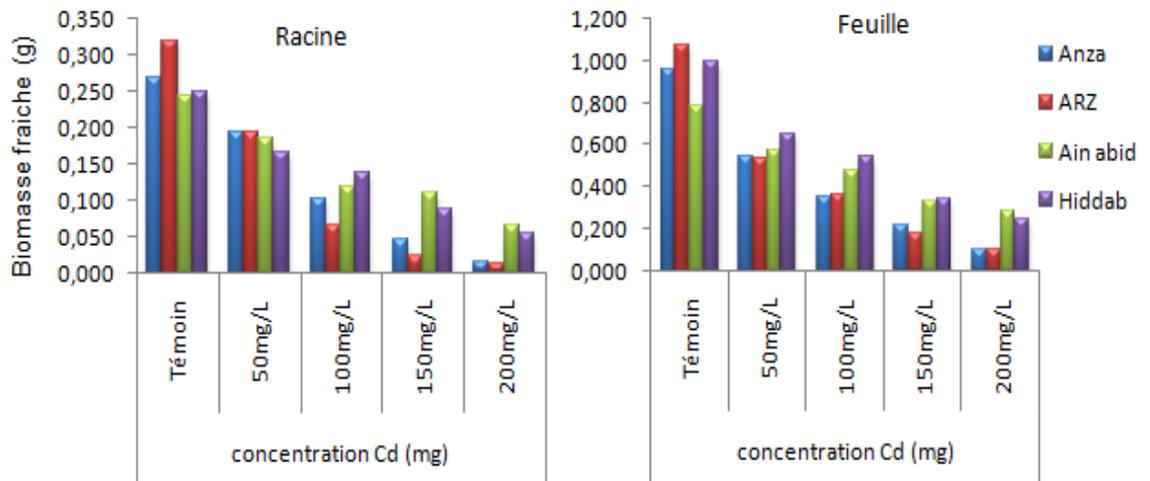


Figure 6.2.1.1 Effet de différentes concentrations de cadmium sur la variation de la biomasse fraîche des feuilles et des racines pour les variétés de blé tendre étudiées. Des plantules âgées 30 jours ont été exposées à différentes concentrations de CdCl<sub>2</sub> durant 30 jours. Les prélèvements ont été effectués plante par plante. Les valeurs sont des moyennes de 10 répétitions. Les barres d'erreur correspondent aux erreurs standards.

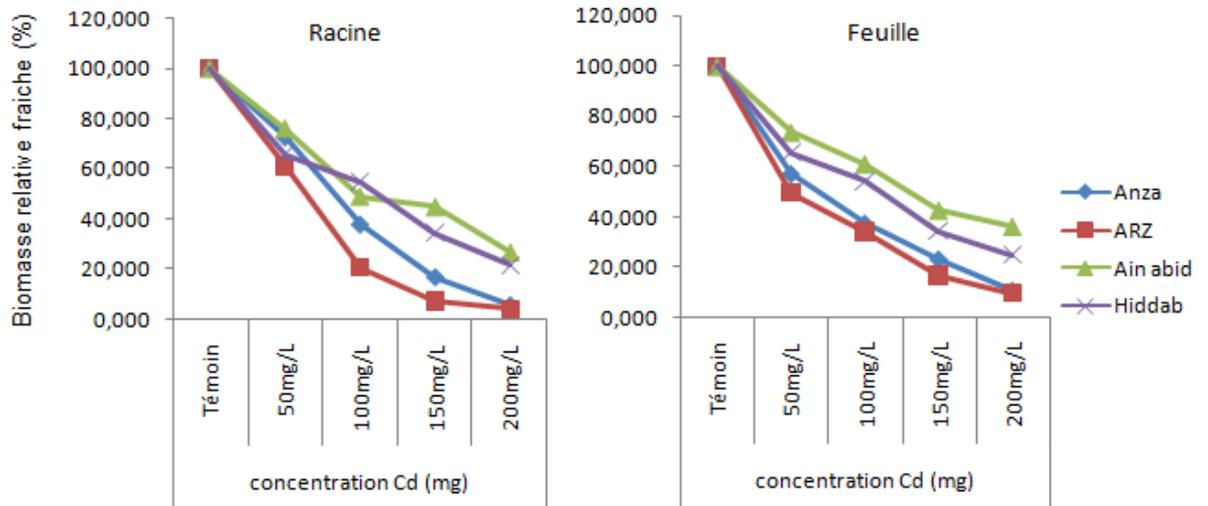


Figure 6.2.1.2. Effet de différentes concentrations de cadmium sur la variation de la biomasse relative de la matière fraîche des feuilles et des racines pour les variétés de blé tendre étudiées. Cette biomasse fraîche relative est exprimée par référence à la biomasse mesurée sur des plantules témoins cultivées en absence de cadmium; elle est exprimée en pourcentage. Des plantules âgées ont été exposées à différentes concentrations de  $\text{CdCl}_2$ . Les prélèvements ont été effectués plante par plante. Les valeurs sont des moyennes de 10 répétitions. Les barres d'erreur correspondent aux erreurs standards.

Une réduction importante de la biomasse fraîche que ce soit des racines ou des feuilles est enregistrée suivant l'augmentation de la concentration du Cd dans le milieu. L'analyse de la variance révèle une différence très hautement significative ( $p=000$ ) Ceci explique l'effet toxique de cet élément sur la biomasse fraîche. Néanmoins, la réduction diffère d'une variété à une autre avec une sévérité échelonnée. Les racines montrent, cependant, une sensibilité plus élevée par rapport aux feuilles avec des taux de réductions de 95.59%, 94.03%, 78.09% et 73.26% des variétés Arz, Anza, Hiddab et Ain Abid respectivement.

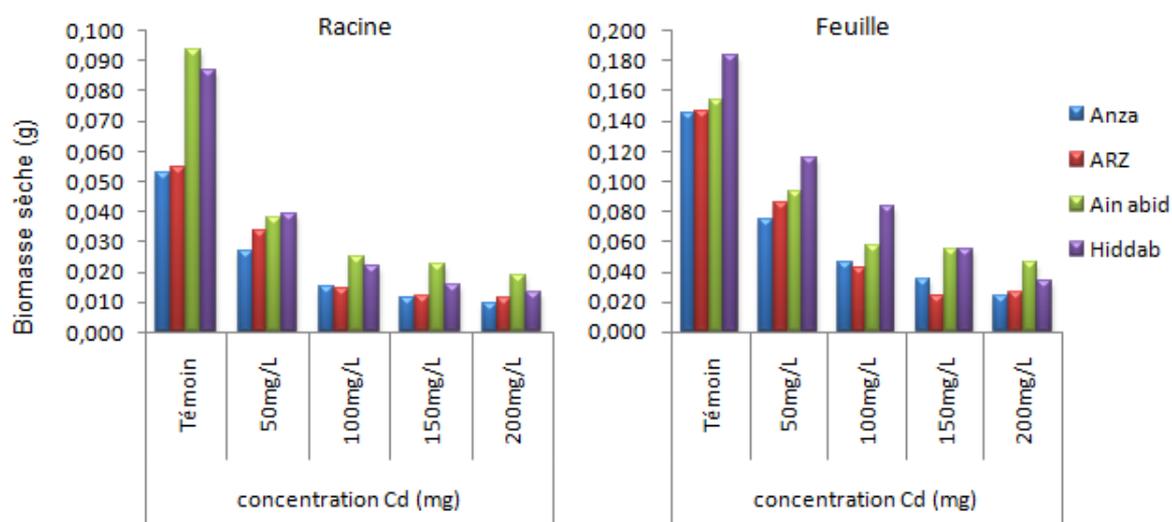


Figure 6.2.1.3. Effet de différentes concentrations de cadmium sur la variation de la biomasse sèche des feuilles et des racines pour les variétés de blé tendre étudiées. Des plantules âgées 30 jours ont été exposées à différentes concentrations de  $\text{CdCl}_2$  durant 30 jours. Les prélèvements ont été effectués plante par plante. Les valeurs sont des moyennes de 10 répétitions. Les barres d'erreur correspondent aux erreurs standards.

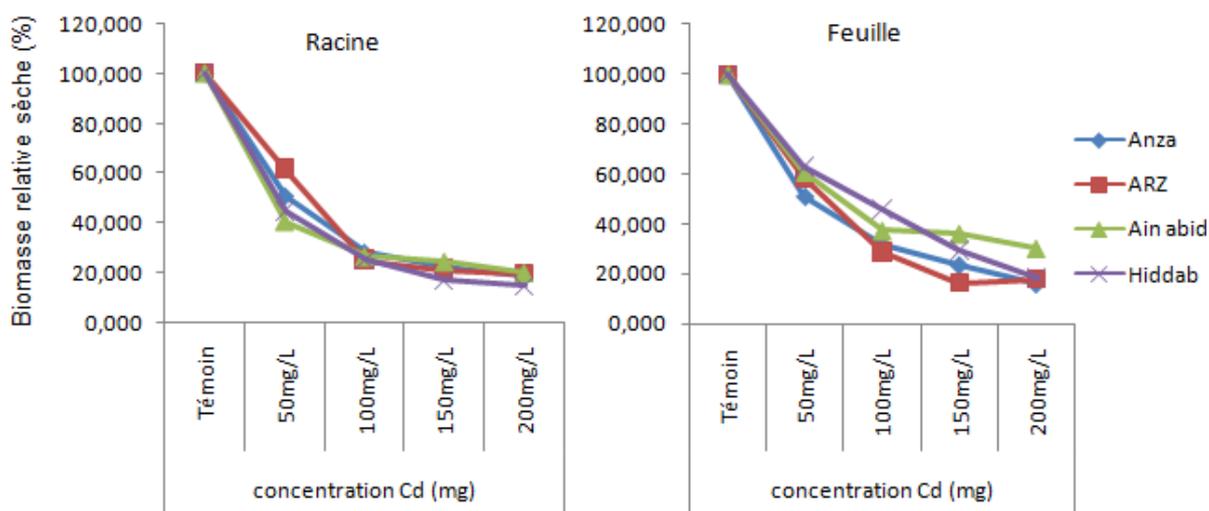


Figure 6.2.1.4. Effet de différentes concentrations de cadmium sur la variation de la biomasse relative de la matière sèche des feuilles et des racines pour les variétés de blé tendre étudiées. Cette biomasse fraîche relative est exprimée par référence à la biomasse mesurée sur des plantules témoins cultivées en absence de cadmium; elle est exprimée en pourcentage. Des plantules âgées ont été exposées à différentes concentrations de  $\text{CdCl}_2$ . Les prélèvements ont été effectués plante par plante. Les valeurs sont des moyennes de 10 répétitions. Les barres d'erreur correspondent aux erreurs standards.

L'exposition des quatre variétés Arz, Anza, Hiddab et Ain abid aux concentrations croissantes du Cd provoque une diminution croissante aussi bien de la biomasse sèche des feuilles que des racines, ces résultats sont similaires à ceux enregistrés dans l'essai de germination où on note une diminution du poids sec dès qu'elles sont exposées à une faible concentration du Cd dans le milieu (50 mg/l), qui s'accroît progressivement jusqu'au plus faible poids des racines 0.010g, 0.011g, 0.013 g et 0.019 g des variétés Anza, Arz, Hiddab et Ain abid successivement et le poids sec le plus faible des feuilles 0.023 g, 0.026 g 0.034g et 0.046 g suivant le même ordre des variétés soumises à la concentration de 200mg/l.

### 6.2.1.2. Effet du cadmium sur le statut hydrique des plantes

L'hydratation des tissus a été estimée d'après le calcul du rapport entre biomasse sèche et biomasse fraîche (MS/MF) et biomasse fraîche relative, des feuilles et des racines illustrées dans les figures (figure 6.2.1.5 et figure 6.2.1.6).

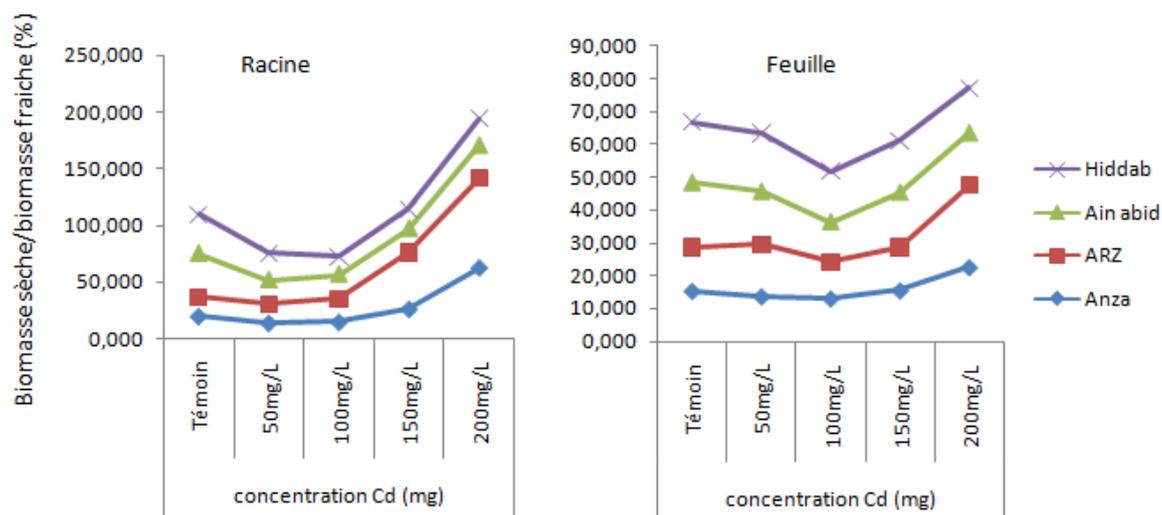


Figure 6.2.1.5. Effet des différentes concentrations de cadmium sur le rapport entre masse sèche et masse fraîche des parties aériennes et des racines pour les variétés de blé tendre étudiées. Ce rapport est exprimé en pourcent. Des plantes âgées de 30 jours, ont été exposées à différentes concentrations de CdCl<sub>2</sub>. Les prélèvements ont été effectués plante par plante. Les valeurs sont des moyennes de 10 répétitions. Les barres d'erreur correspondent aux erreurs standards.

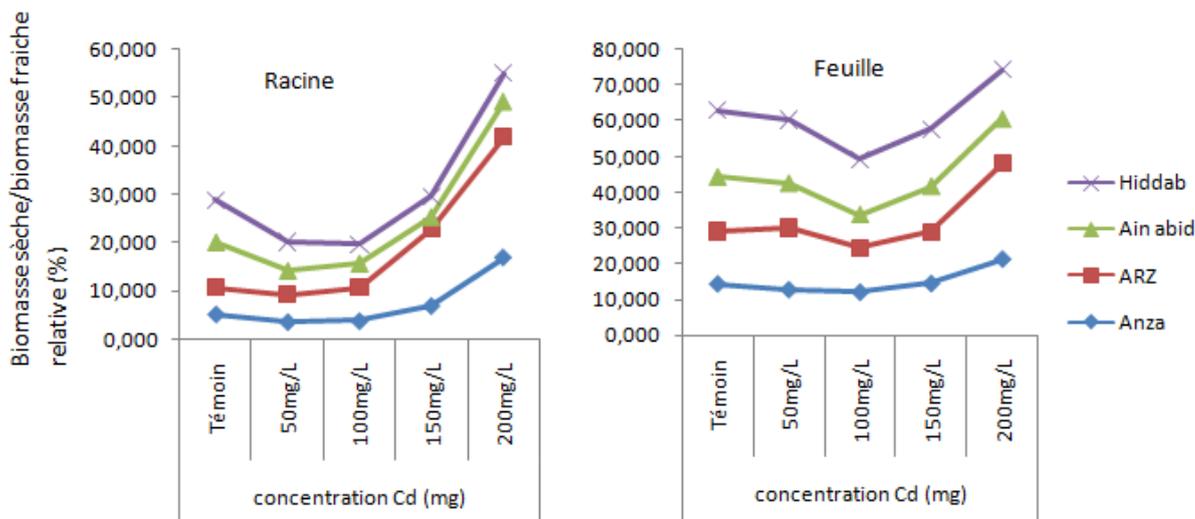


Figure 6.2.1.6. Effet des différentes concentrations de cadmium sur le rapport entre masse sèche et masse fraîche relative des parties aériennes et des racines pour les variétés de blé tendre étudiées. Ce rapport est ici exprimé en pourcentage du même rapport calculé pour les plantes témoins, c'est-à-dire non soumises à un traitement par le cadmium. Les plantes âgées de 30 jours ont été exposées à différentes concentrations de CdCl<sub>2</sub>. Les prélèvements ont été effectués plante par plante. Les valeurs sont des moyennes de 10 répétitions.

Une perturbation remarquable du statut hydrique des variétés soumises aux différentes concentrations du milieu en cadmium a été notée soit pour les racines ou les feuilles. L'effet du Cd sur ce paramètre révèle une différence très hautement significative ( $p=0.000$ ), et permet de classer les variétés étudiées en variétés résistantes et sensibles à la déshydratation.

La déshydratation des parties aériennes est progressive suivant l'augmentation de la concentration du Cd dans le milieu, allant de la variété Hiddab la plus déshydratée avec un pourcentage de 73%, dans le milieu qui contient la plus forte dose (200mg/l) de Cd suivi par Ain abid, et Arz qui sont moyennement déshydratée avec des pourcentages de 60% et 49% successivement, quant à la variété Anza, celle-ci a montré un comportement légèrement affecté par le cadmium avec un taux de déshydratation de 21%.

Contrairement aux feuilles, la présence du Cd dans le milieu n'affecte pas l'hydratation des racines avec la même sévérité exercée sur les feuilles, cependant l'ordre de sensibilité des variétés reste le même que cela des parties

aériennes avec des taux de 55%, 49%, 42% et 18% des variétés Hiddab, Ain abid, Arz et Anza successivement.

### 6.2.1.3. Effet du cadmium sur l'assimilation chlorophyllienne

Le traitement par le cadmium provoque une perturbation de l'assimilation chlorophyllienne exprimée par les deux types de chlorophylle a et b (Figure 6.2.1.7) pour les quatre variétés étudiées Arz, Anza, Ain abid et Hiddab. L'analyse de variance a décelé une différence très hautement significative de ce taux sous l'effet des doses croissantes en cadmium.

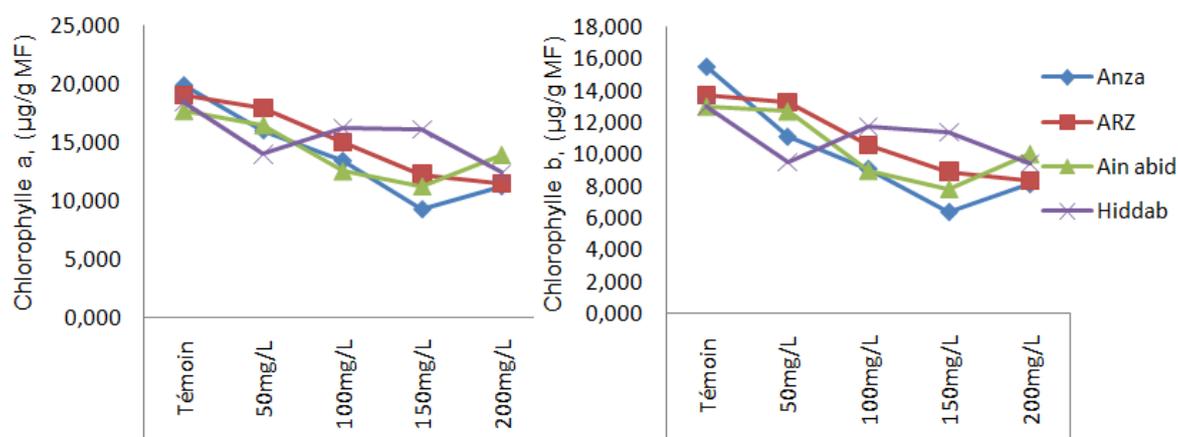


Figure 6.2.1.7. Effet de différentes concentrations de cadmium sur l'assimilation de la chlorophylle a des variétés de blé tendre étudiées. Les barres d'erreur correspondent aux erreurs standards.

Cependant, on remarque un comportement différent entre les variétés étudiées. Le taux de la chlorophylle que ce soit a ou b diminue progressivement suivant l'augmentation de la concentration du Cd dans le milieu pour la variété Arz et Anza où on a enregistré un pourcentage de réduction plus de 60% pour Arz alors que Anza a repris son activité sous la concentration 200mg/l en Cd. La variété Hiddab se comporte différemment, où on a noté une diminution de l'assimilation chlorophyllienne dès la présence du Cd dans le milieu puis, elle a repris son activité photosynthétique et garde cette stabilité en augmentant la concentration du Cd dans le milieu avec des taux de (16,24 ; 11,71) et (16,14 ; 11,39) (µg/g MF) de chlorophylle a et b sous les concentrations 100 et 150 mg/l successivement puis une rediminution sous la concentration 200mg/l de chlorophylle a et b ( 12.3 et 9.37 µg/g MF).

Une lente diminution a été enregistrée chez la variété Ain abid en augmentant la concentration du Cd dans le milieu jusqu'à la dose de 200mg/g où la variété a repris son activité avec un taux de 13.87 et 9.97µg/g MF de chlorophylle a et b successivement (figure 6.2.1.7).

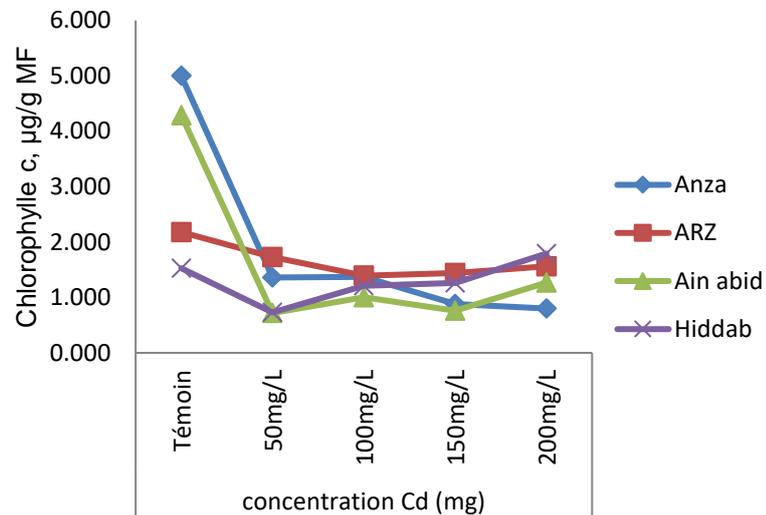


Figure 6.2.1.8 : Effet de différentes concentrations de cadmium sur l'assimilation de la chlorophylle c des variétés de blé tendre étudiées. Les barres d'erreur correspondent aux erreurs standards.

D'après la figure 6.2.1.8, les différentes variétés étudiées se comportent différemment en ce qui concerne la chlorophylle c. l'analyse de la variance montre un effet très hautement significatif des concentrations du cadmium dans le milieu sur ce paramètre.

Le taux de chlorophylle c diffère d'une variété à l'autre en absence du Cd, cependant dès sa présence dans le milieu même à une faible concentration (5mg/l) les variétés Anza et Ain abid ont subi une chute brutale du taux de chlorophylle c (de 5 à 1.3µg/g MF pour Anza et de 4.29 à 0.92 µg/g MF) puis elles ont gardé une certaine stabilité en augmentant la concentration du Cd dans le milieu. Les variétés Arz et Hiddab ont montré une diminution progressive de taux de chlorophylle c suivant l'augmentation du Cd dans le milieu avec une vitesse lente.

#### 6.2.1.4. Taux de proline

La proline est un acide aminé souvent considéré comme un bio marqueur de stress, en effet, son dosage est pour évaluer l'état de stress de la plante. L'analyse de la variance révèle une différence très hautement significative de l'effet du Cd sur la teneur en proline (Figure 6.2.1.9).

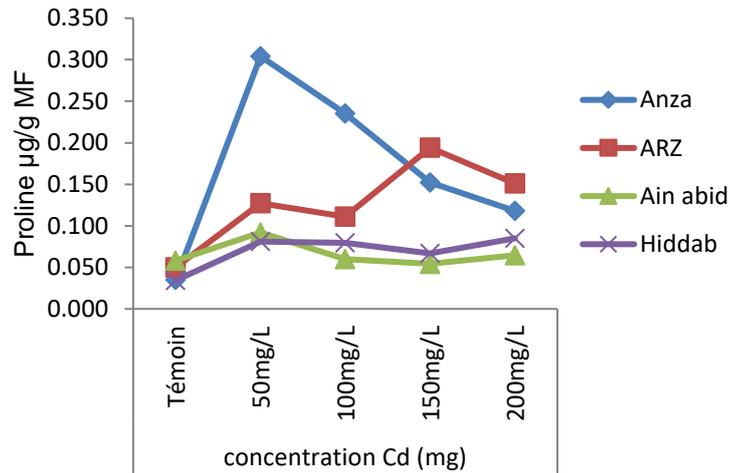


Figure 6.2.1.9 : Effet de différentes concentrations de cadmium sur la proline des variétés de blé tendre étudiées. Les barres d'erreur correspondent aux erreurs standards.

La variété Anza montre une sensibilité au Cd dès sa présence dans le milieu par une forte synthèse de la proline ( $0.304 \mu\text{g/g MF}$ ) par rapport aux autres variétés. La teneur en proline des variétés Hiddab et Ain abid augmente progressivement suivant l'augmentation du Cd dans le milieu. Cependant, la variété Arz montre un comportement perturbé suivant l'augmentation du Cd dans le milieu ( $0.127, 0.111, 0.194$  et  $0.151 \mu\text{g/g MF}$ ) sous les concentrations 50, 100, 150 et 200 mg/g successivement.

#### 6.2.1.5. Taux en sucres solubles

L'effet du cadmium sur les teneurs en sucres solubles est illustré dans la figure ci-dessus (Figure 6.2.1.10). Une différence très hautement significative est enregistrée de l'effet du Cd sur les sucres solubles. La teneur de ces dernières

augmente en présence du Cd dans au milieu par rapport le milieu dépourvu du Cd à savoir le témoin.

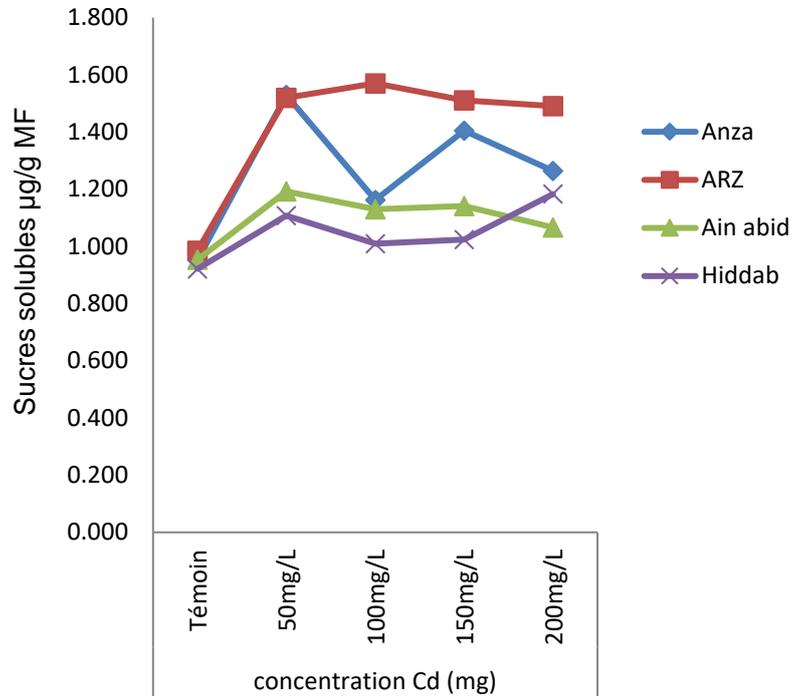


Figure 6.2.1.10 : Effet de différentes concentrations de cadmium sur les sucres solubles des variétés de blé tendre étudiées. Les barres d'erreur correspondent aux erreurs standards.

Les teneurs en sucres solubles synthétisés par les variétés Arz, Ain abid et Hiddab représentent la même allure, cependant les celles enregistrées par la variété Arz sont plus élevées par rapport celles de Ain abid et Hiddab successivement. Alors que la variété Anza se montre très perturbé et instable dans sa synthèse des sucres solubles.

#### 6.2.1.6. Accumulation du Cd

Une variation considérable de la concentration du Cd est enregistrée pour les deux variétés soumises aux différentes concentrations du milieu en Cd. En effet, l'analyse de la variance montre une différence très hautement significative ( $p=0.000$ ).

Les concentrations du Cd dans les parties aériennes des variétés étudiées augmentent suivant l'accroissement de la concentration du Cd dans le milieu. Cependant les variétés n'accumulent pas le Cd du même degré, Arz semble plus accumulatrice que Hiddab avec des concentrations de 61.6, 92.4, 133.2 et 163.2 mg/100g de MS sous l'effet des concentrations 50, 100, 150 et 200 mg/l du milieu, successivement (Figure 6.2.1.11).

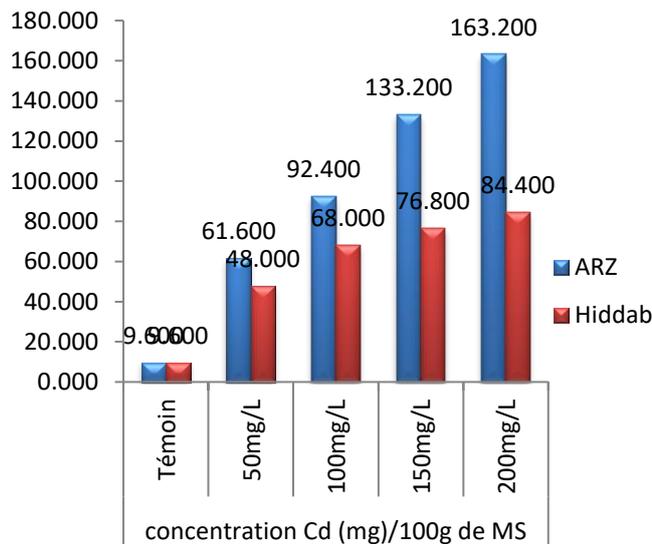


Figure 6.2.1.11: Effet de différentes concentrations de cadmium sur son accumulation par les variétés de blé tendre étudiées. Les barres d'erreur correspondent aux erreurs standards.

### 6.2.2. Discussion

La perturbation du processus photosynthétique, la réduction de la production de la biomasse végétative sèche, l'induction de la synthèse des bios marqueurs et l'accumulation de l'agent stressant dans la plante sont les résultats de la présence du cadmium dans le milieu de culture.

Une réduction importante de la biomasse végétative des variétés étudiées suivant l'augmentation du Cd dans le milieu est enregistrée, ces résultats sont similaires à plusieurs études de l'effet des métaux lourds sur les plantes en générale et l'effet du Cd sur le blé en particulier (Djebali et al, 2005, Ci et al, 2010a, Riaz et al, 2014; Rizwan et al, 2016b). Cependant, la diminution est différente entre les deux variétés, dont la croissance de la variété Hiddab est plus

affectée par la présence du Cd dans le milieu que celle d'Arz. Explique que ceci est du principalement à l'effet variétale (Naeem et al, 2016).

On note une réduction de l'assimilation chlorophyllienne exprimée par la diminution de taux de chlorophylle suivant l'augmentation de la concentration de cadmium, ceci va de pair avec les résultats de Moustakas et al. 1997 et Singh et al (2004). D'autres études plus approfondies ont été menés pour savoir les cibles d'actions des métaux lourds dans la voie biosynthétique.

D'après Oncel et al (2000), Les enzymes qui rentrent en jeu en présence du cadmium pourrait empêcher la formation du complexe photoactif photochlorophyllide- NADPH- Enzyme en inhibant l'enzyme protochlorophyllide réductase ou encore la  $\gamma$ -aminolévalinique déshydrogénase et ce, suite à l'interaction du Cadmium sur les groupements thiols (SH) des enzymes.

Nos résultats vont de pair avec ceux trouvés par Mobin et Khan (2007) ; Ebbs et Uchil (2008) ; Ekmekci et al, (2008), qui ont montré que La réduction de l'assimilation chlorophyllienne induit automatiquement une réduction à la croissance de la plante.

Les études réalisées par Mujahid et al, 2013 et Deyala; 2016 ; ont montré que la présence du Cd dans le milieu induit la synthèse des molécules anti oxydantes.

Dans notre étude on s'est intéressé à étudier la variation des taux de proline et les sucres solubles dans variétés soumises à différentes concentrations du Cd dans le milieu ; une perturbation considérable a été enregistré exprimée par l'accumulation graduelle de ces deux molécules dans les tissus des plantules (Costa et Spitz, 1997 ; Aoun, 2009) Cette accumulation résulte d'une altération des activités enzymatiques, notamment l'invertase acide, le saccharose synthase et l'amidon phosphorylase. Cependant les taux ont été différents entre les variétés étudiées.

L'assimilation du cadmium par le blé varie avec le type de sol, la pollution atmosphérique et les variétés cultivées de blé (Guo et al, 2012; Liu et Al, 2015a). Dans notre étude on s'est basé sur le facteur variété. Une différence remarquable de l'accumulation du Cd est enregistrée chez les deux variétés étudiées, ces

résultats vont de pair avec ceux trouvés par Arduini et al 2014, Ehab M.R. Metwali et al 2013.

L'augmentation de la concentration du cadmium dans le milieu extérieur provoque une variation de la quantité de cadmium transportée des racines vers les parties aériennes surtout chez la variété Arz, en revanche la variété Hiddab accumule moins le cadmium; son comportement peut être s'expliqué par la mise en place d'un ou de plusieurs mécanismes permettant de limiter l'absorption par les racines, de réduire le transfert vers la partie aérienne, ou de favoriser l'afflux de cadmium en dehors du cytoplasme.

La capacité de translocation du cadmium des racines vers la partie aérienne peut varier entre les variétés de la même espèce (Costa et Morel, 1994a ; Costa et Morel, 1994b) Des résultats similaires ont été obtenus chez le haricot (Hardiman et Jacoby, 1984).

Les perturbations de la translocation du cadmium pourraient être dues à une compétition au niveau des transporteurs entre celui ci et d'autres éléments minéraux présentant une similitude structurale.

D'Après Adeniji et al, (2010) et Ci et al, (2010a) une concentration plus haute de Cd est accumulée dans les racines et moins est transférée aux tiges selon les variétés de blé.

Suite aux données que nous avons obtenues, les tests de corrélations entre le taux d'accumulation du cadmium et la croissance relative et la biomasse sèche relative des feuilles (Figure 6.2.2.12,) montrent en effet pour les deux variétés une forte corrélation entre ces deux paramètres.

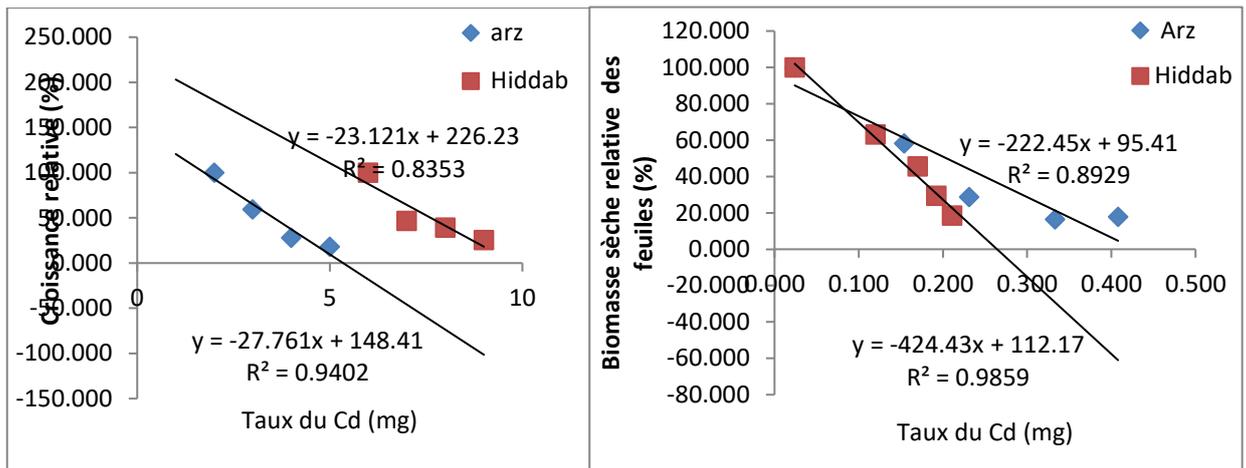


Figure 6.2.2.12: Corrélation entre le taux accumulé du Cd et la croissance relative et la biomasse sèche des feuilles

En considérant un modèle de régression linéaire simple, une forte corrélation entre la croissance relative de la variété Arz et les teneurs du cadmium a été exprimé par un coefficient de corrélation  $R = 0.96$  et un coefficient de détermination  $R^2 = 0.94$ , suivi par la variété Hiddab qui se montre un peu plus tolérante au cadmium avec un coefficient de corrélation  $R = 0.81$  et un coefficient de détermination  $R^2 = 0.83$ .

En ce qui concerne la biomasse sèche relative des feuilles ; on note de même des coefficients de corrélation élevé pour les deux variétés étudiées avec un taux d'accumulation du cadmium.

Cette étude a permis de montrer que le cadmium perturbe la croissance des deux variétés étudiées, Néanmoins, quelques différences entre le comportement des variétés analysées ont été observées.

En effet, la variété Arz, semble être la plus accumulatrice de cadmium et la plus affectée par ce dernier, ce qui permet d'émettre l'hypothèse que la forte sensibilité au cadmium de cette variété pourrait être liée entre autre à une forte accumulation du cadmium.

## CONCLUSION

A travers ce travail, nous avons pu recueillir un maximum de données intéressantes concernant la physiologie de plantes de *Triticum aestivum* soumises à différentes concentrations en cadmium et sur certains mécanismes conduisant à sa phytotoxicité.

Ceci, nous a permis d'avoir une connaissance partielle sur l'adaptation et la vulnérabilité de ces espèces étudiées par rapport à la contrainte métallique.

Ces variétés sont utilisées dans des étapes pour développer un essai de germination avait pour objectifs de déterminer l'effet du cadmium comme agent stressant sur les paramètres germinatifs, et un essai de culture avait pour objectifs de tester le comportement physiologique et la différence d'accumulation du cadmium des variétés étudiées.

### 1- Analyse des paramètres germinatifs sous l'effet du cadmium

L'objectif principal de cette partie du travail est de mettre en évidence l'effet du cadmium sur le processus germinatif des quatre variétés choisies pour l'étude.

A l'issue de cette analyse, on a constaté un effet négatif du cadmium sur les différents paramètres étudiés et un comportement qui diffère d'une variété à une autre.

Les mesures de l'allongement des coléoptiles et des racelles ainsi que leurs poids frais et secs des variétés soumises aux différentes concentrations du cadmium sont significativement affectés où on note une réduction progressive suivant l'augmentation de la concentration ce dernier dans le milieu, particulièrement les racelles qui semblent plus sensibles, cela peut être du à leur localisation au premier point de contact avec le milieu externe chargé en cadmium.

En augmentant la concentration du cadmium dans le milieu, sa phytotoxicité devient plus en plus sévère, cependant sa sévérité se varie d'une variété à une autre suivant cet ordre croissant : Anza, Hiddab, Arz et Ain abid.

## 2- Analyse des paramètres physiologiques sous l'effet du cadmium

L'étude de l'effet du cadmium sur la germination des variétés nous a menés de mettre en évidence le comportement de ces variétés à la phase de croissance vis-à-vis la présence du cadmium dans le milieu.

De ce fait, l'objectif de cette étape est de montrer la réponse physiologique des variétés soumises à des concentrations croissantes du cadmium.

A l'issue de cette analyse, on a constaté une perturbation de tout le processus physiologique qui était exprimé par une réduction importante de la biomasse végétative et le statut hydrique des variétés étudiées de manière différente.

Une réduction du contenu en chlorophylles est proportionnelle à la concentration utilisée, c'est-à-dire plus la concentration augmente plus la réduction est importante. Pour les pigments caroténoïdes, les résultats obtenus ont mis en évidence un effet dépressif du cadmium sur la synthèse et /ou la libération des caroténoïdes pour les quatre variétés étudiées.

En ce qui concerne l'accumulation de la proline, les variétés réagissent différemment, où la variété Anza montre une augmentation brutale dès qu'elle a soumise à une faible concentration du cadmium dans le milieu ensuite elle se contrôle, Arz se montre perturber alors que Hiddab et Ain abid, une accumulation de la proline graduelle suivant l'augmentation du cadmium dans le milieu. De même pour la synthèse des sucres solubles, Arz et Ain abid synthétisent les sucres solubles suivant l'augmentation du Cd dans le milieu cependant Arz libère une grande quantité. Pour la variété Anza se montre perturber alors que Hidab libère les sucres solubles suivant l'augmentation du Cd dans le milieu.

Notre étude nous a permis aussi de mettre en évidence l'accumulation de ce métal toxique dans les tissus des deux variétés testés, Arz et Hiddab, où la variété Arz se montre plus accumulatrice par rapport Hiddab, notamment une forte corrélation négative à était remarqué entre le taux d'accumulation et la croissance

des deux variétés ce qui explique la toxicité et ses effets néfastes sur la croissance des plantes.

Ce travail qui reste au début du chemin dans nos recherches et il reste beaucoup de travail à réaliser afin de mieux comprendre ce phénomène.

Cette étude pourrait être approfondie par l'étude de l'accumulation du Cd dans des stades avancés de la culture, les différents facteurs qui influent cette accumulation, l'effet du cadmium sur la nutrition minérale et l'approche génétique visé à préciser le déterminisme, simple ou complexe, des caractères contrôlant l'accumulation de cadmium chez le blé.

## APPENDICE A

### LISTE DES ABREVIATIONS

APX : Ascorbate peroxydase

CAT : Catalase

Cd : Cadmium

Chla : Chlorophylle a

Chl b : Chlorophylle b

CE : Conductivité Electrique

CRAPC : Centre de recherche en analyses physico-chimiques

ETM : Eléments traces métalliques

CEC : capacité d'échange de cation

EDTA : Acide éthylène-diamine-tétraacétique

GPOX : Gaïacol peroxydase

GPX : Glutathion peroxydase

LMW : Low Molecular Weight

HMW : High Molecular Weight

MF : Matière fraîche

MS : Matière sèche

MTs : Métallothionéines

Pas : Polyamines

PCn : Phytochélatines

POD : Peroxydase

ROS : Formes réactives de l'oxygène, de l'anglais« Reactive Oxygen Species»

SOD : Superoxyde dismutase

ZHF : Zinc Homeostasis Factor

ZIP : ZRT-IRT-like Proteins

ZNT : Zinc transporter

ZRT Zinc Regulated Transporter

## APPENDICE B

### TABLEAUX DE L'ANALYSE DE LA VARIANCE DES PARAMETRES ETUDIES

**TABLEAU 1:**

Source		Somme des carrés de type III	Ddl	Moyenne des carrés	D	Sig.	
Modèle corrigé	TG	3814,583 <sup>a</sup>	19,00	200,77	11,47	0,00	
	LC	701,486 <sup>b</sup>	19,00	36,92	510,37	0,00	
	LR	888,668 <sup>c</sup>	19,00	46,77	747,49	0,00	
	PSC	,005 <sup>d</sup>	19,00	0,00	536,99	0,00	
	PSR	,002 <sup>e</sup>	19,00	0,00	447,04	0,00	
	IT	62783,142 <sup>f</sup>	19,00	3304,38	984,26	0,00	
	IV	31567602,579 <sup>g</sup>	19,00	1661452,77	397,40	0,00	
	Phyto_C	47630,231 <sup>h</sup>	19,00	2506,85	464,52	0,00	
	Phyto_R	62722,192 <sup>i</sup>	19,00	3301,17	899,73	0,00	
	PFC	,360 <sup>j</sup>	19,00	0,02	602,22	0,00	
	PFR	,141 <sup>k</sup>	19,00	0,01	228,72	0,00	
	Ordonnée à l'origine	TG	490510,42	1,00	490510,42	28029,17	0,00
		LC	2350,76	1,00	2350,76	32495,93	0,00
LR		1503,90	1,00	1503,90	24034,88	0,00	
PSC		0,05	1,00	0,05	101925,97	0,00	
PSR		0,03	1,00	0,03	119710,31	0,00	
IT		109580,23	1,00	109580,23	32640,28	0,00	
IV		66860965,13	1,00	66860965,13	15992,27	0,00	
Phyto_C		138848,35	1,00	138848,35	25728,57	0,00	
Phyto_R		196345,87	1,00	196345,87	53514,09	0,00	
PFC		2,90	1,00	2,90	92222,45	0,00	
PFR		0,43	1,00	0,43	13352,03	0,00	
Var		TG	997,92	3,00	332,64	19,01	0,00
		LC	13,91	3,00	4,64	64,11	0,00
	LR	22,78	3,00	7,59	121,38	0,00	
	PSC	0,00	3,00	0,00	94,85	0,00	
	PSR	0,00	3,00	0,00	270,60	0,00	
	IT	1460,28	3,00	486,76	144,99	0,00	
	IV	91197,23	3,00	30399,08	7,27	0,00	
	Phyto_C	182,51	3,00	60,84	11,27	0,00	
	Phyto_R	1498,81	3,00	499,60	136,17	0,00	
	PFC	0,01	3,00	0,00	142,50	0,00	
	PFR	0,03	3,00	0,01	272,39	0,00	
	Dose	TG	2470,83	4,00	617,71	35,30	0,00
		LC	682,49	4,00	170,62	2358,63	0,00
LR		829,89	4,00	207,47	3315,75	0,00	
PSC		0,00	4,00	0,00	2326,39	0,00	

	PSR	0,00	4,00	0,00	1722,76	0,00
	IT	59566,70	4,00	14891,68	4435,73	0,00
	IV	31074063,19	4,00	7768515,80	1858,13	0,00
	Phyto_C	47091,75	4,00	11772,94	2181,52	0,00
	Phyto_R	59455,36	4,00	14863,84	4051,14	0,00
	PFC	0,33	4,00	0,08	2639,75	0,00
	PFR	0,09	4,00	0,02	701,38	0,00
Var * Dose	TG	345,83	12,00	28,82	1,65	<u>0,12</u>
	LC	5,08	12,00	0,42	5,85	0,00
	LR	36,00	12,00	3,00	47,94	0,00
	PSC	0,00	12,00	0,00	51,06	0,00
	PSR	0,00	12,00	0,00	65,91	0,00
	IT	1756,16	12,00	146,35	43,59	0,00
	IV	402342,16	12,00	33528,51	8,02	0,00
	Phyto_C	355,97	12,00	29,66	5,50	0,00
	Phyto_R	1768,01	12,00	147,33	40,16	0,00
	PFC	0,01	12,00	0,00	37,98	0,00
	PFR	0,02	12,00	0,00	60,24	0,00
Erreur	TG	700,00	40,00	17,50		
	LC	2,89	40,00	0,07		
	LR	2,50	40,00	0,06		
	PSC	0,00	40,00	0,00		
	PSR	0,00	40,00	0,00		
	IT	134,29	40,00	3,36		
	IV	167233,21	40,00	4180,83		
	Phyto_C	215,87	40,00	5,40		
	Phyto_R	146,76	40,00	3,67		
	PFC	0,00	40,00	0,00		
	PFR	0,00	40,00	0,00		
Total	TG	495025,00	60,00			
	LC	3055,13	60,00			
	LR	2395,07	60,00			
	PSC	0,06	60,00			
	PSR	0,03	60,00			
	IT	172497,66	60,00			
	IV	98595800,91	60,00			
	Phyto_C	186694,45	60,00			
	Phyto_R	259214,82	60,00			
	PFC	3,26	60,00			
	PFR	0,58	60,00			
Total corrigé	TG	4514,58	59,00			
	LC	704,38	59,00			
	LR	891,17	59,00			
	PSC	0,01	59,00			
	PSR	0,00	59,00			
	IT	62917,43	59,00			

IV	31734835,79	59,00		
Phyto_C	47846,10	59,00		
Phyto_R	62868,95	59,00		
PFC	0,36	59,00		
PFR	0,14	59,00		

**Tableau 2 :**

Source		Somme des carrés de type III	ddl	Moyenne des carrés	D	Sig.
Modèle corrigé	Poid sec des racines	,034 <sup>a</sup>	19,00	0,00	980,64	0,00
	Poid frais des tiges	4,762 <sup>b</sup>	19,00	0,25	171,79	0,00
	Poid frais des racines	,467 <sup>c</sup>	19,00	0,02	1312,58	0,00
	Poid sec des tiges	,135 <sup>d</sup>	19,00	0,01	59,29	0,00
	Proline	,282 <sup>e</sup>	19,00	0,01	435,09	0,00
	Sucres solubles	2,770 <sup>f</sup>	19,00	0,15	207,83	0,00
	CH a	515,647 <sup>g</sup>	19,00	27,14	203,10	0,00
	CH b	319,247 <sup>h</sup>	19,00	16,80	126,49	0,00
	CH c	70,459 <sup>i</sup>	19,00	3,71	281,33	0,00
Ordonnée à l'origine	Poid sec des racines	0,06	1,00	0,06	31428,41	0,00
	Poid frais des tiges	14,02	1,00	14,02	9611,02	0,00
	Poid frais des racines	1,06	1,00	1,06	56624,25	0,00
	Poid sec des tiges	0,35	1,00	0,35	2894,62	0,00
	Proline	0,69	1,00	0,69	20387,70	0,00
	Sucres solubles	87,23	1,00	87,23	124369,45	0,00
	CH a	12950,41	1,00	12950,41	96916,07	0,00
	CH b	6752,37	1,00	6752,37	50833,15	0,00
	CH c	156,36	1,00	156,36	11862,26	0,00
Var	Poid sec des racines	0,00	3,00	0,00	510,84	0,00
	Poid frais des tiges	0,13	3,00	0,04	29,65	0,00
	Poid frais des racines	0,00	3,00	0,00	83,74	0,00
	Poid sec des tiges	0,01	3,00	0,00	25,78	0,00
	Proline	0,11	3,00	0,04	1074,30	0,00
	Sucres solubles	1,25	3,00	0,42	594,82	0,00
	CH a	21,07	3,00	7,02	52,55	0,00
	CH b	8,93	3,00	2,98	22,40	0,00

Dose	CH c	2,56	3,00	0,85	64,65	0,00
	Poid sec des racines	0,03	4,00	0,01	3977,48	0,00
	Poid frais des tiges	4,38	4,00	1,10	751,14	0,00
	Poid frais des racines	0,43	4,00	0,11	5701,17	0,00
	Poid sec des tiges	0,12	4,00	0,03	256,55	0,00
	Proline	0,07	4,00	0,02	542,83	0,00
	Sucres solubles	1,05	4,00	0,26	374,41	0,00
	CH a	370,08	4,00	92,52	692,39	0,00
	CH b	217,95	4,00	54,49	410,19	0,00
	CH c	40,65	4,00	10,16	770,90	0,00
Var * Dose	Poid sec des racines	0,00	12,00	0,00	99,15	0,00
	Poid frais des tiges	0,25	12,00	0,02	14,20	0,00
	Poid frais des racines	0,04	12,00	0,00	156,93	0,00
	Poid sec des tiges	0,00	12,00	0,00	1,92	0,06
	Proline	0,10	12,00	0,01	239,37	0,00
	Sucres solubles	0,47	12,00	0,04	55,56	0,00
	CH a	124,50	12,00	10,38	77,64	0,00
	CH b	92,37	12,00	7,70	57,95	0,00
	CH c	27,26	12,00	2,27	172,30	0,00
Erreur	Poid sec des racines	0,00	40,00	0,00		
	Poid frais des tiges	0,06	40,00	0,00		
	Poid frais des racines	0,00	40,00	0,00		
	Poid sec des tiges	0,00	40,00	0,00		
	Proline	0,00	40,00	0,00		
	Sucres solubles	0,03	40,00	0,00		
	CH a	5,35	40,00	0,13		
	CH b	5,31	40,00	0,13		
	CH c	0,53	40,00	0,01		
	Total	Poid sec des racines	0,09	60,00		
Poid frais des tiges		18,84	60,00			
Poid frais des racines		1,53	60,00			
Poid sec des tiges		0,49	60,00			
Proline		0,98	60,00			
Sucres solubles		90,03	60,00			

	CH a	13471,40	60,00		
	CH b	7076,93	60,00		
	CH c	227,35	60,00		
Total corrigé	Poid sec des racines	0,03	59,00		
	Poid frais des tiges	4,82	59,00		
	Poid frais des racines	0,47	59,00		
	Poid sec des tiges	0,14	59,00		
	Proline	0,28	59,00		
	Sucres solubles	2,80	59,00		
	CH a	520,99	59,00		
	CH b	324,56	59,00		
	CH c	70,99	59,00		

**Tableau 3 :**

**Tests des effets inter-sujets**

Variable dépendante: concentration

Source	Somme des carrés de type III	ddl	Moyenne des carrés	D	Sig.
Modèle corrigé	,395 <sup>a</sup>	9	,044	215,632	,000
Ordonnée à l'origine	1,047	1	1,047	5142,581	,000
var	,056	1	,056	276,216	,000
dose	,300	4	,075	367,717	,000
var * dose	,039	4	,010	48,402	,000
Erreur	,004	20	,000		
Total	1,446	30			
Total corrigé	,399	29			

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Adeniji, B.A ; Budimir-Hussey, M.T ; Macfie, S.M ;2010 :Production of organic acids and adsorption of Cd on roots of durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. durum). *Acta Physiol. Plant.* 32, 1063-1072.
2. Adriano D.C., 2001. Trace elements in the Terrestrial Environments. Biogeochemistry, bioavailability and risks of metals (2nd Ed). Springer Verlag, New York, 866 p.
3. Ahsan, N., D.G. Lee, S.H. Lee, K.Y. Kang, J.J. Lee, P.J. Kim, H.S. Yoon, J.S. Kim and B.H.Lee, 2007. Excess copper induced physiological and proteomic changes in germinating rice seeds. *Chemosphere*, 67: 1182-1193
4. Alloway, B. J. (1995). Cadmium. In Alloway, B. J., éditeur : Heavy metals in soils, pages 122–151. Blackie Academic & Professional, Glasgow, second édition.
5. Alloway, B.J et Ayres, D.C, 1997: Chemicalprincipales of environmental pollution. Alvarez Academic and Profesional, an imprint of Chapman and Hall, London , 394.
6. Amirjani M.R; 2012: Effects of Cadmium on Wheat Growth and Some Physiological Factors. *Int. J. Forest, Soil and Erosion*, 2 (1): 50-58.
7. Aoun M., (2009) : Action du cadmium sur les plants de moutarde indienne *Brassica juncea*. Thèse de Doctorat. Université de Bretagne Occidentale,135 p.
8. Arduini, A. Masoni, M. Mariotti, S. Pampana, L. Ercoli ; (2014): Cadmium uptake and translocation in durum wheat varieties differing in grain-Cd accumulation. *Plant Soil Environ. Vol. 60 No. 1: 43–49*
9. Armand,B et Germain,M ; «Le blé, éléments fondamentaux et transformation», Ed, Lava, Saint-foy : les presses de l'université,(1992), 27-76.

10. Auriou, P ; «L'amélioration de blé», Ann de INA, Tunisie n°40,V 05,(1967),29-31.
11. Baize D. and Sterckeman T., 2001: Of the necessity of knowledge of the natural pedogeochemical background content in the evaluation of the contamination of soils by traces elements. *Sci. Tot. Environ.* 264: 127-139.
12. Baker A.J.M., Walker P.L., 1989. Physiological responses of plants to heavy metals and the quantification of tolerance and toxicity. *Chem. Speciation Bioavail.*, 1: 7-17.
13. Balsberg Pålsson, A.-M. (1989). Toxicity of heavy metals (zn, cu, cd, pb) to vascular plants. *Water, Air, & Soil Pollution*, 47:287–319.
14. 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
15. Bargagli R., 1998. Trace elements in terrestrial plants. An ecophysiological approach to biomonitoring and biorecovery. Springer Verlag, New York, 324p.
16. Bartosz G., 1997. Oxidative stress in plants. *Acta Physiologiae Plantarum* 19: 47- 64.
17. Baryla A., Carrier P., Franck F., Coulomb C., Sahut C. et Havaux M. 2001 : Leaf chlorosis in oilseed rape plants (*Brassica napus*) grown on cadmium-polluted soil : causes and consequences for photosynthesis and growth. *Planta* 212: 696-709.
18. Belaid,D ; «Aspect de la céréaliculture algérienne», Ed OPU, Alger,(1986),126p.
19. Belaid,D; «Evolution du désherbage chimique des céréales, Critères de choix d'un traitement herbicide», Seminaire protection des végétaux, INA El harach, (1987), 20p. Moule,C ; «Les céréales», Ed ,Maison rustique, Paris,(1980),318p.
20. Benavides MP, Gallego SM, Tomaro ML (2005) Cadmium toxicity in plants. *Braz J Plant Physiol* 17: 21-34

21. Bliefert C. and Perraud R, (2001) Chimie de l'environnement. Air, eau, sols, déchets. De Boeck Université, Paris, Bruxelles, 1<sup>re</sup> edition.
22. Bolwell, G. P., Bindschedler, L. V., Blee, K. A., Butt, V. S., Davies, D. R., Gerdner, S. L., Gerrish, C., Minibayeva, F. (2002) The apoplastic oxidative burst in response to biotic stress in plants: a three-component system. *J. Exp. Bot.* 53,1367-1376
23. Bonjean, A et Picard, E ; «Les céréales à paille, origine, histoire, économie et sélection» Ed Soft word, groupe ITM, (1990), 29-40.
24. Bonjean, A ; «Histoire de la culture des céréales et en particulier celle du blé tendre (*Triticum aestivum* L)», Eds, Le Perches, Guy P et Fraval A, Agriculture et biodiversité des plantes, Dossier de l'environnement de l'INRA, n°21(2001), 29-37.
25. Boulilan Zoghalmi L., Djebali W., Chaïbi W., Ghorbel M.H. (2006) Modifications physiologiques et structurales induites par l'interaction cadmium-calcium chez la tomate (*Lycopersicon esculentum*). *C.R. Biologies* 329:702-71102-711.
26. Bourrelier P.H., Berthelin J. (1998) Contamination des sols par les éléments en trace : les risques et leur gestion. Paris: Tec & Doc Lavoisier. 42, 440p.
27. Boyd, R.S., 1998. Hyperaccumulation as a plant defensive strategy. In: Brooks, R.R. (Ed.). *Plants that hyperaccumulate heavy metals*. CABI Publishing, Wallingford, pp. 181-200.
28. Briat J.F., Lebrun M., 1999. Plant responses to metal toxicity. *C.R. Acad. Sci.*, 322: 43-54.
29. Brignon J.M. et Malherbe L., 2005. Cadmium et ses dérivés. INERIS – Données technicoéconomiques sur les substances chimiques en France, Verneuil en Halatte, 25 p.

30. Cataldo DA, McFadden KM, Garland TR, Wildung RE (1988) Organic constituents and complexation of nickel(II), iron(III), cadmium(II) and potassium (IV) in soybean xylem exsudates. *Plant Physiol* 86: 734-739
31. Chaffei C, Pageau K, Suzuki A, Gouia H, Ghorbel MH, Masclaux-Daubresse C (2004) Cadmium toxicity induced changes in nitrogen management in *Lycopersicon esculentum* leading to a metabolic safeguard through an amino acid storage strategy. *Plant Cell Physiol* 45: 1681-1693
32. Chaignon V, 2001 : Biodisponibilité du cuivre dans la rhizosphère de différentes plantes cultivées. Cas de sols viticoles contaminés par des fongicides. Thèse de Doctorat. Université d'Aix-Marseille.
33. Chaudri, A. M., Zhao, F. J., McGrath, S. P. et Crosland, A. R. (1995). The cadmium content of british wheat grain. *Journal of Environmental Quality*, 24:850–855.
34. Cho UH, Seo NH (2005) Oxidative stress in *Arabidopsis thaliana* exposed to cadmium is due to hydrogen peroxide accumulation. *Plant Sci* 168: 113-120
35. Christensen, T. H. (1984). Cadmium soil sorption at low concentrations: I. Effect of time, cadmium load, pH, and calcium. *Water, Air, and Soil Pollution*, 21:105–114.
36. Chugh LK Gupta VK Sawhney SK (1992) Effect of cadmium on enzymes of nitrogen metabolism in pea seedlings. *Phytochemistry* 31: 395-400
37. Ci, D; Jiang, D; Wollenweber, B; Dai, T; Jing, Q; Cao, W ; (2010a) : Cadmium stress in wheat seedlings : growth, cadmium accumulation and photosynthesis . *Acta Physiol. Plant* . 32, 365-373.
38. Clemens S (2006) Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants. *Biochimie* 88: 1707-1719
39. Clemens S., Antosiewicz D.M., Ward J.M., Schachtman D.P., 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 : 12043-12048.

40. Clemens, S. (2001). Molecular mechanisms of plant metal tolerance and homeostasis. *Planta*, 212:475–486.
41. Cobbett C.S. (2000). Phytochelatins and their roles in heavy metal detoxification. *Plant Physiology* 123 :825-32.
42. 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.
43. Cosio, C., Vollenweider, P., 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. *Environ. Exp. Bot.* 58. 64-74
44. 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.
45. Costa G, Morel JL (1994b) Water relation, gaz exchange and amino acid content in Cd-treated lettuce. *J Plant Physiol Biochem* 32: 561-570
46. Costa G., Spitz E. (1997) Influence of cadmium on soluble carbohydrate, free amino acids, protein content of *in vitro* cultured *Lupinus albus*. *Plant Sci.* 128: 131-140.
47. Coullery P (1997). Comportement de métaux lourds en agrosystèmes tempérés à faible taux de pollution. Thèse de Doctorat. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne.
48. Dafré AL, Sies H, Akerboom T (1996) Protein S-thiolation and regulation of microsomal glutathione transferase activity by the glutathione redox couple. *Arch Biochem Biophys* 332: 288-294
49. 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

50. 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
51. Dahmani-muller, H., Van Oort, F., Gelie, B., Balabane, M., 1999. Strategies of heavy metal uptake by three plant species growing near a metal smelter. *Environmental Pollution* 109, 1-8.
52. DalCorso G., Farinati S., Maistri S., Furini A. (2008) How plants cope with cadmium: staking all on metabolism and gene expression. *J Integr Plant Biol* 50: 1268-1280.
53. DalCorso G., Manara A., Furini A. 2013: An over view of heavy metal challenge in plants: from roots to shoots, *Metallomics* 5, 1117-1132.
54. DalCorso, G., Farinati, S., Maistri, S. et Furini, A. (2008). How plants cope with cadmium: Staking all on metabolism and gene expression. *Journal of Integrative Plant Biology*, 50(10): 1268–1280.
55. Das P., Samantaray S. et Rout G.R., 1997: Studies on cadmium toxicity in plants: A review *Environ. Pollut.* 98 : 29-36.
56. Datta J.K., Bandhyopadhyay A., Banerjee A and Mondal N.K., 2011: Phytotoxic effect of chromium on the germination, seedling growth of some wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars under laboratory condition, *Journal of Agricultural Technology*, 7(2), 395-402
57. Deneux-Mustin, S., Roussel-Debet, S., Mustin, C., Henner, P., Munier-Lamy, C., Colle, C., Berthelin, J., Garnier-Laplace, J., Leyval, C., (2003) Mobilité et transfert racinaire des éléments en traces: influence des micro-organismes du sol. Tec & Doc. - Lavoisier, Paris
58. Denis Baize. Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France). Références et stratégies d'interprétation. Un point sur... INRA Éditions, Paris, 1997. Présente les résultats du programme ASPITET.

59. Deyala M, N; (2016): Enzymatic Status of Germinating Wheat Grains under Heavy Metals Stress. *Inter.J.A.P .Sci. Agriculture (IJAPSA) vol 02, Issue 08, 61-69.*
60. Di Cagno R., Guidi L., Stefani A., et Soldatini G.F., 1999: Effects of cadmium on growth of *Helianthus annuus* seedlings: physiological aspects. *New Phytol.*, 144 : 65-71.
61. Dietz KJ, Baier M, Krämer U (1999) Free radical and reactive oxygen species as mediators of heavy metals toxicity in plants. In: Prasad MNV, Hagemeyer J, eds. Heavy metal stress in plants: from molecules to ecosystems. Berlin: Springer-Verlag, pp: 73-97.
62. Djebali W., Zarrouk M., Brouquisse R., El Kahoui S., Limam F., Ghorbel M.H., Chaibi W. (2005): Ultrastructure and lipid alterations induced by cadmium in tomato (*Lycopersicon esculentum*) chloroplast membranes. *Plant Biol (Stuttg)* 7: 358-368.
63. Doke, N. (1997). The oxidative burst: role in signal transduction and plant stress. In: Scandalios JG, ed. Oxidative stress and the molecular biology of antioxidant defenses. Cold Spring Harbour: Cold Spring Harbour Laboratory Press, 785-813.
64. Dubois M., Gillet K.A. (1965): Dosage des sucres totaux à l'ortho-toluidine, *J. Agr.Food Chem.* 13: 137
65. Ebbs S., Uchil S. (2008): Cadmium and zinc induced chlorosis in Indian mustard [*Brassica juncea*(L.) Czern] involves preferential loss of chlorophyll b. *Photosynthetica* 46: 49-55.
66. Ehab M.R. Metwali, Salah M.H. Gawayed, Omar A. Al-Maghrabi and Yahia Y. Mosleh: Evaluation of Toxic Effect of Copper and Cadmium on Growth, Physiological Traits and Protein Profile of Wheat ( *Triticum aestivum*.L), Maize ( *Zea mays*.L) and Sorghum ( *Sorghum bicolor*. L). *World Appl. Sci. J.*, 21 (3): 301-314

67. Ekmekci Y., Tanyolac D., Ayhana B. (2008): Effects of cadmium on antioxidant enzyme and photosynthetic activities in leaves of two maize cultivars. *J Plant Physiol* 165: 600–611.
68. Ernst W.H.O., Verkleij J.A.C., Schat H., 1992. Metal tolerance in plants. *Acta Bot. Neerl.*, 41: 229-248.
69. Fediuc E, Lips SH, Erdei L (2005) O-acetylserine (thiol) lyase activity in *Phragmites* and *Typha* plants under cadmium and NaCl stress conditions and the involvement of ABA in the stress response. *J Plant Physiol* 162: 865-872
70. Feillet, P; « Le grain de blé : composition et utilisation » ed INRA, Paris, (2000), 308p
71. Florijn PJ, Nelemans JA, Van Beusichem ML (1991) Cadmium uptake by lettuce varieties. *Neth J Agric Sci* 39: 103-114
72. Florijn PJ, Van Beusichem ML (1993) Uptake and Distribution of Cadmium in Maize Inbred Lines. *Plant Soil* 150: 25-32
73. Fodor F., 2002: Physiological responses of vascular plants to heavy metals. In : *Physiology and Biochemistry of Metal Toxicity and Tolerance in Plants*, Prasad M.N.V. et Strzalka K. eds, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, pp. 149-177.
74. Francis et al (1970): Copper enzymes in isolated chloroplasts. *Plant Physiol*, 24 1-15
75. Ghnaya T, Nouairi I, Slama I, Messedi D, Grignon C, Abdely C, Ghorbel MH. 2005. Cadmium effects on growth and mineral nutrition of two halophytes: *Sesuvium portulacastrum* and *Mesembryanthemum crystallinum*, *Journal of Plant Physiology* 162, 1133-1140.
76. Ghnaya T., Slama I., Messedi D., Grignon C., Ghorbel M.H., Abdely C. (2007) Cd-induced growth reduction in the halophyte *Sesuvium portulacastrum* is significantly improved by NaCl. *J Plant Res* 120: 309-316.

77. Girling, C. et Peterson, P. (1981). The significance of the cadmium species in uptake and metabolism of cadmium in crop plants. *Journal of Plant Nutrition*, 3(1-4):707–720.
78. 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: 22-27
79. Goldsbrough P (2000) Metal tolerance in plants: the role of phytochelatin and metallothioneins. In: Terry N, Banuelos G, eds. *Phytoremediation of contaminated soil and water*. CRC Press LLC, pp: 221-233
80. Greger M, 2004. Metal availability, uptake, transport and accumulation in plants. In: *Heavy metal stress in plants: From molecules to ecosystems (2<sup>nd</sup> Ed.)*, Prasad M.N.V., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 1-27.
81. Guo TR, Zhang GP, Zhou MX, Wu FB, Chen JX (2007) Influence of aluminum and cadmium stresses on mineral nutrition and root exudates in two barley cultivars. *Pedosphere* 17: 505-512
82. Guo,H ; Tian, R; Zhou, H; Pei, D; Wang, X; (2012): Combined cadmium and elevated ozone affect concentrations of cadmium and antioxidant systems in wheat under fully open-air conditions. *J. Hazard. Mater.* 209, 27-33.
83. Haag-Kerwer A., Schäfer H.J., Heiss S., Walter C. et Rausch T., 1999 : Cadmium exposure in *Brassica juncea* causes a decline in transpiration rate and leaf expansion without effect on photosynthesis. *J. Exp. Bot.* 50 : 1827-1835.
84. Hall J.L., 2002. Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance. *J. Exp. Bot.*, 366: 1-11.
85. Hall J.L., Williams L.E. (2003). Transition metal transporters in plants. *Journal of Experimental Botany* 54 : 2601-2613.
86. Harada E., Yamaguchi Y., Koizumi N., Sano H. (2002). Cadmium stress induces production of thiol compounds and transcripts for enzymes involved in

sulfur assimilation pathways in Arabidopsis. Journal of Plant Physiology. 159 : 445-448.

87. Hardiman RT, Jacoby B (1984) Absorption and translocation of Cd in bush beans (*Phaseolus vulgaris*). *Physiol Plant* 61: 670- 674
88. Harris, N. et Taylor, G. (2004). Cadmium uptake and translocation in seedlings of near isogenic lines of durum wheat that differ in grain cadmium accumulation. *BMC Plant Biology*, 4(1):4.
89. 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.
90. Hasenstein KH, Evans ML, Stinemetz CL, Moore R, Fondren WM, Koon EC, Higby MA, Smucker (1988) Comparative effectiveness of metal ions in inducing curvature of primary roots of *Zea mays*. *Plant Physiol* 86: 885-889
91. He Z.L., Yang X.E., Stoffella P.J. (2005) Trace elements in agroecosystems and impacts on the environment. *J Trace Elem Med Biol* 19: 125-140
92. Herve,S ; Pierre,C et Xavier,L ; «Produire des céréales à paille», Tec et Doc,Ed, Lavoisier,(1989), 333p.
93. Hsu YT, Kao CH (2004) Cadmium toxicity is reduced by nitric oxide in rice leaves. *Plant Growth Regul* 42: 227-238
94. International Cadmium Association's website, 2009. Cadmium. Disponible sur Internet : [www.cadmium.org](http://www.cadmium.org)
95. Iqbal M.Z. and Rahmati K., 1992: Tolerance of Albizia lebeck to Cu and Fe application, *Ekologia (CSFR)*, 11, 427-430.
96. ITGC (2006): Guide des principales variétés de de céréales à paille en Algérie (blé dur blé tendre, orge et avoine), éd't Institut Technique de Grandes Cultures (ITGC).

97. Juste C., Chassin P., Gomez A., Linères M. et Mocquot B., 1995 : Les micro-polluants métalliques dans les boues résiduares des stations d'épuration urbaines. Convention Ademe / I.N.R.A. (contrat INRA n° 22/92.039-contrat Ademe n° 2750007).
98. Kabata-Pendias, A et Pendias, H ; 2001 : Trace elements in soil and plants. 3rd CRC Press, Boca Raton, London, New-York, Washington D.C.
99. Kim CG, Bell JNB, Power SA (2003) Effects of soil cadmium on *Pinus sylvestris* L. seedling. *Plant Soil* 257: 443-449
100. Kim Y.Y., Yang Y.Y., Lee Y. (2002) Pb and Cd uptake in rice roots. *PhysiolPlant* 116: 368-372.
101. Korshunova, Y. O., Eide, D., Gregg Clark, W., Lou Guerinot, M. et Pakrasi, H. B. (1999).
102. Krebs, R., Gupta, S. K., Furrer, G.& Schulin, R. (1998) Solubility and plant uptake of metals with and without liming of sludge-amended soils. *Journal of Environmental Quality*, 27 (1): 18-23.
103. Krupa Z. et Baszynski T., 1995: Some aspects of heavy metal toxicity towards photosynthetic apparatus – direct and indirect effects on light and dark reactions. *Acta Physiol. Plant.*, 17: 177-190.
104. Kuboi T, Noguchi A, Yazaki J (1986) Family-dependent cadmium accumulation characteristics in higher plants. *Plant Soil* 92: 405-415.
105. Labbe M, 2004: Ces étonnantes graines germées. Auvers sur oise : Labbé. *Revue succinctes de livres et d'essais (critiques)*
106. Lagriffoul A., Mocquot B., Mench M. et Vangronsveld J., 1998: Cadmium toxicity effects on growth, mineral and chlorophyll contents, and activities of stress related enzymes in young maize plants (*Zea mays* L.). *Plant Soil* 200: 241-250.
107. Laperche, M. C. Dictor, B. Clozel-Leloup, and Ph. Baranger. Guide méthodologique du plomb, appliqué à la gestion des sites et sols pollués.

BRGM/RP-52881-FR, juin 2004. Étude réalisée dans le cadre des actions de Service public du BRGM 2003-POLA06.

108. Larbi A., Morales F., Abadía A., Gogorcena R., Lucena J., Abadía J. (2002) Effects of Cd and Pb in sugar beet plants grown in nutrient solution: induced Fe deficiency and growth inhibition. *Funct Plant Biol.* 29: 1453-1464.
109. Larsson E.H., Bornman J.F. et Asp H., 1998: Influence of UV-radiation and Cd<sup>2+</sup> on chlorophyll fluorescence, growth and nutrient content in *Brassica napus*. *J. Exp. Bot.* 323: 1031-1039.
110. Lefèvre, G., Beljean-Leymarie, M., Beyerle, F., Bonnefont-Rousselot, D., Cristol, J.-P., Thérond, P., Torreilles, J. (1998) Evaluation de la peroxydation lipidique par le dosage des substances réagissant avec l'acide thiobarbiturique. *Annales de Biologie Clinique* 56 (3) ; 305- 319.
111. Li et al, 1997 Li YM, Chaney RL, Schneiter AA, Miller JF, Elias EM, Hammond JJ (1997a) Screening for low grain cadmium phenotypes in sunflower, durum wheat and flax. *Euphytica* 94: 23-30
112. Liu, K ; Lv, J ; He, W; Zhang, H; Cao, Y; Dai, Y ;(2015a) : Major factors influencing calcium uptake from the soil into wheat plants. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 113, 207-213.
113. Lozano-Rodriguez E, Hernandez LE, Bonay P, CarpenaRuiz RO (1997) Distribution of cadmium in shoot and root tissues of maize and pea plants: Physiological disturbances. *J Exp Bot* 48: 123-128
114. MacRobbie EA, Kurup S (2007) Signalling mechanisms in the regulation of vacuolar ion release in guard cells. *New Phytol* 175: 630-640
115. Maksymiec, W. (2007) Signaling responses in plants to heavy metals. *Acta Physiol. Plant* 29; 177-187.
116. Martin M. Z., Labbé N., T. Rials G., and Wullschlegel S. D (2005) Analysis of preservative-treated wood by multivariate analysis of laser-induced breakdown spectroscopy spectra. *Spectrochim. Acta Part B*, 60:1179–1185.

117. Martínez Dominguez D, Cordoba Garcia F, Canalejo Raya A, Torronteras Santiago R (2010) Cadmium-induced oxidative stress and the response of the antioxidative defense system in *Spartina densiflora*. *Physiol Plant*.
118. Martin-Garin, 2000 : Méthodologie d'étude et modélisation du transport d'éléments traces dans les aquifères. Application à la migration du cadmium dans un milieu saturé riche en calcite. Thèse de doctorat, Université Grenoble I.
119. McBride, MB 1980; Chemisorption of Cd on calcite surfaces. *Soil Sci Soc AmJ*. 44(1): 26- 33.
120. 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: 1483-1495.
121. Mench, M., Baize, D., Denaix, L., Sappin-Didier, V. et Sterckeman, T. (2001). Exposition de végétaux aux éléments traces via la solution du sol : diagnostic de contamination des récoltes, diagnostic de danger, pratiques agricoles pour prévenir ou assainir. In Th'évenet, G. et Joubert, A., éditeurs : 5emes Rencontres de la Fertilisation Raisonnée et de l'Analyse de Terre. Les nouveaux Défis de la Fertilisation Raisonnée., pages 317–331, Blois. GEMAS et COMIFER.
122. Metwally A, Finkemeier I, Georgi M, Dietz KJ (2003) Salicylic acid alleviates the cadmium toxicity in barley seedlings. *Plant Physiol* 132: 272-281.
123. Meyer S., Reed C., Bosdeveix R., 2004- Botanique (Biologie et physiologie végétales). *Ed: Maloine*. 56/461.
124. Milone MT, Sgherri C, Clijsters H, Navari- Izzo F (2003) Antioxidative responses of wheat treated with realistic concentration of cadmium. *Environ Exp Bot* 50: 265-276.
125. Mishra S., Tripathi R.D., Srivastava S., Dwivedi S., Trivedi P. K., Dhankher O.P., Khare A. (2009). Thiol metabolism play significant role during cadmium

detoxification by *Ceratophyllum demersum* L. *Bioresource Technology* 100: 2155-2161.

126. Mishra, S., Srivastava, S., Tripathi, R. D., Govindarajan, R., Kuriakose, S. V., Prasad, M. N.V. (2006) Phytochelatin synthesis and response of antioxidants during cadmium stress in *Bacopa monnieri* L. *Plant Physiol. Bioch.* 44; 25-37.
127. Mobin M, Khan NA (2007): Photosynthetic activity, pigment composition and antioxidative response of two mustard (*Brassica juncea*) cultivars differing in photosynthetic capacity subjected to cadmium stress. *J Plant Physiol* 164: 601-610
128. Monneveux, Ph. & Nemmar, M. (1986) : Contribution à l'étude de la résistance à la sécheresse chez le blé tendre (*Triticum aestivum* L.) et chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.): Etude de l'accumulation de la proline au cours du cycle de développement. *Agronomie*, 6 (6), pp. 583-590.
129. Mortvedt J.J., Beaton J.D. (1995) Heavy metal and radionuclide contaminants in phosphate fertilizers. In: Tiessen H, editor. Phosphorus in the global environment: transfer, cycles and management. New York: Wiley p 93-106.
130. Moule, C ; « Phytotechnie spéciale céréale tome II », Ed Maison rustique, Paris (1971), 46p.
131. Moustakas M., Lanaras, T., Symeonidis, L., Karataglis, S., (1997): Growth and some photosynthetic characteristics of field grown *Avena sativa* under copper and lead stress. *Photosynthetica* 30: 389-396.
132. Mujahid F; Muhammad B. S; Sana E; Shafaqat A; Muhammad Z and Muhammad A. H; (2013): Morphological, physiological and biochemical responses of different plant species to Cd stress. 3,53-60.
133. Mysliwa-Kurdziel B. et Strzalka K., 2002: Influence of metals on biosynthesis of photosynthetic pigments. In : *Physiology and Biochemistry of*

- Metal Toxicity and Tolerance in Plants, Prasad M.N.V. et Strzalka K. (eds), Kluwer Academic Publishers, Netherlands, pp. 201-227.
134. Mysliwa-Kurdziel B., Prasad M.N.V. et Strzalka K. 2002 : Heavy metal influence on the light phase of photosynthesis. In : Physiology and Biochemistry of Metal Toxicity and Tolerance in Plants, Prasad M.N.V. et Strzalka K. (eds), Kluwer Academic Publishers, Netherlands, pp. 229-255.
135. N'Guessan Y.M., 2008. Dynamique des éléments traces dans les eaux de surface des bassins versants agricoles de Gascogne. Thèse pour le grade de Docteur de l'Université de Toulouse en Agrosystèmes, Ecosystèmes et Environnement, délivrée par l'Institut Polytechnique de Toulouse (INPT), Toulouse, pp 10-15.
136. Naeem, A ; Saifullah, Rehman, M.Z.U; Akhtar, T; OK, Y.S; Rengel, Z; (2016): Genetic variation in cadmium accumulation and tolerance among wheat cultivars at the seedling stage. *Commun. Soil. Sci. Plant Anal.*
137. Ni T.H., Wei Y.Z. (2003). Subcellular distribution of cadmium in mining ecotype *Sedum alfredii*. *Acta Botanica Sinica* 45 : 925-928.
138. Nieboer E. et Richardson D.H.S., 1980: The replacement of the nondescript term « heavy metal » by a biologically and chemically significant classification of metal ions. *Environ.Pollut.* 1: 3-26.
139. Nocito F.F., Pirovano L., Cocucci M., Sacchi G.A. (2002). Cadmium-induced sulfate uptake in maize roots. *Plant Physiology* 129: 1872-1879.
140. Nowak. C, Mossmann. J.R and Saada. A État des connaissances sur l'atténuation naturelle : mécanismes et mise en oeuvre. BRGM/RP-51960- FR, mars 2003. Étude réalisée dans le cadre des actions de Service public du BRGM 2001-01POL-318.
141. Nriagu J. O. A global assessment of natural sources of atmospheric trace metals. *Nature*, 338 :47–49, 1989.

142. Oncel I., Keles Y., Ustun A.S., (2000): Interactive effects of temperature and heavy metal stress on the growth and some biochemical compounds in wheat seedlings. *Environ. Pollut.* 107, 315-320.
143. Padmaja K., Prasad D.D.K. et Prasad A.R.K., 1990: Inhibition of chlorophyll synthesis in *Phaseolus vulgaris* L. seedlings by cadmium acetate. *Phytosynthetica* 24 :399-405.
144. Parent C., Capelli N., Dat J.F., 2008. Formes reactives de l'oxygene, stress et mort cellulaire chez les plantes. *C.R. Biol.*, 331: 255-261. Benavides M.P., Gallego S.M. et Tomaro M.L., 2005 : Cadmium toxicity in plants. *Braz. J.Plant. Physiol.* 17 : 21-34.
145. 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.
146. 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.
147. Perfus-Barbeoch L, Leonhardt N, Vavasseur A, Forestier C 2002. Heavy metal toxicity: cadmium permeates through calcium channels and disturbs the plant water status. *Plant J* 32: 539-548.
148. Prasad.M.N.V et Hagemeyer. J (Eds.). Heavy metal stress in plants. From molecules to ecosystems. Springer. (1999) p 401.
149. Punz W.F. et Sieghardt H. 1993: The response of roots of herbaceous plant species to heavy metals. *Environ. Exp. Bot.* 33: 85-98.
150. 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

151. Remon, E., (2006) Tolérance et accumulation des métaux lourds par la végétation spontanée des friches métallurgiques: vers de nouvelles méthodes de biodépollution. Thèse. Université Jean Monnet Faculté des Sciences et Techniques.
152. Rengel Z, 1999: Heavy metals as essential nutrients. *In* M.N.V. Prasad and J. Hagemeyer (ed.) Heavy metal stress in plants: From molecules to ecosystems. Springer, Berlin. pp. 231–252
153. Rentel, M., Knight, M.R. (2004) Oxidative stress-induced calcium signaling in *Arabidopsis*. *Plant Physiol.* 135; 1471-1479.
154. Riaz, S ; Iqbal, M ; Hussain, I ; Rasheed, R ; Ashraf, M.A; Mahmood, S; Younis, M; Iqbal, M.Z; (2014): Chronic cadmium induced oxidative stress not the DNA fragmentation modulates growth in spring wheat (*Triticum aestivum*). *Int.J.Agric.Biol.* 16, 789-794.
155. Rizwan, M ; Meunier, J.D; Davidian, J.C ; Pokrovsky, O.S ; Bovet, N ; Keller, C; (2016b): Silicon alleviates Cd stress of wheat seedlings ( *Triticum turgidum* L. cv. Claudio) grown in hydroponics. *Environ. Sci. pollut. Res.* 23, 1414-1427.
156. Robert M., Juste C. (1998) Stocks flux d'éléments traces dans les sols du territoire In Epanchage des boues d'épuration urbaines: aspects sanitaires environnementaux. Actes définitifs des journées techniques ADEME. 5 et 6 juin 1997 Paris, 320p.
157. 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
158. Roth U, von Roepenack-Lahaye E., Clemens S. (2006). Proteome changes in *Arabidopsis thaliana* roots upon exposure to Cd<sup>2+</sup>. *Journal of Experimental Botany* 57 (15): 4003-4013.
159. Roussel,P et Chiron,H ; «Les pain français, évolution, qualité, production», Ed, Maé-Erti, Paris, (2003), 433p.

160. Sakulkoo N., Akaracharanya A., Chareonpornwattana S., Leepipatpiboon N., Nakamura T., Yamaguchi Y., Shinmyo A., Sano H. (2005). Hyper-assimilation of sulfate and tolerance to sulfide and cadmium in transgenic water spinach expressing an *Arabidopsis* adenosine phosphosulfate reductase. *Plant Biotechnology* 22: 27-32.
161. Salt, D.E., Prince, R.C., Pickering, I.J., Raskin, I., 1995. Mechanisms of cadmium mobility and accumulation in Indian mustard. *Plant Physiology* 109, 1427-1433.
162. Sandalio LM, Dalurzo HC, Gomez M, Romero-Puertas MC, del Rio LA (2001) Cadmium-induced changes in the growth and oxidative metabolism of pea plants. *J Exp Bot* 52: 2115-2126
163. Sandrine Gombert et al. Pollution atmosphérique par les métaux – Biosurveillance des retombées. EDP Sciences/ADEME Éditions, 2005. Rapport de la campagne française de mesure des métaux dans les mousses réalisée en 2000.
164. Sanita di Toppi L, Gabbrielli R, 1999. Response to cadmium in higher plants. *Environ Exp Bot* 41: 105-130.
165. Sarwar N., Malhi S.S., Zia M.H., Naeem A., Bibi S., Farid G. (2010) Role of mineral nutrition in minimizing cadmium accumulation by plants. *J Sci Food Agric* 90: 925-937.
166. Sauvé, S., Hendershot, W. et Allen, H. E. (2000). Solid-solution partitioning of metals in contaminated soils : Dependence on pH, total metal burden, and organic matter. *Environmental Science & Technology*, 34(7):1125–1131.
167. Sbartai H, Djebbar MR, Sbartai I, Berrabbah H. 2012. Bioaccumulation of cadmium and zinc in tomato (*Lycopersicon esculentum* L.), *Comptes Rendus Biologies* 335, 585-593.
168. Schützendübel, A., Schwanz, P., Teichmann T., Gross, K., Langenfeld-Heyser, R., Goldbold D. L., Polle, A. (2001) Cadmium induced changes in

- antioxidative systems, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> content and differentiation in pine (*Pinus sylvestris*) roots. *Plant Physiol.* 127; 887–892.
169. 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: 7-1
170. Senden MHMN, Van Der Meer AJGM, Verburg TG, Wolterbeek HT (1995) Citric acid in tomato plant roots and its effect on cadmium uptake and distribution. *Plant Soil* 171: 333-339.
171. Seregin, I. V., Ivanov, V. B. (2001) Physiological aspects of cadmium and lead toxic effects on higher plants. *Russ. J. Plant Physiol.* 48 (4); 606-630.
172. Serpaud, B., Al-Shukry, R., Casteignau, M. and Matejka, G., (1994) Adsorption des métaux lourds (Cu, Zn, Cd et Pb) par les sédiments superficiels d'un cours d'eau: rôle du pH, de la température et de la composition du sédiment. *Revue des Sciences de l'eau*, 7, 343-365.
173. Sharma SS, Kumar V, 2002. Responses of wild type and abscisic acid mutants of *Arabidopsis thaliana* to cadmium. *J Plant Physiol* 159: 1323-1327
174. Sigfridsson KG, Bernat G, Mamedov F, Styring S (2004) Molecular interference of Cd with Photosystem II. *Biochim Biophys Acta* 1659: 19-31
175. Singh K.P., Mohan, D., Sinha, S., Dalwani, R., (2004): Impact assessment of treated/untreated wastewater toxicants discharged by sewage treatment plants on health, agricultural and environmental quality in the wastewater disposal area. *Chemosphere* 55: 227-255.
176. Singh R, Tripathi RD, Dwivedi S, Singh M, Trivedi PK, Chakrabarty D (2010) Cadmium-induced biochemical responses of *Vallisneria spiralis*. *Protoplasma*.
177. Sobkowiak R., Deckert J., 2003. Cadmium-induced changes in growth and cell cycle gene expression in suspension-culture cells of soybean. *Plant Physiol. Biochem.*, 41: 767-772.
178. Soltner, D ; «Les grandes productions végétales, céréales, plantes sarclées, prairies», 17<sup>ième</sup> édition col, Sc et techniques agricole, (1988), 464p.

179. Sposito, G 1989 : The chemistry of soils. Oxford Univ. Press, 277 p.
180. Steffens J.C (1990). The heavy-metal binding peptides of plants. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.*, 41: 553-575.
181. Stobart A.K., Griffiths W.T., Ameen-Bukhari I. et Sherwood R.P., 1985: The effect of Cd<sup>2+</sup> on the biosynthesis of chlorophyll in leaves of barley. *Physiol. Plant.* 63: 293-298.
182. Sun Y., Zhou Q, Wang L., Liu W. (2009). Cadmium tolerance and accumulation characteristics of *Bidens pilosa* L. as a potential Cd-hyperaccumulator. *Journal of Hazardous Materials* 161: 808-814.
183. Szolnoki,Z.S.,Farsang,A.,Puskás,I.,2013.Cumulativeimpactsofhumanactivities on urbangardensoils:originandaccumulationofmetals.*Environ.Pollut.*177, 106–115.
184. Teichmann,T. (2001) The biology of wood formation: scientific challenges and biotechnological perspectives. In SG Panadalai, ed. *Recent Research Developments in Plant Physiology*. Research Signpost, Trivandrum, India; 269–284.&é
185. The irt1 protein from arabidopsis thaliana is a metal transporter with a broad substrate range. *Plant Molecular Biology*, 40:37–44.
186. Théron A., 1964- Botanique (classe de 2eM) *Ed: Bordas*.121-141/287.
187. 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.
188. Tourte Y., Bordonean M., Henry M., 2005: Le monde des végétaux, organisation, physiologie et génomique. Edition DUNOD. Paris. France.
189. Tremel-Schaub A. Feix I. Contamination des sols. Transfert des sols vers les plantes, ADEME et EDP Sciences (Editions) (2010).

190. Tyler, G. & Olsson, T. (2001) Plant uptake of major and minor mineral elements as influenced by soil acidity and liming. *Plant and Soil*, 230 (2): 307-321.
191. Van Assche F, Clijsters H (1985) Inhibition of photosynthesis by heavy metals. *Photosynth Res* 7: 31-40
192. Vazquez MD, Poschenrieder C, Barcelo J (1992) Ultrastructural effects and localization of low cadmium concentrations in bean roots. *New Phytol* 120: 215-226.
193. Verbruggen N, Hermans C, Schat H. 2009. Mechanisms to cope with arsenic or cadmium excess in plants, *Current Opinion in Plant Biology* 12, 364-372.
194. 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
195. Wagner GJ (1993) Accumulation of cadmium in crop plants and its consequences to human health. *Adv Agron* 51: 173-212
196. Wang X., Liu Y., Zeng G., Chai L., Song X., Min Z., Xiao X. (2008). Subcellular distribution and chemical forms of cadmium in *Beckmannia nivea* (L.) Gaud. *Environmental and Experimental Botany* 62 : 389-395.
197. Wei S., Zhou Q., Saha U.K., Xiao H., Hu Y., Ren L., Ping G. (2009). Identification of a Cd accumulator *Conyza canadensis*. *Journal of Hazardous Materials* 163 : 32-35.
198. Wenzel, W. W., Blum, W. E. H., Brandstetter, A., Jockwer, F., Köchl, A., Oberforster, M., Oberländer, H. E., Riedler, C., Roth, K. et Vladeva, I. (1996). Effects of soil properties and cultivar on cadmium accumulation in wheat grain. *Zeitschrift fuer Pflanzenernaehrung und Bodenkunde*, 159:609–614.

199. 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.
200. Xu J., Yin H., Liu X., Li X. (2010) Salt affects plant Cd-stress responses by modulating growth and Cd accumulation. *Planta* 231: 449-459.
201. Yang, M.G., X.Y. Lin and X.E. Yang, 1998. Impact of Cd on growth and nutrient accumulation of different plant species. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 19: 89-94.
202. Zhou WB, Qiu BS. 2005: Effects of cadmium hyperaccumulation on physiological characteristics of *Sedum alfredii Hance* (Crassulaceae), *Plant Science*, 169, 737-745.
203. Zhu YL, Pilon-Smits EAH, Jouanin L, Terry N (1999a). Over expression of Glutathione Synthetase in Indian Mustard Enhances Cadmium Accumulation and Tolerance. *Plant physiol* 119: 73-79
204. Zornoza P, Vázquez S, Esteban E, Fernández-Pascual M, Carpena R (2002) Cadmium-stress in nodulated white lupin: strategies to avoid toxicity. *Plant Physiol Biochem* 40:1003-1009
205. Zorrig W, Rouached A, Shahzad Z, Abdelly C, Davidian JC, Berthomieu P (2010) Identification of three relationships linking cadmium accumulation to cadmium tolerance and zinc and citrate accumulation in lettuce. *J Plant Physiol* 167: 1239-1247
206. Zwickert F. Etude de la contamination des légumes par le plomb. Mémoire de diplôme d'Etat de Docteur en Pharmacie, Université Louis Pasteur de Strasbourg. 1992.

# **PUBLICATION**