

République Algérienne Démocratique et populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université m'hammed bougara Boumerdes



Faculté des sciences biologiques

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de

Master II

Filière : sciences de la nature et de la vie

Spécialité :

Biodiversité et environnement

THEME

**Impact de la pollution par le cadmium sur
l'anatomie de la tige et la racine de la *cicer
arientinum L.***

Présente par : ferdjallah esma

Sakhi sabrina

Soutenu : le 15 novembre 2020

Devant le jury compose de :

Mr Hariti M M.M.A UMBB

UMBB

Président

Mme Benhabiles K

UMBB

Promoteur

Mr Bellot Y M.C.

BUMBB

Examineur

Année universitaire : 2019-2020

Remerciements

Nous remercions notre bon dieu tout puissant, qui nous a tracé le chemin de notre vie, et qui nous a permis de réaliser ce modeste travail. Nos sincères remerciements et notre profonde reconnaissance vont à Mme Benhabiles K , maitre de conférence à l'Université de Mohammed bougara Boumerdes pour nous avoir fait l'honneur de diriger ce mémoire, qu'il nous soit permis de lui exprimer notre sentiments d'estime et de considération pour ses précieux conseils tout au long de notre travail. Nous remercions : Mr Hariti M M.A.A à université de de Boumerdes, d'avoir voulu accepter de faire partie de présider le jury de soutenance et pour sa compétence et gentillesse. J'exprime aussi gratitude à : Mr Bellout Y M.C.B à université de de Boumerdes, pour avoir accepté d'examiner ce travail. Enfin, nous remercions tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Dédicaces

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

Je dédie ce modeste travail avec toute l'ardeur de mes sentiments à : Mon père que dieu le bénisse et fait dans son paradis, Ma très chère maman Que dieu vous protège et vous garde pour nous, pour son soutien moral pour l'amour qu'il m'a porté et pour ses sacrifices.

Ma très chère sœur Hadda et son mari Omar.

Mes très chères frères Yousef, Mahdi et sa femme Nawal, Brahim et sa femme Nourrira, merci de votre soutien en tout genre, que Dieu renforce

Nos liens et vous donne courage et chance pour vos perspectives d'avenir

Puisse ce travail vous servir de source d'inspiration.

A toute Mes nièce Noureddine et Yasser, Zakaria, Mohamed et Serine, Yasmin et Sofiane.

A mon binôme Esmâ avec qui j'ai partagé ce travail.

Mes très chères amies : Zineb, Hadjira, Nesrine, Linda, Asma.

A toutes mes amies pour leurs encouragements.

A tous mes cousins et cousines.

A toute ma famille « SAKHI ».

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

Ma très belle patrie l'Algérie, Et à tous les enseignants qui ont contribué à ma formation, qu'ils veuillent trouver ici, l'expression de ma profonde gratitude.

« Sabrina »

Mon dédicace :

A l'âme de mon père ferdjallah abd el kader (Abati), qui m'a toujours poussé et motivé dans mes études. J'espère que, du monde qui est sien maintenant, il apprécie cet humble geste comme preuve de reconnaissance. Puisse Dieu, le tout puissant, l'avoir en sa sainte miséricorde

Je dédie ce mémoire de fin d'études à

Ma très chère mère, en témoignage de ma reconnaissance envers le soutien, les sacrifices et tous les efforts qu'elle a fait pour mon éducation.

Ma chère grand-mère maternel Que ce modeste travail, soit l'expression des vœux que vous n'avez cessé de formuler dans vos prières. Que Dieu vous préserve santé et longue vie.

A mes chères sœurs pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral.

A mes chers frères pour leur appui et leur encouragement.

A toute mes amis pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire.

Merci d'être toujours là pour moi.

A tous ceux que j'aurais oublié de citer mais qui existent au fond de mon cœur et de ma pensée

ESMA

Résumé :

Ce travail vise à évaluer L'effets du cadmium sur les structures anatomiques des différentes parties végétatives, à savoir la racine, la tige et la feuille ont été étudiés.

En cas d'anatomie de la racine, une diminution du diamètre de la racine, de la surface du cortex de la racine, de la couche endodermique à paroi épaisse et du nombre réduit de vaisseaux méta-xylèmes ont été observés par rapport au témoin. De même, diamètre de la tige, zone corticale, taille et nombre de vaisseaux du xylème ont diminué dans la tige traitée au Cd. Cependant, un nombre important et accru de trichomes avait été trouvé dans des échantillons de tige traités au Cd avec dépôt de composés phénoliques dans des récipients avec une concentration croissante de Cd.

Des effets considérablement moins toxiques ont été observés dans l'anatomie des feuilles, à l'exception de la diminution de l'épaisseur des feuilles, de la réduction de la zone vasculaire et de la fermeture des stomates par rapport à l'échantillon témoin. Toutes ces altérations anatomiques végétales ont indiqué des effets indésirables ainsi qu'une tolérance de cette plante jusqu'à certaines concentrations de métaux lourds pour faire face à l'environnement changeant.

Mots clés : Pollution, anatomie, cadmium, Les métaux lourds, les écosystèmes, Les contaminants. La biodisponibilité

Abstract:

This work aims to assess the effects of cadmium on the anatomical structures of the different vegetative parts, namely the root, stem and leaf were studied.

In case of root anatomy, a decrease in root diameter, root cortex area, thick-walled endodermal layer and reduced number of meta-xylem vessels were observed compared to the control. Likewise, stem diameter, cortical area, size and number of xylem vessels decreased in the Cd-treated stem. However, a large and increased number of trichomes was found in Cd-treated stem samples with deposition of phenolic compounds in containers with increasing concentration of Cd.

Significantly less toxic effects were observed in leaf anatomy, except for decreased leaf thickness, reduced vascular area, and stomata closure compared to the control sample. All of these plant anatomical alterations have indicated adverse effects as well as a tolerance of this plant up to certain heavy metal concentrations to cope with the changing environment.

Keywords: Pollution, anatomy, cadmium, Heavy metals, ecosystems, Contaminants. Bioavailability.

المخلص:

يهدف هذا العمل إلى تقييم تأثير الكادميوم على الهياكل التسريحة الأجزاء النباتية المختلفة وهي الجذر الساق و الأوراق اللتي تم دراستها.

في حالة تشريح الجذر لوحظ انخفاض في قطر الجذر و منطقة قشرة الجذر و طبقة الاديم الباطن ذات الجدران السمكية و انخفاض عدد الأوعية والفرق خشبية مقارنة با لشواهد.

و بالمثل انخفاض في قطر الساق و المساحة القشرية و حجم وعدد الأوعية الخشبية في الجذر المعالج بالكادميوم. كما تم ملاحظة تأثيرات اقل سمية بشكل ملحوظ في تشريح الأوراق باستثناء انخفاض سماكة الورقة وانخفاض مساحة الأوعية وانغلاق الثغور مقارنة بعينة التحكم.

أشارت كل هذه التعديلات التسريحة النباتات إلى آثار ضارة بالإضافة إلى تحمل هذا النبات لتركيزات معينة من المعادن الثقيلة للتكيف مع البيئة المتغير.

الكلمات المفتاحية:

التلوث، التشريح، الكادميوم، المعادن الثقيلة، النظم البيئية، الملوثات، التوافر البيولوجية .

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : synthèse bibliographique

I -1- Historique	3
I -2- Définition des métaux lourds	4
I -3- Pollution par les métaux lourds	4
I -4- Origine de la contamination des sols par les métaux lourds	6
I -4-1- Origine naturelle.....	7
I -4-2- Origine anthropique.....	7
I -5- Comportement des ETM dans les sols	8
II -Cas du cadmium	9
II -1- définition	9
II -2- Un élément du sol mobile et dangereux	9
II -3- Les végétaux sont la principale voie d'entrée de la chaîne alimentaire.....	10
II -4- Toxicité du cadmium	10
II -5- Facteurs influençant la biodisponibilité du cadmium dans le sol	11
II - 5-1- Effet du pH.....	11
II - 5-2- Effet de la matière organique.....	11
II - 5-3- Effet des compétitions ou des synergies entre éléments chimiques.....	12
II - 5-4- La température du sol.....	13
III : cadmium et plantes	
III -1- Phytotoxicité du cadmium	13
III -2- Facteurs influençant le prélèvement du Cd bio-disponible par les végétaux	13
III -2-1- La composition ionique de la solution du sol	14

III -2-2- Facteurs intrinsèques à la plante	14
III -3- Transfert et translocation	14
III-4-Prélèvement et accumulation du cadmium	15
III-4-1- Prélèvement du cadmium	16
III-4-1-1- Prélèvement via la voie atmosphérique	16
III-4-1-2- Prélèvement racinaire du cadmium	16
A- <i>Les espèces de cadmium prélevées par les racines</i>	16
B- <i>Les mécanismes de prélèvement racinaire</i>	17
III-5-Accumulation du cadmium	17
III-5-1-Variabilité interspécifique d'accumulation de cadmium.....	17
III-5-2-Variabilité intra-spécifique d'accumulation de cadmium.....	18
III-5-3-Variabilité d'accumulation de cadmium entre les organes	19
III-5-4-Accumulation du cadmium à l'échelle cellulaire.....	19
III -6-Effet du cadmium sur les plantes	20
III -6- 1-Effet du cadmium sur la croissance	20
II -6-2- Effet du cadmium sur la photosynthèse	21
III -6-3-Effet du cadmium Sur la nutrition minérale	21
III -6- 4-Effet du cadmium sur le statut hydrique	23
IV- Rappel sur l'anatomie des plantes	23
IV-1-Structure des racines	23
IV-1-1- <i>L'épiderme et ses poils absorbants</i>	24
IV-1-2- <i>Le cortex</i>	24
IV-1-3- <i>L'hypoderme ou l'exoderm</i>	24

IV-1-4- <i>Le cortex central</i>	25
IV-1-5- <i>L'endoderme</i>	25
IV-1-6- <i>La stèle</i>	26
IV-2-La structure anatomique de la tige.....	27
IV-2-1-L'épiderme.....	28
IV-2-2-Le parenchyme cortical.....	28
IV-2-3-Les tissus conducteurs.....	28
I-1- Origine et historique du pois chiche.....	29
I-2-Description de la plante pois chiche.....	29
I-3-Classification botanique de pois chiche.....	30
 Chapitre II : Méthodologie résultat et discussions	
II - Méthodologie	31
III- Les résultats	31
III -1-Racine	31
III -1-1-Dans racine de la plante témoin	32
III -1-2-Dans la racine traitée au Cd	32
III -2-la tige	34
III -3-Les feuille.....	36
CONCLUSION	39

Liste des figures

Liste des figures

Figure 01 : Origine des métaux lourds dans le sol (Slatni, 2014).....	06
Figure 02 : Coupe transversale de racine principale de pois chiches cultivé en hydroponie	21
Figure 03 : Illustration du premier stade de maturation de l'endoderme, avec l'apparition de cadres ou « bandes » de Caspary dans les parois radiales des cellules endodermales.....	23
Figure 04 : schéma d'une coupe transversale dans une tige.....	24
Figure 05 : schéma d'une partie d'une coupe transversale dans une tige.....	25
Figure 06 : Coupe transversale de la racine sous un grossissement de 40X.	29
Figure 07 : Coupe transversale de la tige de pois chiche sous un grossissement de 40X.....	31
Figure 08 : Coupe transversale de la tige de pois chiche sous un grossissement de 1000X.....	33

Les abréviations

Les abréviations

- ADN : acide désoxyribonucléique.
- ABA : Acide abscissique.
- CEC : la Capacité d'Echange Cationique.
- ETM : éléments traces métalliques.
- Furane : F.
- GSH : glutathion réduit.
- NADP : nicotinamide adénine di-nucléotide (phosphate).
- OMS : organisation mondiale de la santé.
- PA : parties aériennes.
- PCB : Les polychlorobiphényle.
- PCDD : Le dibenzo-p- dioxine polychlorinate.
- TBT : tributylétains



INTRODUCTION



Introduction générale

Les métaux sont présents naturellement dans les sols. Le développement de l'activité industrielle (industries métallurgiques et chimiques) et de l'activité agricole (pesticides, engrais, ...) depuis le siècle dernier a entraîné des apports parfois intensifs de ces éléments qui deviennent des polluants pour l'environnement. Même à faibles concentrations, ils peuvent constituer un sérieux problème de santé publique du fait de leur toxicité et de leur caractère bio-accumulatif (Sterckeman et al. 2008). Les éléments traces sont absorbés par les racines, et y demeurent le plus souvent. Le passage dans les parties aériennes (tiges, feuilles) varie selon les métaux et sont les signes d'un accroissement de la concentration des métaux dans le sol.

De tous les métaux lourds non essentiels, le cadmium (Cd) est peut-être celui qui a attiré la plus grande attention dans la science du sol et la nutrition des plantes en raison de sa toxicité potentielle pour humains, ainsi que sa mobilité relative dans le système sol-plante (Tran et al, 2011). Il existe deux types de relations causales existant entre la forte concentration de métaux lourds dans le sol et l'expression des symptômes de toxicité. D'une part, les métaux lourds rivalisent avec nutriments minéraux essentiels pour l'absorption perturbant ainsi la nutrition minérale des plantes (Clarkson DT and Luttge U 1989.) et d'autre part, après absorption par la plante, il s'accumule dans les tissus végétaux et les cellules compartiments et entrave le métabolisme général de la plante (Thurma and Collins 1983).

Lorsqu'une quantité excessive de Cd est présente dans le sol et l'eau, une gamme de réactions végétales se produit, y compris la chlorose des feuilles, un retard de croissance, une photosynthèse réduite, une masse fraîche et sèche de la plante et une conductance stomatique, et même la mort.

La morphologie, l'anatomie et la physiologie des plantes sont susceptibles de fournir des indices sur leur adaptation à diverses conditions de croissance (Chandler and Bartels 2008). Plusieurs études sont menées à ce jour pour étudier l'impact des métaux lourds sur un ou quelques paramètres anatomiques des différentes espèces végétales (Khudsar T, et al 2001).

Dans le présent travail, nous nous sommes basés sur l'étude des structures anatomiques de *Cicer arietinum L.* Sous l'effet du Cd.

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

Introduction générale

*chapitre I : présente une synthèse bibliographique sur les métaux lourds, le Cadmium et son effet sur les plantes.

*chapitre II : la méthodologie suivie, et Les résultats obtenus et leur interprétation et enfin on termine avec une conclusion.



CHAPITRE I

Synthèse bibliographique



I -1- Historique

L'histoire des métaux lourds n'a pas été écrite. Et pourtant, ils paraissent étroitement liés à la civilisation. L'or, l'argent, le cuivre ont permis de fabriquer les premières pièces de monnaie. Sans métaux lourds, il n'y aurait pas eu de distribution d'eau potable à Rome par les canalisations en plomb, ni peintures, car les peintures anciennes ont résisté au temps grâce aux métaux incorporés aux pigments («jaune de Naples», à base de plomb, «vermillon de mercure»), ni vitraux dans les cathédrales, ni miroirs, étamés d'un amalgame d'étain et de mercure. L'homme a utilisé les métaux lourds et continue à les utiliser, parfois

Synthèse bibliographique

avec excès et souvent avec inconscience. Ou pire, en toute conscience. Si les métaux lourds ont fait la civilisation, ils peuvent aussi la défaire. Car les métaux lourds sont aussi des toxiques puissants (Miquel, 2001).

I -2- Définition des métaux lourds

Le terme de métaux lourds est arbitraire et imprécis. Il est utilisé pour des raisons de simplicité et il recouvre des éléments ayant des propriétés métalliques (ductilité, conductivité, densité, stabilité des cations, spécificité de ligand) et un numéro atomique > 20 (Raskin et al, 1997). Ce terme de métaux lourds désigne selon Elmsley (2001) des éléments chimiques toxiques dont la densité excède 5g/cm^3 . Sous cette appellation figurent des éléments qui, pour certains, sont effectivement des métaux tels que Ni, Cu, Zn, Pb, Hg, Al mais aussi des métalloïdes tels que As et Se.

I -3- Pollution par les métaux lourds

Les métaux lourds, ou éléments traces métalliques (ETM), existent naturellement mais en quantités très faibles dans les sols, l'eau et l'air. Certaines activités humaines, comme la combustion du charbon, du pétrole, des déchets et certains procédés industriels en rediffusent en revanche en grande quantité dans l'environnement. Ils sont souvent liés aux particules fines à l'exception du mercure, qui est principalement gazeux. Si une partie des métaux lourds retombe aux alentours de la source d'émissions, certains peuvent voyager sur de longues distances.

Ils ne posent pas seulement un problème pour la pollution de l'air : ils sont bio persistants, perturbent les écosystèmes, détériorent les sols, les eaux de surface, les forêts et les cultures et s'accumulent dans la chaîne alimentaire. Certains sont cancérigènes pour l'homme. Les principaux métaux lourds émis dans l'atmosphère par les activités humaines sont le zinc (Zn), le cuivre (Cu), le nickel (Ni), le plomb (Pb), le chrome (Cr), le sélénium (Se), l'arsenic (As), le mercure (Hg) et le cadmium (Cd). Le mercure, le plomb et le cadmium font l'objet d'une attention particulière, car ils sont très toxiques (effets sur le système nerveux) et ont une durée de vie très longue (Fabrégat, 2010).

Les métaux sont des constituants naturels des roches et des sols. Ces métaux sont présents à l'état de trace d'où le nom "éléments traces métalliques". Leurs sources d'émission dans

Synthèse bibliographique

l'environnement sont très nombreuses et difficiles à limiter, les plus importantes sont d'origine anthropique (industries, fonderies, engrais chimiques...). Les engrais chimiques, en particulier les fertilisants phosphatés sont des produits non purifiés et contiennent de ce fait des quantités variables d'impuretés parmi lesquelles les métaux lourds occupent une place de premier plan (Mulla et al, 1980; Mortvedt et al, 1981).

Les boues résiduaires d'origine urbaine constituent une autre source de contamination des zones agricoles par les métaux lourds. Certains métaux lourds sont présents en grande quantité dans ces boues (Cabrea et al, 1994; Petruzelli et al, 1994; Terslov, 1997). En effet, ces dernières renferment des éléments traces sous différentes formes: à l'état ionique libre, sous forme de précipités d'hydroxydes, fixés sur des particules solides en suspension ou bien sous forme de complexes organométalliques (Rejeb, 1990).

Il existe d'autres sources de contamination de l'environnement par les métaux lourds reposant sur l'utilisation des produits phytosanitaires essentiellement les herbicides, les insecticides et les fongicides mercuriels et cupriques destinés au traitement des cultures ou à la conservation des semences. Ces produits contribuent à la toxicité du sol par des éléments traces.

Parmi les métaux lourds, le Cd est un élément trace assez rare dans la croûte terrestre (0.3ppm). Son rejet lié aux activités anthropiques est environ 10 fois plus important que celui provenant des sources naturelles comme les volcans (Wagner, 1993). Aussi, les teneurs du sol en Cd sont notablement plus élevées au voisinage des mines (Baker, 1987) et des foyers industriels (Humphreys et Nicholis, 1984).

Tableau 1 : Sources industrielles et agricoles des métaux présent dans l'environnement.

Utilisations	Métaux
Batteries et autres appareils électriques	Cd, Hg, Pb, Zn, Mn, Ni,
Pigments et peintures	Ti, Cd, Hg, Pb, Zn, Mn, Sn, Cr, Al, As, Cu, Fe
Alliages et soudures	Cd, As, Pb, Zn, Mn, Sn, Ni, Cu
Biocides (pesticides,	As, Hg, Pb, Cu, Sn, Zn, Mn

Synthèse bibliographique

herbicides, conservateurs)	
Agents de catalyse	Ni, Hg, Pb, Cu, Sn
Verre	As, Sn, Mn
Engrais	Cd, Hg, Pb, Al, As, Cr, Cu, Mn, Ni, Zn
Matières plastiques	Cd, Sn, Pb
Produits dentaires et cosmétiques	Sn, Hg
Textiles	Cr, Fe, Al
Raffineries	Ni, V, Pb, Fe, Mn, Zn
Carburants	Ni, Hg, Cu, Fe, Mn, Pb, Cd

I -4-Origine de la contamination des sols par les métaux lourds

Contrairement aux contaminants organiques, la majorité des métaux lourds ne sont pas bio transformés et persistent dans l'environnement. Ils ont un temps de rémanence qui est de l'ordre de millions d'années, dans le sol. Les métaux lourds par leurs propriétés non biodégradables sont toxiques et responsables de nombreuses pathologies (Adriano, 2001). Par conséquent, la pollution par les métaux lourds a une certaine particularité qui est surtout son irréversibilité. Une fois les métaux dissipés dans la nature, il est impossible de les récupérer aisément.

Le problème principal avec les métaux lourds comme le plomb, le cadmium, le cuivre et le mercure est qu'ils ne peuvent pas être biodégradés, et donc persistent pendant de longues périodes dans des sols (Huynh, 2009). Leur présence dans les sols peut être naturelle ou anthropogénique.

I -4-1-Origine naturelle

Les métaux lourds sont présents naturellement dans les roches, ils sont libérés lors de l'altération de celles-ci pour constituer le fond géochimique (Bourelhier et Berthelin, 1998). La concentration naturelle de ces métaux lourds dans les sols varie selon la nature de la roche, sa localisation et son âge (Baize, 2002; Migeon, 2009).

I -4-2-Origine anthropique

Cependant, la source majeure de contamination est d'origine anthropique (Klute, 1986). Les principaux types de pollutions anthropiques responsables de l'augmentation du flux de métaux, sont la pollution atmosphérique (rejets urbains et industriels), la pollution liée aux activités agricoles et la pollution industrielle (Franklin *et al*, 2005; Huynh, 2009 ; Migeon, 2009).

La pollution atmosphérique résulte des activités industrielles (rejets d'usine) et urbaines (gaz d'échappement, etc....). Il faut distinguer les apports diffus aériens d'origine lointaine des apports massifs localisés d'origine proche. Dans les apports diffus sont classés les poussières et aérosols provenant des chauffages ainsi que des moteurs d'automobiles. Les apports massifs localisés résultent d'apports anthropiques accidentels liés aux activités industrielles sans protection efficace contre la dispersion dans l'environnement (Baize, 1997).

Certaines pratiques agricoles sont à l'origine de l'introduction de métaux lourds dans le sol. Les produits destinés à améliorer les propriétés physico-chimiques du sol tel que les engrais, les composts et les boues de station d'épuration sont souvent plus riches en métaux lourds que le sol lui-même d'épuration (Robert et Juste, 1999; Migeon, 2009).

La pollution industrielle provenant des usines de production de l'activité humaine tels que les matières organiques et graisses (industries agro-alimentaires), les produits chimiques divers (industries chimiques), les matières radioactives (centrales nucléaires, traitement des déchets radioactifs) et la métallurgie (Godin *et al*, 1985; Franklin *et al*, 2005; Migeon, 2009). Les déchets miniers et les terrils industriels sont une source particulièrement importante de pollution par le zinc, le plomb et le cadmium.

Le rôle des pratiques industrielles et agricoles dans la contamination des sols doit être pris en compte : cela concerne une grande partie du territoire. Leur accumulation et leur transfert

Synthèse bibliographique

constituent donc un risque pour la santé humaine via la contamination de la chaîne alimentaire, mais aussi pour le milieu naturel dans son ensemble (Bourrelier et Berthelin; 1998 ; Franklin *et al*, 2005; Migeon, 2009).

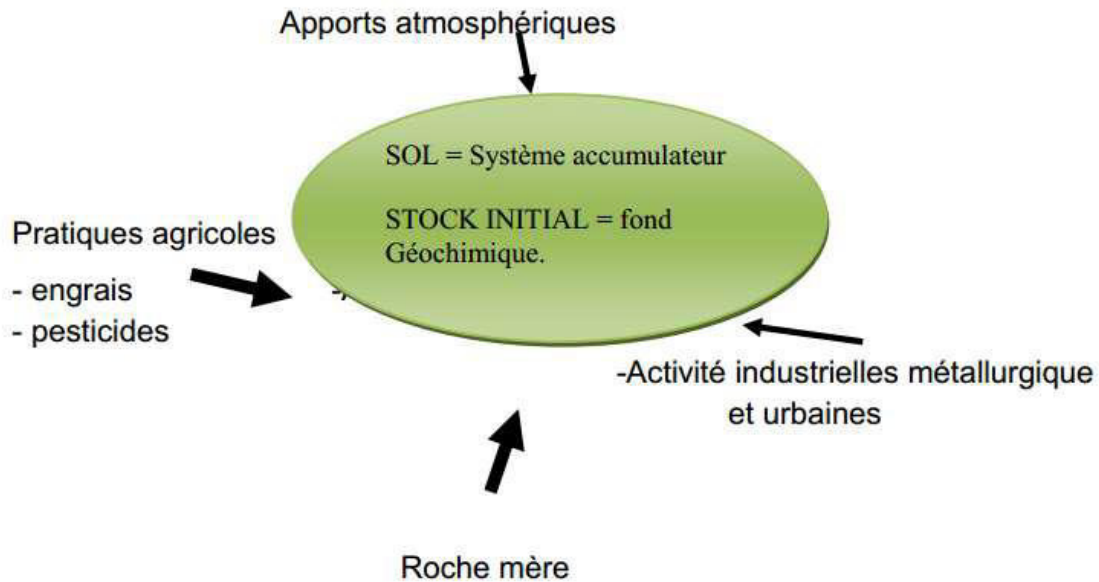


Figure 01 : Origine des métaux lourds dans le sol (Slatni, 2014)

I -5-Comportement des ETM dans les sols

Le sol est défini comme la couche supérieure de la croûte terrestre composée des particules minérales, de matières organiques, d'eau, d'air et d'organismes (NF ISO 15799, 2004). Une fois introduits dans l'environnement, les éléments métalliques, contrairement aux polluants organiques, demeurent dans le sol et ne sont pas dégradés. Les seules exceptions sont le mercure et le sélénium qui peuvent être, au moins partiellement, volatilisés grâce à l'action de microorganismes ou de plantes.

II- Cas du cadmium

II -1-définition

Le cadmium est un métal blanc argenté avec des teintes de bleu appartenant à la famille des métaux de transition. Le cadmium élémentaire a un numéro atomique de 48 et une masse atomique de 112,4 g/mol. Le cadmium se trouve souvent associé dans les roches aux éléments du même groupe, comme le zinc et le mercure. La valence Cd²⁺ est la valence la plus souvent rencontrée dans l'environnement et est vraisemblablement la seule valence du cadmium dans les systèmes aqueux (McLaughlin et Singh, 1999).

Le cadmium n'est pas essentiel au développement des organismes animaux ou végétaux. En revanche, ses propriétés physiques et chimiques, proches de celles du zinc et du calcium, lui permettent de traverser les barrières biologiques et de s'accumuler dans les tissus.

II -2-Un élément du sol mobile et dangereux

Comme tous les ETM, le Cd peut être une source de risque pour l'environnement. En s'accumulant dans la chaîne alimentaire, il représente un danger pour la santé de tous les êtres vivants, depuis les végétaux jusqu'à l'homme. Le Cd est d'ailleurs l'un des métaux les plus toxiques de la planète vis-à-vis de l'environnement (Basic et Besnard, 2006).

Les concentrations de Cd dans le sol varient entre 0,1 et 345 mg.kg⁻¹ (Lasat, 2000). Dans les sols non pollués, il est présent à des taux compris entre 0,1 et 0,5 mg.kg⁻¹ (Schutzendubel et Polle, 2002; Wang *et al*, 2006). Mais il arrive que des sols soient naturellement riches en Cd (jusqu'à 3 mg.kg⁻¹) en raison de la composition de la roche mère (Wang *et al*, 2006). La contamination est considérée modérée lorsqu'elle varie entre 1 et 5 mg.kg⁻¹.

Environ 90% des émissions anthropogéniques d'ETM ont eu lieu après 1900. Par conséquent, il est reconnu que les activités humaines mènent à une accumulation substantielle d'éléments métalliques en traces dans les sols à l'échelle planétaire (Vassilev *et al*, 2002). Au siècle dernier, le sol a connu une accumulation remarquable de Cd suite aux dépôts atmosphériques issus des activités industrielles (mines de zinc), à l'utilisation du Cd dans la production d'énergie (piles) et à l'épandage de déchets, de fertilisants, de chaux et de produits phytosanitaires ; de plus, étant donnée la forte solubilité du Cd dans l'eau, cette contamination est aggravée par l'irrigation, les inondations et les eaux d'infiltration (Yanai *et al.*, 2006). Les émissions anthropogéniques de Cd ont été estimées à 30 000 tonnes par an (Schutzendubel et

Synthèse bibliographique

Polle, 2002; He *et al*, 2005). Ainsi, à l'aube du 21^{ème} siècle, la plupart des sols agricoles dans le monde sont légèrement à modérément contaminés en Cd, suite à l'épandage de boues de stations d'épuration et au dépôt de poudres de fonderie (Kaschl *et al*, 2002; Vassilev *et al*, 2002). La contamination des sols en Cd constitue un problème très inquiétant pour les surfaces agricoles et les eaux souterraines, et par conséquent pour la santé humaine et animale.

II -3- Les végétaux principale voie d'entrée de la chaîne alimentaire

La pollution, à la fois de l'air et des sols, expose les végétaux à des concentrations croissantes de cadmium (Mensch et Baize, 2004). En effet, entre 1 et 5% des produits cultivés de certaines espèces végétales dépassent la concentration maximale réglementaire en cadmium (Mensch et Baize, 2004).

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.

II -4- Toxicité du cadmium

On identifie le cadmium comme un polluant extrêmement toxique (Godt *et al*, 2006). Quelle que soit son origine, le cadmium présent dans le sol ne se décompose ni par voie chimique, ni par voie biologique. Il est accumulé dans les 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).

Aussi, celui-ci affecte sévèrement le système respiratoire. Il provoque des troubles respiratoires et des œdèmes pulmonaires ainsi qu'une destruction des muqueuses (Seidal *et al*, 1993). Une exposition à des faibles concentrations de cadmium pendant une longue période (20 µg m⁻³ pendant 20 ans) peut engendrer de graves problèmes respiratoires (WHO, 2000).

Le cadmium semble interférer avec la voie stéroïdogénique ovarienne. De faibles concentrations de cadmium stimuleraient la biosynthèse ovarienne de progestérone alors que

Synthèse bibliographique

des concentrations élevées la bloqueraient (Henson et Chedrese, 2004). Plusieurs études ont montré une forte relation entre l'intoxication par le cadmium et des dommages osseux. Le cadmium est impliqué dans les occurrences de la maladie d'Itai-Itai qui présente comme symptômes la diminution de la minéralisation des os, des taux élevés d'ostéoporose et de douleurs osseuses (Kazantzis, 1979).

II -5-Facteurs influençant la biodisponibilité du cadmium dans le sol

La biodisponibilité d'un métal signifie son accessibilité pour les organismes vivants. Plusieurs paramètres physico-chimiques comme la forme du cadmium dans le sol, le pH du sol, le potentiel redox ainsi que la richesse du sol en colloïdes organiques ou minéraux peuvent jouer un rôle important dans la biodisponibilité du Cd dans la solution du sol.

II - 5-1- Effet du pH

Le pH du sol est l'un des paramètres majeurs influençant la biodisponibilité du cadmium et donc son transfert vers les plantes (Kirkham, 2006). Plusieurs chercheurs ont en effet montré que les faibles valeurs de pH favorisent l'accumulation de Cd dans les tissus végétaux (Waisberg *et al*, 2004 ; Tsadilas *et al*, 2005 ; Yanai *et al*, 2006).

Tudoreanu et Phillips (2004) ont même montré l'existence d'une relation linéaire entre le pH du sol et l'absorption du cadmium.

Ceci pourrait être expliqué par le fait qu'à faible pH, les protons H⁺ qui sont en concentration élevée dans la solution du sol vont se fixer sur les colloïdes à la place des ions métalliques ce qui augmente la concentration des ions Cd²⁺ libres accessibles pour l'absorption racinaire.

II - 5-2- Effet de la matière organique

La biodisponibilité du cadmium dépend non seulement de la forme du cadmium et du pH mais aussi de la richesse du sol en matière organique. Sauvé *et al*. (2003) 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. Il est ainsi admis qu'un sol riche en colloïdes organiques diminue la biodisponibilité du cadmium. L'enrichissement des solutions de culture avec des acides humiques entraîne une diminution de l'absorption de Cd²⁺ chez plusieurs espèces végétales

telles que le maïs (Tyler et Bride, 1982), la betterave à sucre (Greger et Lindberg, 1986) et la tomate (Wolterbeek *et al.*, 1988).

II - 5-3- Effet des compétitions ou des synergies entre éléments chimiques

La biodisponibilité du cadmium est conditionnée par son environnement chimique. Des compétitions ou synergies entre éléments ont été mises en évidence dans des milieux synthétiques et en solution hydroponique. Une relation antagoniste entre P et Cd ou Zn a souvent été démontrée (Wallace et Berry, 1989; Thys *et al.*, 1991). Elle s'explique par la formation en solution de phosphates de métaux, espèces non absorbables. Par ailleurs, une augmentation de calcium dans le milieu conduit à une diminution de l'absorption de cadmium, suggérant une compétition entre Ca^{2+} et Cd^{2+} au niveau de la surface racinaire (Jarvis *et al.*, 1976 ; Kim *et al.*, 2003 ; Sarwar *et al.*, 2010).

Un effet compétiteur du Mn^{2+} vis-à-vis du Cd^{2+} a également été démontré en solution nutritive (Jarvis *et al.*, 1976 ; Zornoza *et al.*, 2010). Une compétition entre le cadmium et le zinc est souvent observée (Sadana et Bijay, 1989) ; cette compétition se traduit par une diminution de l'influx de Cd^{2+} en présence de Zn^{2+} (Costa et Morel, 1994a ; Sarwar *et al.*, 2010). Ces observations s'expliquent par des compétitions entre les différents cations pour les sites de complexations de surface au niveau de la racine et vis-à-vis de transporteurs peu spécifiques de cations majeurs ou d'oligoéléments.

D'autres études démontrent cependant un effet de synergie entre le cadmium et des éléments tels que le zinc ou le calcium (Turner, 1973 ; Girling et Peterson, 1981; Larbi *et al.*, 2002 ; Ghnaya *et al.*, 2005). En fait, il semble que les interactions dépendent du niveau de concentration du cadmium dans le milieu (Sharma et Agrawal, 2006).

Il est également connu que le chlorure de sodium (NaCl) augmente la biodisponibilité des métaux lourds dans le sol. En effet, les ions chlorures (Cl^-) forment des complexes stables avec les ions Cd^{2+} . Ce processus de complexations semble augmenter la mobilité des ions Cd^{2+} dans le sol ainsi que leur biodisponibilité (Lopez-Chuken et Young, 2005 ; Ghnaya *et al.*, 2007). De ce fait, l'enrichissement du sol en NaCl stimule le prélèvement de Cd par les plantes (Xu *et al.*, 2010). En présence de NaCl, le cadmium est absorbé sous forme ionique (Cd^{2+}) ou sous forme d'un complexe (CdCl_n^{2-n}) (Lopez-Chuken et Young, 2005).

Ces résultats conduisent à remettre en cause les seuils de toxicité définis à partir d'études mono élémentaires puisque le statut en éléments majeurs peut influencer sur l'accumulation du

métal et l'expression de la phytotoxicité. Ils prouvent la nécessité de prendre en compte les cations compétiteurs pour estimer la biodisponibilité et donc le flux de transfert d'un élément.

II - 5-4- La température du sol

La température du sol dépend en premier lieu de la météorologie, et donc du climat, mais elle est également liée à l'activité biologique et influence rétroactivement la formation de complexes avec des ligands inorganiques en modifiant l'activité de l'élément en solution (Deneux-Mustin *et al.*, 2003). Haghiri (1974) montre que l'augmentation de la température favorise le prélèvement du cadmium par les plantes.

La température a un impact direct sur la mobilité des métaux en déplaçant les équilibres des réactions de dissolution-précipitation et Co-précipitation, et un impact indirect, en modifiant la teneur en eau du sol et son pH

III - cadmium et plantes

III -1-Phytotoxicité du cadmium

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

III -2- Facteurs influençant le prélèvement du Cd biodisponible par les végétaux

III -2-1- La composition ionique de la solution du sol

Précédemment, nous avons vu que les ions en solutions peuvent influencer significativement la disponibilité du Cd en solution. Mais la composition ionique de la solution du sol constitue également un facteur de taille dans le prélèvement du Cd de la solution. La littérature a rapporté en particulier des interactions entre les cations et le

Synthèse bibliographique

prélèvement de Cd par les racines. L'influx de Cd serait sensible à certains cations monovalents (K, NH₄, Na) (Lindbergh *et al*, 2004), mais ce sont les cations divalents qui interagissent le plus avec l'entrée du Cd dans la plante. Par exemple, une déficience en Zn va promouvoir l'absorption de Cd tandis qu'une forte teneur en Ca réduira le prélèvement du Cd. Aussi, des métaux comme le Cu et le Pb, pour lesquels les parois racinaires ont plus d'affinité que pour le Cd, auront tendance à entrer en compétition avec le prélèvement du Cd.

III -2-2- Facteurs intrinsèques à la plante

Les espèces végétales diffèrent par leur demande en Cd, et des variétés (ou écotypes) de la même espèce) peuvent présenter des facultés de prélèvement très contrastées. C'est par exemple des écotypes Gange et Prayon du tabouret calaminaire : Gange hyper accumule le Cd mais pas Prayon (Zhao *et al*, 2002). L'âge de la plante joue un rôle dans la mesure où le système racinaire âgé ne présente pas du tout les mêmes caractéristiques que le système racinaire jeune. D'une part, la CEC est d'autant plus faible que la racine vieillit (Manne *et al*, 1970). D'autre part, les zones matures de la racine présentent des cellules différenciées, alors que celles-ci ne le sont pas encore dans les zones immatures, à savoir l'apex racinaire.

La morphologie du système racinaire peut également jouer un rôle fondamental dans le prélèvement du Cd. Par exemple, il a été montré que les racines de tabouret calaminaire se densifient dans le sol au niveau de patches de métaux ; il est certain que la demande importante de la plante hyper accumulatrice entraîne une ramification intense dans les zones riches en métaux (Schwartz *et al*, 1999). En effet, comme nous le verrons dans le chapitre suivant, ce sont justement les apex racinaires qui seraient les principaux acteurs de l'absorption du métal.

Le stade phénologique contrôle aussi le prélèvement du Cd dans la mesure où la demande de la plante en Cd évolue selon le stade atteint. Enfin, le statut de la plante en Cd (ou quantité de Cd endogène) peut être à l'origine de mécanismes de régulation freinant ou au contraire stimulant le prélèvement du métal.

III -3- Transfert et translocation

Une fois absorbés par les racines qui jouent le rôle d'échangeurs d'ions, les métaux traversent la membrane plasmique par des transporteurs ou des sites de fixation de plus forte affinité (Hirsch *et al*, 1998). Trois processus majeurs peuvent alors réguler le transfert des

Synthèse bibliographique

métaux des racines vers le xylème : (1) la séquestration des métaux dans les cellules racinaires, (2) le transport symplastique vers la stèle, (3) le relargage dans le xylème.

Dans la plante, les métaux sont souvent peu mobiles et forment des complexes insolubles avec les carbonates, les sulfates et les phosphates, les immobilisant dans les compartiments apoplastiques ou symplastiques (Raskin *et al*, 1997). L'immobilisation des métaux sur les parois cellulaires des racines peut être assimilée à une stratégie d'exclusion des métaux par la plante (Baker 1981; Dahmani-Muller *et al*, 2000). Les métaux non essentiels empruntent plutôt la voie apoplastiques, perméable aux solutés, alors que les ions métalliques essentiels atteignent le xylème par la voie symplastique (Tester et Leigh 2001). Le transport des ions dans le xylème, dont Cd II, Cu II, Pb II et Zn II, est contrôlé par les protéines de transport membranaires (Clemens *et al*, 2002; Williams *et al*, 2000). La chélation avec certains ligands tels que l'histidine, la nicotian-amine et le citrate ont tendance à faciliter le transport des métaux dans le xylème alors que la synthèse de phytochélatines et de métallothionéines favorise la séquestration dans les racines (Clemens *et al*, 2002). Après son efflux dans le xylème, le cadmium, libre et lié aux phytochélatines, est transporté vers les parties aériennes de la plante par la sève xylémienne (Salt *et al*, 1995b ; Gong *et al*, 2003).

Dans les plantes normales, la teneur en Cd des feuilles est comprise entre 0,1-3 µg / g M.S., chez les plantes qui l'excluent, elle est de 0,03 µg / g M.S. et chez les plantes accumulatrices, de 20 µg /g MS. (Reeves et Baker, 2000). La plus grande partie du cadmium accumulé reste dans les racines, seules de petites quantités sont transportées vers les parties aériennes. Ainsi, chez le blé, 78 % du cadmium sont retenus dans les racines (Zhang *et al*, 2000). En général, la teneur en cadmium des plantes diminue dans l'ordre suivant : racines > tiges > feuilles > fruits > graines.

III -4-Prélèvement et accumulation du cadmium

Selon leurs aptitudes à tolérer, à absorber ou à accumuler le cadmium dans les tissus, les plantes peuvent être caractérisées d'indicatrices, d'exclusives ou d'accumulatrices voire d'hyper accumulatrices. Chez les plantes indicatrices, le prélèvement et le transport du cadmium dépendent linéairement de la concentration dans le sol, et la concentration du cadmium dans la plante reflète celle du sol. Chez les plantes exclusives, la concentration du cadmium dans la plante est nettement inférieure à celle que l'on peut observer dans le sol. À l'inverse, chez les plantes accumulatrices ou hyper accumulatrices, la concentration du cadmium dans la plante est nettement supérieure a celle que l'on peut observer dans le sol (Bourrelier et Berthelin, 1998).

III -4-1-Prélèvement du cadmium

Selon leurs aptitudes à tolérer, à absorber ou à accumuler le cadmium dans les tissus, les plantes peuvent être caractérisées d'indicatrices, d'exclusives ou d'accumulatrices voire d'hyper accumulatrices. Chez les plantes indicatrices, le prélèvement et le transport du cadmium dépendent linéairement de la concentration dans le sol et la concentration du cadmium dans la plante reflète celle du sol.

Chez les plantes exclusives, la concentration du cadmium dans la plante est nettement inférieure à celle que l'on peut observer dans le sol. À l'inverse, chez les plantes accumulatrices ou hyper accumulatrices la concentration du cadmium dans la plante est nettement supérieure à celle que l'on peut observer dans le sol (Bourrelier et Berthelin, 1998).

III -4 -1-1-Prélèvement via la voie atmosphérique

Peu d'auteurs ont étudié les parts respectives du prélèvement racinaire et du prélèvement foliaire du cadmium dans le contenu en cadmium accumulé par les plantes. La plupart d'entre eux se sont contentés de constater des différences en fonction de la proximité d'une source de contamination (route, cheminée d'industries, ville, etc.).

Une étude a tenté d'estimer cette proportion en utilisant un traçage isotopique par du ^{109}Cd (Hovmand *et al*, 1983): dans un contexte de sols agricoles non contaminés soumis à des retombées atmosphériques diffuses, 20% (pour le grain de blé) à 60 % (pour le chou) du cadmium total du végétal non lavé provenait des retombées aériennes. Cependant, la contribution des retombées aériennes ne deviendrait prépondérante que lorsque les dépôts aériens seraient de l'ordre de 10 g/ha/an. Pour le cadmium, les transferts via la voie atmosphérique peuvent donc être négligés dans les contextes agricoles éloignés de sources de contamination.

III -4-1-2- Prélèvement racinaire du cadmium

A- Les espèces de cadmium prélevées par les racines

On estime que, pour la majorité des métaux, le prélèvement se fait quand ces éléments sont sous forme de cations libres (Cd^{2+} , Pb^{2+} , Zn^{2+}) (Hart *et al*, 1998a ; Hart *et al*, 1998b). Dans

des cas particuliers, d'autres formes interviennent. Comme cela a été brièvement mentionné précédemment, des complexes inorganiques de cadmium ($CdCl^+$ et $CdCl_2$) observés dans les sols salés ou irrigués avec des eaux chlorées pourraient être absorbés (Wegglar-Beaton *et al*, 2000; Wegglar *et al*, 2004).

A concentration identique en Cd^{2+} dans le milieu, une augmentation du prélèvement de cadmium est observée en présence de chlorures, suggérant soit que le complexe est directement absorbé, soit qu'il participe à la diffusion vers la racine (Smolders et McLaughlin, 1996a ; Smolders et McLaughlin, 1996b).

Les sulfates pourraient jouer le même rôle via des complexes $CdSO_4$ (McLaughlin *et al*, 1998a ; McLaughlin *et al*, 1998b), mais ces résultats n'ont pas été confirmés par d'autres études (Bingham *et al*, 1986). Il est également possible que des complexes Cd-citrate soient directement absorbés ou participent à l'absorption (Berkelaar et Hale, 2003).

B- Les mécanismes de prélèvement racinaire

Puisque le Cd^{2+} est un ion métallique non essentiel, on considère qu'il n'existe pas de Mécanisme spécifique d'absorption de cet élément. 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). Il a cependant été rapporté que le cadmium peut être absorbé par simple diffusion et que les différentes voies d'absorption du cadmium peuvent varier selon l'espèce végétale considérée.

Chez le riz, le maïs et le soja, l'absorption est réalisée principalement par des transporteurs membranaires (Cataldo *et al*, 1988) alors que chez l'orge, l'absorption du cadmium se fait principalement par une simple diffusion (Cutler et Rains, 1974). Chez d'autres espèces, les deux voies peuvent coexister comme chez le blé dur où l'absorption du cadmium est effectuée par simple diffusion et par des transporteurs (Hart *et al*, 1998b).

III -5-Accumulation du cadmium

III -5-1-Variabilité interspécifique d'accumulation de cadmium

Il a été clairement démontré que la capacité d'accumulation de cadmium était dépendante de la famille végétale (Kuboi *et al*, 1986) et de l'espèce (Coullery, 1997).

Synthèse bibliographique

Parmi les plantes consommables, aucune ne peut être classée dans la catégorie des plantes hyper accumulatrices de cadmium. Les plantes cultivées les moins accumulatrices de cadmium sont les Légumineuses. Les Placées, les Liliacées, les Cucurbitacées et Apiécées sont moyennement accumulatrices.

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

III -5-2-Variabilité intra spécifique d'accumulation de cadmium

Des différences d'accumulation ont été observées entre différentes variétés d'une même espèce végétale. Par exemple, la concentration en cadmium varie d'un facteur 2 au sein de l'espèce "pomme de terre" (McLaughlin *et al.*, 1994), d'un facteur supérieur à 2 chez la laitue (Costa et Morel, 1994a; Florijn *et al.*, 1991), d'un facteur compris entre 2 et 6 suivant les années chez le blé tendre (Vinkel, 2001), d'un facteur 3 chez le blé dur, d'un facteur 4 dans le grain de tournesol et d'un facteur 10 dans la graine de lin (Li *et al.*, 1997) ou 11 dans des plantules de maïs (Florijn et Vanbeusichem, 1993).

Il apparaît cependant que les différences inter variétales varient en fonction des conditions de culture.

Chez la laitue, il a été montré que les différences inter variétales étaient importantes quand les plantes sont cultivées sur des sols très faiblement contaminés alors que ces différences s'estompent quand les plantes sont cultivées sur des sols fortement contaminés par le cadmium (Florijn *et al*, 1991; Costa et Morel, 1994a).

Chez le blé les différences variétales d'accumulation de cadmium sont fonction du sol et du niveau d'exposition (Vinkel, 2001). Ces différences peuvent ainsi varier d'un site à un autre ou d'une année à une autre (Vinkel, 2001).

III -5-3-Variabilité d'accumulation de cadmium entre les organes

Comme cela a été mentionné, l'accumulation de cadmium diffère considérablement selon les organes et les tissus d'une même plante, par exemple entre les racines et les parties aériennes, et la distribution des teneurs en cadmium est elle-même fortement variable à la fois

Synthèse bibliographique

entre espèces et entre variétés au sein d'une même espèce. Aucun lien évident ne peut être établi entre la facilité à accumuler le cadmium et la répartition du cadmium entre organes (Wagner, 1993 ; Clemens, 2006).

À l'échelle de la plante entière, il y a généralement moins de Cd dans les feuilles que dans les racines, et encore moins dans les fruits et dans les graines (Wagner, 1993). Jarvis *et al.*, (1976) ont remarqué que chez 20 espèces végétales, la quantité de cadmium retenu par les racines dépasse la moitié de la quantité totale absorbée par la plante. Chez *Azolla filiculoides*, les niveaux d'accumulation du Cd²⁺ sont au moins deux fois plus élevés dans les racines que dans les parties aériennes (Sela *et al.*, 1989).

Le même résultat a été observé chez le riz (Ros *et al.*, 1992), le petit pois (Chugh *et al.*, 1992) et la laitue (Costa et Morel, 1994b).

Cependant, chez certaines espèces, le cadmium peut s'accumuler fortement en dehors des racines. C'est par exemple le cas du tabac qui accumule dans ses feuilles plus de 80% du cadmium prélevé par les racines (Elmayan et Tepfer, 1994). C'est aussi le cas des espèces sauvages dites hyper accumulatrices: *A. halleri* et *T. caerulescens* (Lombi *et al.*, 2000 ; Dahmani- Müller *et al.*, 2001 ; Wojcik *et al.* 2005).

III -5-4-Accumulation du cadmium à L'échelle cellulaire

À l'échelle cellulaire, la localisation du cadmium est encore mal connue. Deux compartiments cellulaires semblent jouer un rôle important dans le stockage et la localisation du cadmium: les parois cellulaires et les vacuoles. Selon les plantes et les techniques utilisées, les auteurs ont mis en évidence que le cadmium est: soit associé à

Des granules dans les vacuoles, le cytoplasme, les plastes ou le noyau (Vazquez *et al.*, 1992), soit lié aux parois cellulaires (Lozano-Rodriguez *et al.*, 1997; Ramos *et al.*, 2002), soit présent dans différents types de structures simultanément (Dahmani- Müller, 2000).

Ramos *et al.*, (2002) ont quantifié cette répartition dans les feuilles de laitue: 63-64%

Du cadmium est lié aux parois cellulaires alors que 13 à 25 % est localisé dans le protoplasme et 6 à 16 % dans les chloroplastes. En fait, ces différences semblent être liées au niveau de contamination considéré. Des microanalyses aux rayons X des racines de *Zea mays* et d'*Agrotis gigantea*, ont montré que Cd²⁺ s'accumule sous forme de granules au niveau du cytoplasme et de la vacuole des cellules matures différenciées et dans le noyau des cellules indifférenciées (Rauser et Ackerly, 1987).

Synthèse bibliographique

Utilisant la technique de fractionnement cellulaire, Weigel et Jager (1980) ont montré que chez le haricot, le Cd²⁺ se localise au niveau du cytoplasme aussi bien dans les cellules foliaires que dans les cellules racinaires alors qu'une très faible partie du cadmium est retenue par les parois des cellules des deux types d'organes. Cependant, en utilisant la technique d'analyse aux rayons X, Vazquez *et al.*, (1992) ont observé que chez la même espèce, le Cd²⁺ s'accumulait principalement dans la vacuole et le noyau, et en faible quantité dans le cytoplasme et les plastes.

III -6-Effet du cadmium sur les plantes

III -6-1-Effet du cadmium sur la croissance

L'effet toxique du cadmium sur la croissance de la plante se manifeste par une réduction de la croissance des parties aériennes et des racines (Ghnaya *et al.*, 2005 ; Zorrig *et al.*, 2010) , affectant ainsi dramatiquement la production de la biomasse.

Ces effets peuvent être liés, entre autres, à la perturbation de l'équilibre de certaines hormones de croissance, notamment l'auxine (Hasenstein *et al.*, 1988), à la perturbation de l'homéostasie des éléments minéraux essentiels pour la croissance des plantes (Das *et al.*, 1997), à une action délétère du cadmium sur la composition des parois cellulaires (Chaoui et El Ferjani, 2005), ainsi qu'à des perturbations de la machinerie photosynthétique, notamment la structure des chloroplastes et la biosynthèse de la chlorophylle (Mobin et Khan, 2007 ; Ebbs et Uchil, 2008).

Il est toutefois important de noter que le cadmium n'affecte pas la croissance de toutes les plantes avec la même sévérité. 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 hyper tolérantes sont aussi hyper accumulatrices de cadmium. Bien que l'hyper accumulation nécessite la tolérance, une relation simple entre la tolérance et l'hyper accumulation n'apparaît pas évidente.

À ce jour, nos connaissances sont encore limitées sur les mécanismes physiologiques et moléculaires permettant à ces plantes de maintenir leurs capacités de croissance sur des milieux fortement pollués par le cadmium, et d'éviter les effets toxiques du cadmium malgré les grandes quantités accumulées.

À très faible concentration de Cd dans le milieu la croissance de plusieurs plantes peut être stimulée (Arduini *et al*, 2004 ; Tang *et al*, 2009). Ces effets sont peu discutés dans la littérature. Une explication de ce mécanisme a toutefois été suggérée selon (Kennedy et Gonsalves, 1987), une faible concentration de Cd hyper polarise la membrane cytoplasmique à la surface racinaire augmentant ainsi le potentiel transmembranaire qui présente une source d'énergie pour l'absorption des cations essentiels.

III -6-2-Effet du cadmium sur la photosynthèse

Le cadmium affecte sérieusement l'appareil photosynthétique (Clemens, 2006). La diminution de la capacité photosynthétique par le cadmium peut être due essentiellement à une désorganisation structurale des chloroplastes (Ouzounidou *et al*, 1997; Djebali *et al*. 2005).

Baryla *et al*, (2001) rapportent que la chlorose observée dans les feuilles de *Brassica napus* est due à une diminution significative de la densité des chloroplastes et à une augmentation de la taille des cellules mésophylliennes et suggèrent que Cd²⁺ affecte aussi la genèse des organites cellulaires, essentiellement les chloroplastes.

Le cadmium pourrait aussi avoir une action directe ou indirecte sur la teneur en chlorophylles (Ghnaya *et al*, 2005 ; Mobin et Khan, 2007 ; Singh *et al*, 2010) par l'intermédiaire de perturbations métaboliques (Vassilev *et al*, 1997) ou d'une inhibition des enzymes de biosynthèse de la chlorophylle (Stobart *et al*, 1985 ; Padmaja *et al*, 1990). La diminution de l'activité photosynthétique en présence de cadmium pourrait être aussi due à une diminution de la teneur des parties aériennes en autres pigments comme le β -carotène ou les xanthophylles (Larbi *et al*, 2002).

On pense que le cadmium agit également sur le processus de transport des électrons lors de la photosynthèse. Le cadmium 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). Alcántara *et al*, (1994) suggèrent quant à eux que l'inhibition de la Fe(III) réductase par le Cd provoque une déficience en Fe(II), ce qui affecte sérieusement la photosynthèse.

La fermeture des stomates dont on a vu qu'elle pouvait être causée par le cadmium pourrait être une autre cause de la limitation de la photosynthèse comme conséquence de la restriction de la diffusion du CO₂ dans les feuilles (Polle et Schützendübel 2003,

Fediuc *et al*, 2005).

III -6-3-Sur la nutrition minérale

La présence de Cd dans la solution nutritive peut agir sur l'absorption et l'accumulation des éléments nutritifs essentiels pour la croissance des plantes (Sanita di Toppi et Gabbrielli, 1999; Sandalio et al, 2001; Aravind et Prasad, 2003; Elloumi et al, 2007). Dans la plupart des cas, le Cd inhibe l'absorption des cations K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , Mn^{+2} , Zn^{+2} , Cu^{+2} et Fe^{3+} (Srivastava et Jaiswal, 1990; Breckle, 1991; Ouariti et al, 1997) et des anions NO_3^- (Burzynski et Grabowski, 1984; Hernandez et al, 1997; Ouariti et al, 1997).

Certains signes de toxicité des plantes par le Cd ont été attribués à des perturbations d'origine nutritionnelle. Greger et Lindberg (1987) ont montré que les plantules de *Beta vulgaris*, traitées par le Cd, développent des racines latérales courtes. Les mêmes auteurs ont supposé que ces signes sont dus à une carence en approvisionnement calcique. La réduction des teneurs en calcium en présence d'un stress cadmique a été montrée aussi chez le pois (Sandalio et al, 2001). D'autres travaux ont montré que les chloroses et les nécroses qui se manifestent suite au traitement par le Cd sont corrélées à des déficiences en oligoéléments tels que : Fe, Cu et Mn (Leita et al, 1991; Ouariti et al, 1997).

III -6-4-Effet du cadmium sur le statut hydrique

Le cadmium affecte l'absorption de l'eau, son transport ainsi que la transpiration (Vassiliev et al, 1997). Ces perturbations hydriques se manifestent par une diminution de la teneur relative en eau (TRE ou RWC : Relative Water Content), du potentiel hydrique (ψ) et du potentiel de turgescence foliaire (Vassilev et Yordanov, 1997). Le cadmium produit une accumulation de composés phénoliques insolubles, comme la lignine, dans les vaisseaux de xylème réduisant ainsi le transport ascendant de l'eau et des éléments nutritifs (Chaoui et El Ferjani, 2004).

De même, le cadmium provoque 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). Cependant, des chercheurs suggèrent que la fermeture stomatique, en présence de Cd^{+2} est due à la ressemblance chimique entre les ions Cd^{+2} et Ca^{+2} (Fediuc et al, 2005 ; Dal Corso et al, 2008). En effet, la fermeture

Synthèse bibliographique

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^{2+} dans le cytosol des cellules de garde (MacRobbie et Kurup, 2007). Étant chimiquement semblables aux ions Ca^{+2} , les ions Cd^{+2} gagnent les cellules de garde par les canaux de Ca^{+2} tensio-dépendants et, une fois dans le cytosol, ils affectent l'activité de Ca^{+2} (Perfus-Barbeoch et *al*, 2002). Le transport de l'eau dans la plante a été souvent bloqué par le stress métallique (Barcelo et poschenrieder, 1990).

IV -Rappel sur l'anatomie des plantes

IV -1-Structure des racines

La structure des racines affecte considérablement l'absorption de l'eau et des nutriments dont la plante a besoin. C'est pourquoi il est indispensable de la rappeler.

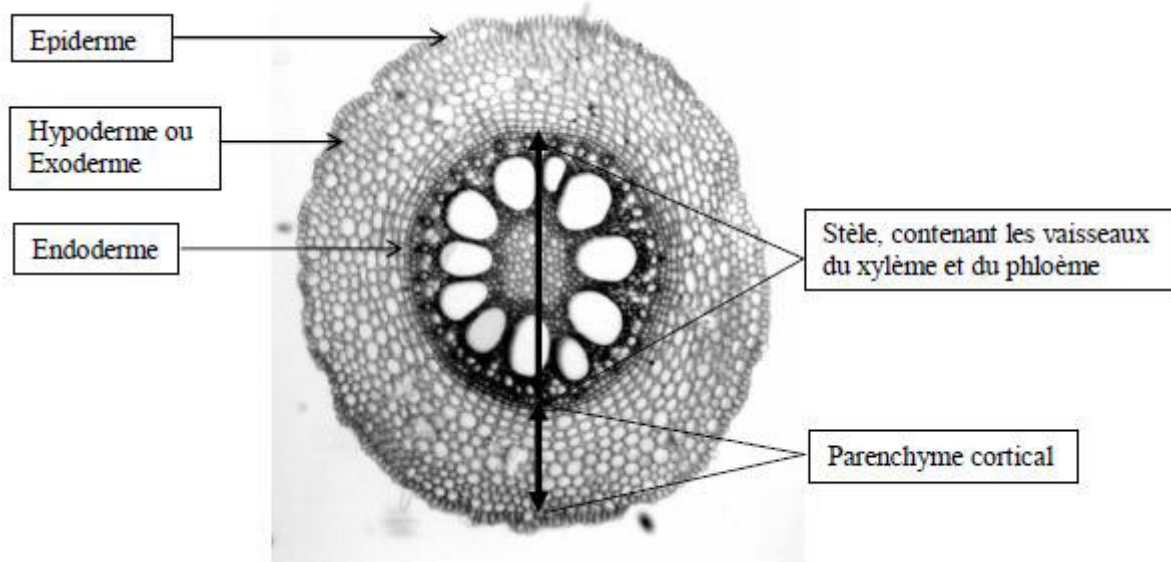


Figure 02 : Coupe transversale de racine principale de pois chiches cultivé en hydroponie.

IV -1-1-L'épiderme et ses poils absorbants

L'épiderme est la couche cellulaire la plus externe des racines, en contact direct avec le sol. Il fonctionne comme une interface entre la plante et le sol. Les cellules épidermales ont souvent des projections étroites appelées poils racinaires, qui s'étendent entre les particules de sol. Ces poils racinaires peuvent être plus ou moins denses, voire inexistantes (Peterson et Farquhar, 1996). Ils permettraient d'accroître la surface d'absorption et donc de favoriser l'absorption des nutriments. C'est une couche de cellules importante puisque sa position lui permet non seulement de prélever l'eau et les solutés, mais aussi d'assurer le rôle d'ancrage des racines dans le sol.

IV -1-2-Le cortex

Le cortex comprend trois tissus, caractérisés par les modifications de leurs parois et par leur localisation en coupe transversale : l'exoderme, le cortex central et l'endoderme. Le cortex central contient toutes les couches cellulaires se trouvant entre l'endoderme et l'exoderme.

IV -1-3-L'hypoderme ou l'exo-derme

Est la couche de cellules se trouvant juste sous l'épiderme. Comme les cellules de l'épiderme, celles de l'hypoderme peuvent subir une maturation et porter alors le nom d'exoderme dès qu'apparaît le premier stade de maturation caractérisé par les cadres de Caspary.

IV -1-4-Le cortex central

Est un tissu lâche formé de cellules parenchymateuses entre lesquelles se trouvent de nombreux espaces intercellulaires. Ces espaces sont remplis d'air même sous une pression hydrostatique positive. Lorsque l'exoderme est immature, le passage des ions de l'apoplasme vers le symplasme peut avoir lieu dans ces cellules corticales (Nagahashi *et al*, 1974).

IV -1-5-L'endoderme

Est une monocouche de cellules qui présente, à maturation, des bandes de Caspary ainsi que des lamelles de subérine. Cette subérine hydrophobe imperméabilise les parois de l'endoderme et contraignent ainsi l'eau et les solutés à traverser les membranes plasmiques pour parvenir aux vaisseaux de la stèle (Tinker et Nye, 2000). L'endoderme n'est pas mature dans l'apex et dans les zones de formation des racines latérales.

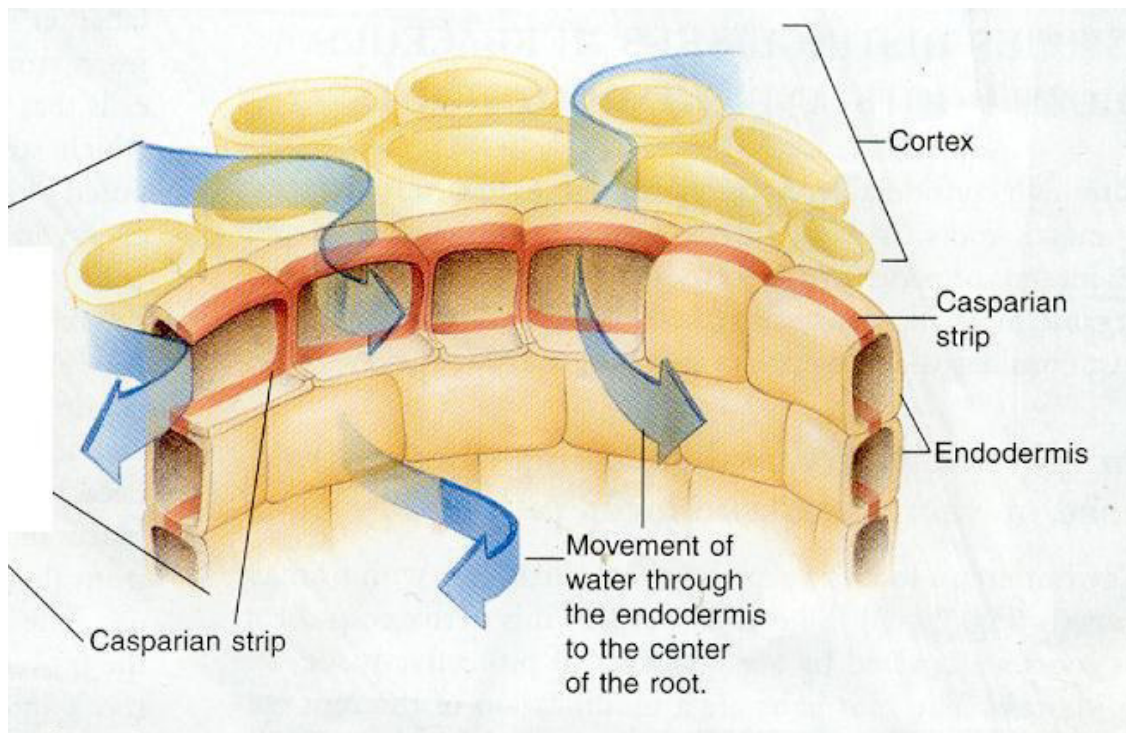


Figure 03 : Illustration du premier stade de maturation de l'endoderme, avec l'apparition de cadres ou « bandes » de Caspary dans les parois radiales des cellules endodermiques (<http://www.uic.edu/classes/bios/bios100/lectf03am/casparian.htm>).

IV-1-6-La stèle :

La stèle contient le cylindre de tissus le plus interne. Elle contient le péricycle, le xylème, le phloème, ainsi que les cellules parenchymateuses associées. Le xylème fonctionne en

Synthèse bibliographique

conduisant l'eau et les solutés vers les parties aériennes, tandis que le phloème conduit les produits de la photosynthèse des parties aériennes vers les racines, en particulier vers les apex en croissance et les tissus d'accumulation des racines.

Les ions se déplacent dans un premier temps dans l'apoplasme, pour ensuite traverser la membrane plasmique et entrer dans le cytoplasme. Une fois dans le cytoplasme, les ions peuvent passer d'une cellule à l'autre via les plasmodesmes (transport symplasmique), ou bien traverser le tonoplaste pour entrer dans la vacuole. C'est la combinaison du transport apoplasmique et symplasmique qui permet aux ions de se déplacer de la solution du sol vers la stèle.

IV -2-La structure anatomique de la tige

La tige est chez les plantes, l'axe généralement aérien, qui prolonge la racine et porte les bourgeons et les feuilles. La tige se ramifie généralement en branches et rameaux formant l'appareil caulinaire. Chez les arbres et les plantes ligneuses on distingue le tronc,

La tige diffère de la racine par la présence de nœuds où s'insèrent les bourgeons axillaires et les feuilles, par l'absence de coiffe terminale et par sa structure anatomique. La transition entre racine et tige se fait dans le « collet ». Il peut exister des tiges souterraines comme il existe des racines aériennes.

Par son mode de croissance et de ramification, la tige détermine le port de la plante; elle assure une fonction de soutien et une fonction de transport des éléments nutritifs entre les racines et les feuilles.



Figure 04 : schéma d'une coupe transversale dans une tige.

L'anatomie de la tige se caractérise par la disposition du xylème et phloème, ils n'alternent plus (comme c'est le cas de la racine) mais ils sont superposés, le xylème est interne (qui tend vers le centre) montre une différenciation centrifuge (le proto xylème près du centre et le méta xylème près de la périphérie) le phloème est externe (qui va vers la périphérie) et on observe un parenchyme médullaire important ainsi qu'une présence de tissus de soutien.

IV -2-1-L'épiderme

Constitué d'une couche de cellules juxtaposées. Leur paroi est peu épaisse et elles ne contiennent pas de chloroplaste.

IV -2-2-Le parenchyme cortical

Composé de grandes cellules polyédriques. Les cellules de la périphérie renferment des chloroplastes, mais leur nombre diminue au fur et à mesure qu'on s'enfonce vers l'intérieur.

Synthèse bibliographique

IV -2-3-Les tissus conducteurs

Rassemblés en amas superposés de xylème et de phloème. Le xylème, vers le centre de la tige, est coiffé, vers l'extérieur, par le phloème. Ce sont les faisceaux criblovasculaires (parfois encore appelés faisceaux libéroligneux). Les diamètres des cellules de xylème ne sont pas identiques, ils diminuent au fur et à mesure que l'on se rapproche du centre (le protoxylème à petit diamètre près du centre et le métaxylème à grand diamètre près de la périphérie). Le phloème lui non plus n'est pas homogène, même si les différences entre les cellules sont moins marquées. Il est possible de distinguer du proto phloème et du méta phloème. La différenciation du xylème est centrifuge dans la tige. On observe une moelle remplie par parenchyme formé de cellules très large.

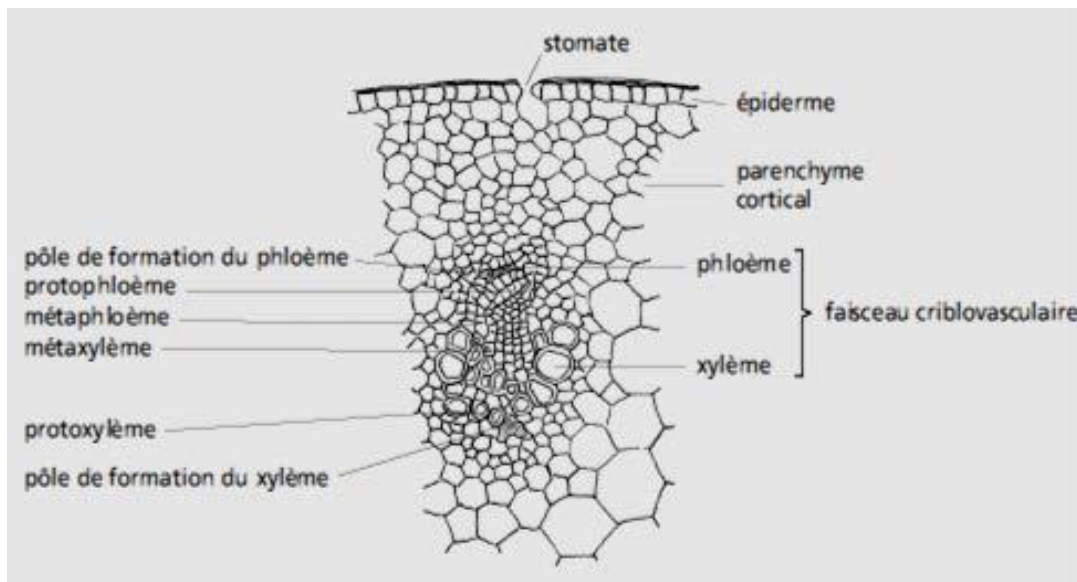


Figure 05: schéma d'une partie d'une coupe transversale dans une tige.

(<http://www.uic.edu/classes/bios/bios100/lectf03am/casparian.htm>).

Synthèse bibliographique

Cette partie, a pour but d'expliquer la méthodologie suivie par KISHWAR JAHAN Shethi et al (2020) qui ont travaillé sur l'évaluation de l'effet de Cd sur l'anatomie de la tige et de la racine de *Cicer arietinum L.* Dans des conditions de stress induites par des ions de métaux lourds comme le Cd.

I-1-Origine et historique du pois chiche

Le pois chiche est probablement originaire du Proche-Orient (Sud-est de la Turquie, Syrie) où trois espèces annuelles sauvages de pois chiches existent encore dans cette région. Il a été souvent mentionné que le pois chiche a conquis l'Europe durant le Moyen Âge après que les croisés l'ont redécouvert au Proche-Orient. Mais sa culture et sa consommation sont en réalité attestées bien avant, au moins dès le IX^e siècle, par des sources écrites et archéologiques. Le pois chiche est arrivé en Inde il y a seulement deux siècles en passant d'abord par l'Afghanistan. Le nom hindi des pois chiche est Kabuli chana (chana = pois chiche).

Les variétés à petites graines sont appelées Desi (locale). Les pois chiches sont connus et mentionnés depuis l'Antiquité, sous le nom d'hallaru (3000 ans avant JC) comme source alimentaire en Mésopotamie. En langue arabe il est nommé hullar. Le nom latin du genre pois chiche est *Cicer* dérivé du grec ancien kickere des populations du Nord de la Grèce. Les plus anciens témoignages mentionnant le pois chiche cultivé nous viennent de Turquie, et on suppose que cette culture s'est diffusée dans le monde entier à partir de cette région (Abdelguerfi-Laouar M. et al. 2001.).

I-2-Description de la plante pois chiche

Est une légumineuse annuelle, autogame, herbacée (Summerfield et Robert, 1985). Sa tige anguleuse a une hauteur de 0.20 à 1 mètre de haut, à port dressé, cultivée pousse graines rondes contenues au nombre de 1 ou 2 dans des gousses (Vander, 1972) (Figure1).



Figure 06 : Port générale de pois chiche (*Cicer arietinum L.*) (Amari, 2014).

I-3-Classification botanique de pois chiche Selon Spichiger et al, (2002)

Le plan taxonomique de pois chiche se rattache à :

Règne : végétal.

Embranchement : Spermaphytes.

Sous embranchement : Angiospermes.

Classe : Dicotylédones.

Sous- classe : Dialypitale.

Ordre : Fabales.

Famille : Fabacées.

Sous- famille : Papilionacées.

Genre : Cicer.

Espèce : *Cicer arietinum L.*



CHAPITRE II

Méthodologie Résultats et discussion



II -Méthodologie

Les graines de pois chiche (*Cicer arietinum L.*) var. BARI Chola 5 ont été collectées auprès de BARI et conservés dans des sachets en plastique hermétiques à 4 ° C. Les plantes ont été cultivées dans le sable.

Une solution de Hoagland à demi-concentration modifiée (12) a été utilisée comme solution nutritive. Les graines ont été stérilisées en surface avec de l'hypochlorite de sodium (4 à 7%) pour éviter toute infection fongique. Une solution de Hoagland à demi-concentration modifiée a été appliquée aux plantes témoins et une solution de 250, 500, 750 et 1000 μM de CdCl_2 a été appliquée pour traiter les plantes un jour sur deux jusqu'à 14 jours.

Pour l'anatomie de la racine et de la tige, la partie médiane de la racine et 2 cm au-dessus de la base de la tige ont été prises, respectivement. Pour l'anatomie des feuilles, le trichome et les stomates présents sur la face ventrale de la troisième feuille de la plante âgée de 14 jours ont été étudiés. Les coupes ont été colorées avec de la safranine et montées dans 20% de glycérine.

Des coupes transversales de racine, de tige et de feuille ont été étudiées sous un microscope optique composé (Nikon ECLIPSE E200) à différents grossissements. Des micrographies des coupes ont été prises à l'aide d'un appareil photo numérique (Nikon UFY-11A, Japon) fixé avec un microscope.

Les plantes ont été cultivées et maintenues en bon état et toutes les expériences ont été réalisées dans le laboratoire de physiologie végétale, biochimie et nutrition végétale, département de botanique, Université de Dhaka.

III- Les résultats

III -1-Racine

Par rapport au contrôle, le diamètre des racines a diminué chez les plantes traitées au Cd. Tant dans les racines témoins que traitées au Cd, l'épiderme était monocouche avec des cellules parenchymateuses à paroi mince. Cortex composé de cellules parenchymateuses à parois minces juste sous l'épiderme (Fig1).

III -1-1-Dans les racines de la plante témoin

12 à 14 couches de cellules corticales présentes alors que dans la racine de plante traitée au Cd, il était de 8 à 10 (Fig. 1a-e). Habituellement, les racines étaient caractérisées par la présence d'endoderme monocouche. Les cellules étaient en forme de tonneau dans les racines témoins et traitées au Cd. Dans les racines traitées au Cd, les cellules endodermiques étaient plus petites et à parois épaisses par rapport à la racine de la plante témoin (Fig. 1f). Le péricycle était monocouche juste sous l'endoderme à la fois dans la plante témoin et traitée (figures 1f-j). Des changements structurels remarquables induits dans le tissu racinaire par l'exposition de la plante au Cd se sont produits dans le système vasculaire.

III -1-2-Dans la racine traitée au Cd

Le diamètre des vaisseaux du méta xylème a diminué. Des vaisseaux de méta xylème plus petits ont également été trouvés dans la racine traitée au Cd (figures 1g-j). La moelle parenchymateuse était plus petite dans les racines des plantes traitées au Cd (Fig. 1b e). Des effets négatifs similaires ont été observés sur les traits anatomiques des racines des plantes.

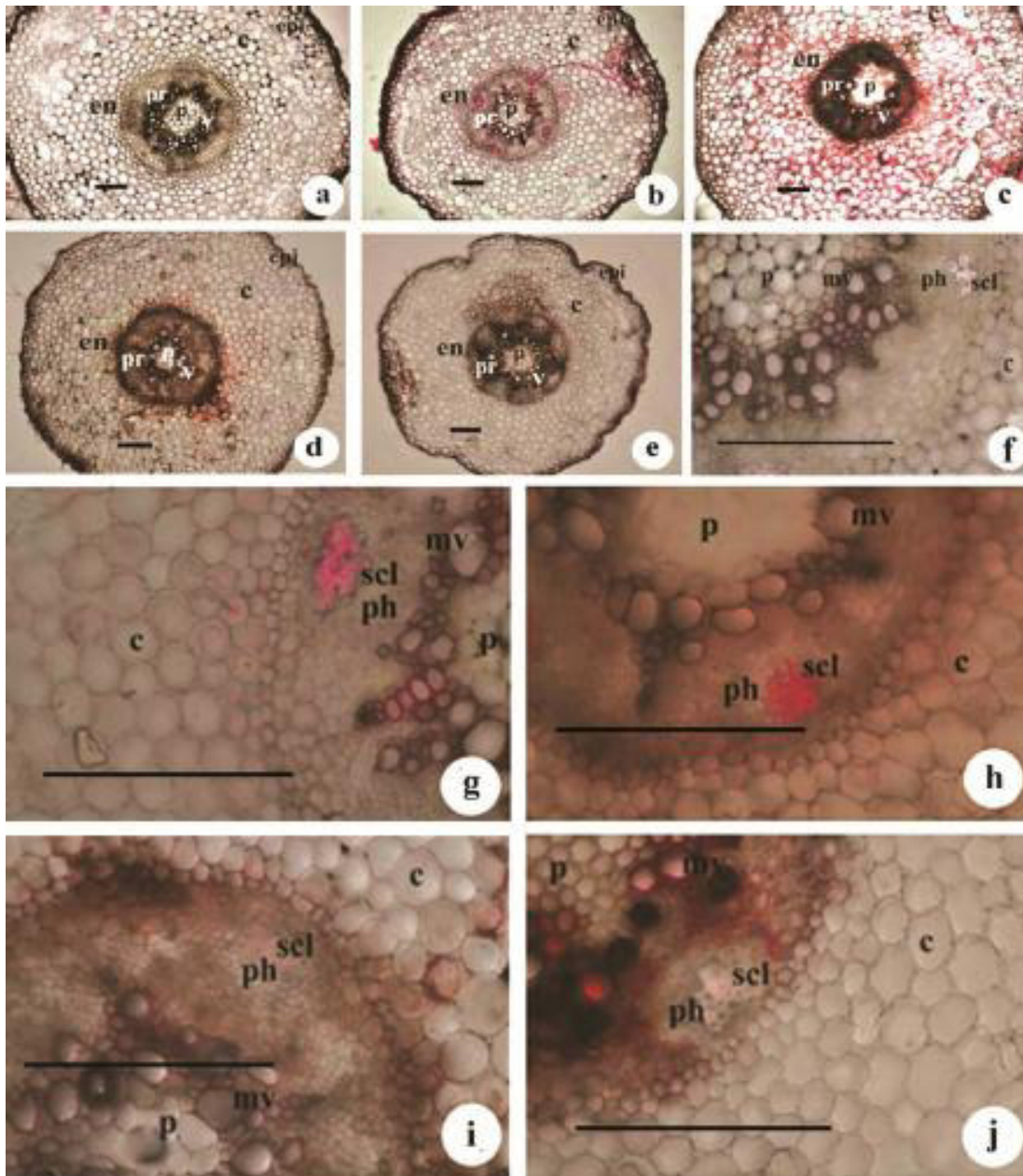


Figure 07: Coupe transversale de la racine sous un grossissement de 40X.

●coupe transversale sous un grossissement de 40X. [Témoin (a), 250(b), 500(c), 750 (d), 1000 (e) uM].

*plante traitée au Cd montrant l'épiderme (épi), le cortex (c), l'endoderme (en), le tissu vasculaire (v), la moelle (p) et péricycle (pr).

●Coupe transversale de la racine sous un grossissement de 400X [contrôle(f), 250 (g), 500(h), 750, 1000(j) um].

*plante traitée au Cd montrant cortex (c), endoderme (en), méta vaisseau (mV), moelle (p) et sclerenchyma (scl). Barre = 50 μ m.

III -2-la tige

Le diamètre de la tige a diminué dans la tige traitée au Cd. Ce diamètre plus petit était lié à la réduction de la taille des cellules et également à la réduction de la taille des éléments vasculaires. La tige a un contour circulaire dans la plante témoin alors qu'elle est légèrement ondulée dans la tige traitée au Cd (Fig. 2a-e). Dans la tige des échantillons témoins et traités au Cd, l'épiderme était monosériate où les cellules étaient allongées radialement. Cependant, dans le Cd, les cellules épidermiques souches étaient plus épaisses. La cellule épidermique s'est développée sous forme de trichome. Des trichomes glandulaires multicellulaires ont été trouvés à la fois dans la tige témoin et traitée au Cd. Les trichomes étaient nombreux dans la tige traitée au Cd par rapport à la tige témoin (figures 2c-e). L'augmentation du nombre de trichomes fait référence au mécanisme de défense en réponse au stress. Par rapport au témoin (figure 2a), les trichomes étaient plus longs et la tête du trichome était endommagée à des concentrations plus élevées (1000 μ M) de Cd (figure 3b). Ces dommages indiquent que l'effet toxique augmente avec l'augmentation de la concentration de Cd. Les cellules corticales de la tige traitée au Cd occupaient une superficie plus petite que celle de la tige témoin (figures 2a-e). Le nombre de couches corticales était de 10 à 12 alors qu'il était de 14 à 16 dans la plante témoin.

Les faisceaux vasculaires étaient disposés radialement. Une croissance secondaire a été observée dans la tige de la tige témoin et traitée au Cd. Dans la tige traitée au Cd, l'anneau de cambium était mince. La taille et le nombre de vaisseaux de xylème ont été réduits dans la tige traitée au Cd (figures 2g-j). Groupes de Sclérenchyme se superposaient au phloème. Le nombre de plaques sclérenchymateuses a augmenté dans la tige traitée au Cd (Figs 2g-j). Une apparence modérée des éléments xylème et phloème de la tige par rapport aux échantillons témoins, respectivement (14,15). Des composés phénoliques ont été trouvés dans un récipient de plus forte concentration de tige traitée au Cd Figs 2i-j).

Une grande partie du Cd absorbé par les plantes est retenue dans les racines, mais une partie est transférée vers les parties aériennes de la plante en général. Par conséquent, des modifications minimales des caractéristiques anatomiques des feuilles ont été observées.

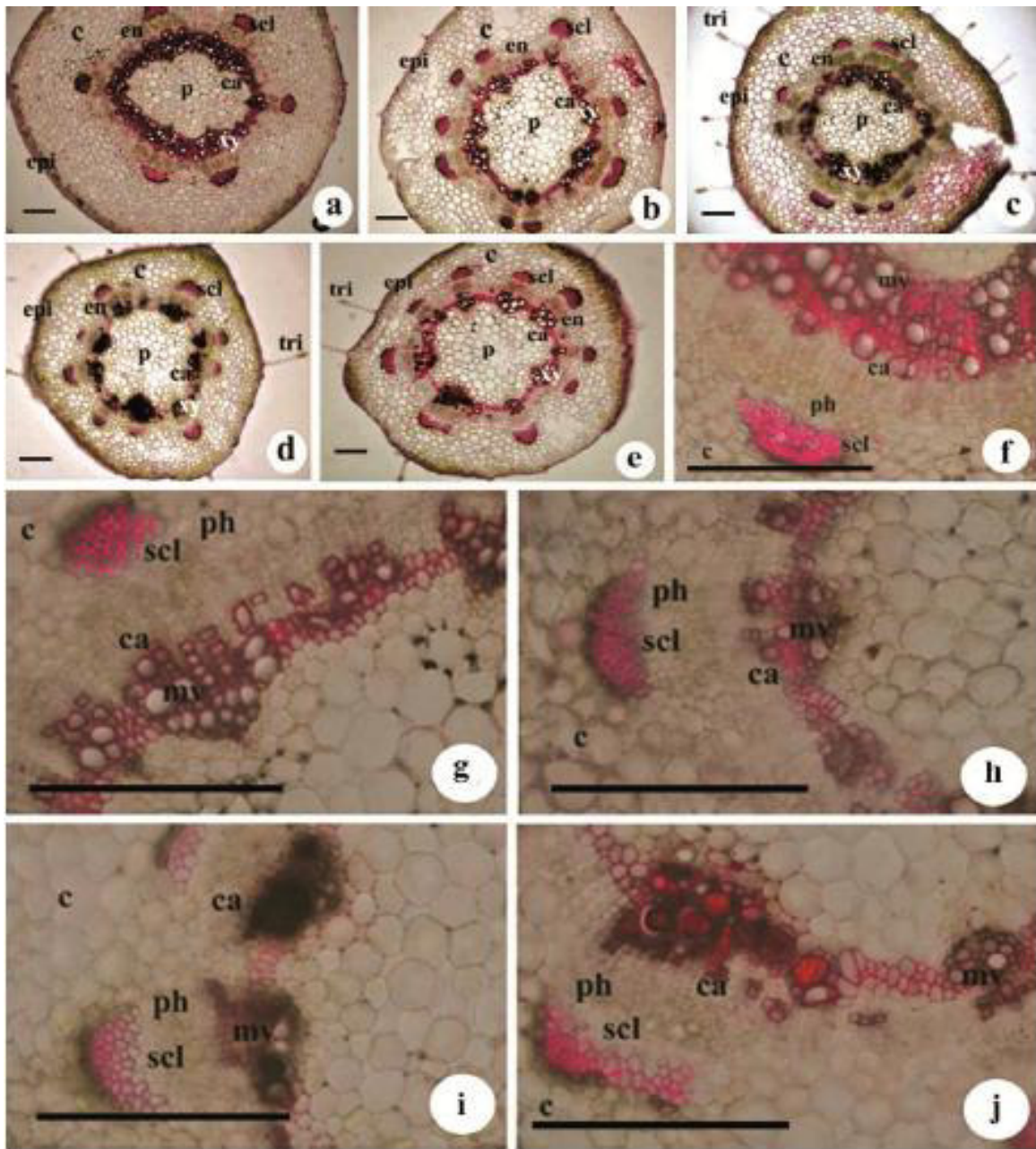


Figure 08 : Coupe transversale de la tige de pois chiche sous un grossissement de 40X.

- **Figure 08** Coupe transversale de la tige de pois chiche sous un grossissement de 40X. a – témoin(a), 250 (b), 500 (c) ,750 (d), 1000(e).

*plante traitée au Cd montrant l'épiderme (épi), le cortex (c), l'endoderme (en), le xylème (xy), la moelle (p), cambium (ca), schlerenchyme (scl) et péricycle (pr).

III -2-3-Les feuilles

* La concentration de Cd avait été signalée (Sridhara BBM, et al 2005.). La largeur de la nervure médiane ainsi que la partie laminaire ont diminué dans les plantes traitées au Cd (figures 3d-g) par rapport à la figure 3c témoin). Aucun changement significatif n'a été trouvé dans l'épiderme et le tissu mésophile des deux traités au Cd et contrôler les feuilles de la plante. Le faisceau vasculaire collatéral était situé au centre de la nervure médiane et entouré d'une gaine de faisceau parenchymateux. La zone vasculaire de la feuille traitée au Cd est devenue plus petite que celle de la feuille témoin (figures 3c-g). L'effet combiné du Cu et du Cd a entraîné une diminution des caractères structuraux des feuilles comme l'épaisseur de la nervure médiane, de l'épiderme supérieur, du parenchyme et du faisceau vasculaire chez les semis de maïs (Gowayed SMH and Almaghrabi OA 2013.). Des caractéristiques anatomiques des feuilles de xérophytes induites par le Cd (c -d. Lame épaisse, épiderme supérieur, mésophile de la palissade, rapport élevé de l'épaisseur de la palissade à l'épaisseur spongieuse, ainsi que des stomates abondants et petits) avaient été observées (Shi G and Cai Q 2008), ce qui n'était pas conforme aux résultats.

Dans la feuille d'une plante traitée au Cd âgée de 14 jours, les stomates étaient ouverts chez le témoin tandis que le traitement au Cd provoquait la fermeture des stomates du plant (Fig. 3 h-j). La fermeture des stomates pourrait être due à une augmentation du taux d'acide abscisique et à une diminution du taux de photosynthèse par Cd.

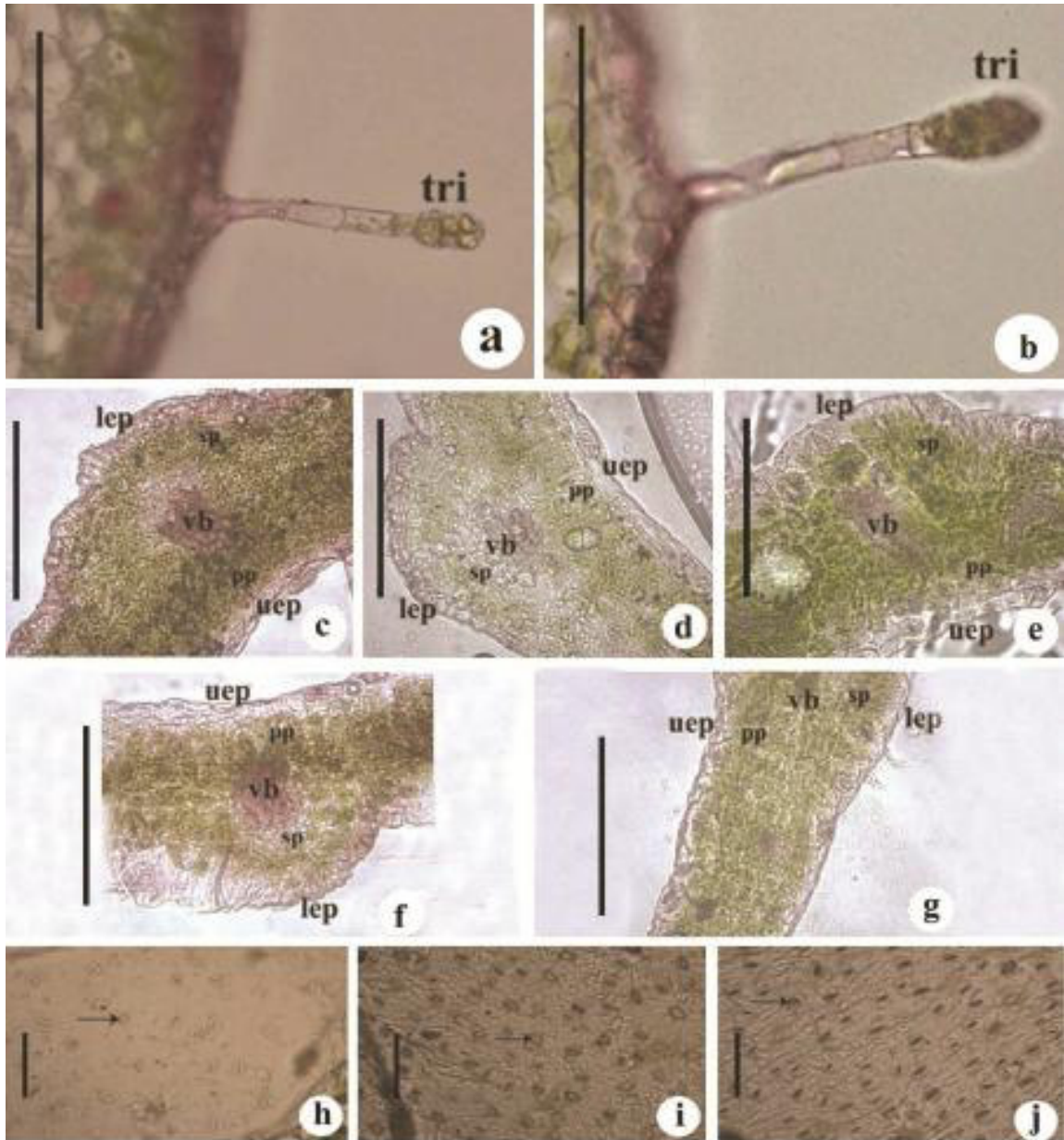


Figure 09 : Coupe transversale de la tige de pois chiche sous un grossissement de 1000X.

● **Figure 09** Coupe transversale de la tige de pois chiche sous un grossissement de 1000X. Témoin (a), 1000 (b) μM Cd traité.

● plante montrant un trichome (tri). Coupe transversale de la feuille de pois chiche sous un grossissement de 400X, {contrôle(c), 250 (d), 500 (e), 750 (f), 1000(g) μM }

● Plante traitée au Cd montrant l'épiderme supérieur (uep), l'épiderme inférieur (lep), le faisceau vasculaire (vb), le parenchyme palissade (pp) et parenchyme spongieux (sp). Peler la feuille de pois chiche h - contrôle, i - 250 μM et j - 1000 μM Cd traitement montrant les

Méthodologie Résultats et discussion

stomates ouverts et fermés et la cellule de garde sous un grossissement de 100X. Barre = 50 μm .

*Aussi ont montré une dégénérescence progressive de différentes caractéristiques anatomiques dans les sections transversales de la racine, de la tige et des feuilles sous contrainte de Cd. L'apparence sous-normale des éléments du xylème et du phloème était significative dans tous les organes étudiés, à savoir la racine, la tige et la feuille, par rapport au contrôle qui indiquait un effet toxique du Cd conduisant à une conduction modérée de l'eau et des photosynthèses. De plus, les changements sur les traits anatomiques dépendaient quelque peu de la concentration de Cd car les changements étaient plus prononcés avec l'augmentation de la concentration de Cd. Même l'effet du Cd chez une espèce tolérante *Schinus molle* dépendait de la concentration et, à de faibles concentrations de Cd, ces plantes pouvaient faire face à la toxicité en ajustant la structure et la fonction des feuilles (Pereira MP et al, 2016.). Ainsi, la présente enquête a révélé que le Cd avait des effets néfastes sur les structures anatomiques de cette plante avec une concentration croissante de Cd, bien que ait eu du mal à minimiser ces effets en modifiant dans une certaine mesure les structures cellulaires. D'autres études des structures anatomiques en relation avec la croissance et les changements biochimiques amélioreront la compréhension des auteurs à la réponse cellulaire des plantes à la toxicité du Cd chez les plantes cultivées.

CONCLUSION :

L'adaptation des végétaux aux conditions contraignantes de leur environnement nécessite des modifications morphologiques, métaboliques et moléculaires. Ces changements doivent aider à la fois à minimiser les effets nocifs des stress et permettre à la plante de survivre.

D'après les résultats, le stress causé par la présence du cadmium dans la solution nutritive, engendre des désordres relatifs à la croissance des plantules.

Cette plante a montré une dégénérescence progressive de différentes caractéristiques anatomiques dans les coupes transversales des racines, des tiges et des feuilles sous contrainte de Cd. Apparence sous-normale du xylème et les éléments du phloème étaient significatifs dans tous les organes étudiés, à savoir la racine, la tige et feuille par rapport au témoin qui indiquait un effet toxique du Cd conduisant à une conduction de l'eau et la photosynthèse.

De plus, les changements sur les traits anatomiques ont dépendait quelque peu de la concentration de Cd car les changements étaient plus prononcés avec augmentation de la concentration de Cd. Même l'effet du Cd chez une espèce tolérante était dépendant de la concentration et à de faibles concentrations de Cd, cette plantes pourrait faire face toxicité en ajustant la structure et la fonction des feuilles (Pereira et al, 2016.). Ainsi la présente enquête a révélé que le Cd avait des effets néfastes sur les structures anatomiques de plusieurs plante avec augmentation de la concentration de Cd bien que la plante ait eu du mal à minimiser ces effets en modifier dans une certaine mesure les structures cellulaires.

Autres études sur les structures anatomiques en relation avec la croissance et les changements biochimiques amélioreront la compréhension des auteurs aux réponses cellulaires des plantes à la toxicité du Cd chez les plantes cultivées.

Référence Bibliographique

A

- * Abdelguerfi-Laouar M., Zine F., Bouzid L., Laib M. et Kadri A., 2001. Caractérisation préliminaire de quelques cultivars de *Cicer arietinum* L. Collectés dans la région de Tizi Ouzou. Revue INRA n°7: 51-65.
- * Adriano D C, 2001. Copper *In* Trace elements in terrestrial environments, biogeochemistry, bioavailability, and risks of metal, Ed D C Adriano. pp 499-546.
- * Ahmad SH, Reshi Z, Ahmad J and Iqbal M 2005. Morpho-anatomical responses of *Trigonella foenum-graecum* Linn. To induced cadmium and lead stress. J. Plant Biol. 48 (1): 64-84.
- * Alcántara E., Romera F.J., Cañete M. ET De la Guardia M.D., 1994. Effects of heavy metals on both induction and function of root Fe (III) reductase in Fe-deficient cucumber (*Cucumis sativus* L.) plants. J. Exp. Bot. 45: 1893-1898.
- * Alloway B.J., 1995. Soil processes and the behaviour of heavy metals. In: Alloway, B.J. Ed. Heavy metals in soils. Chapman & Hall, London, 11-35.
- * Amari N., 2014. Etude du choix de ponte de la bruche du Niébe *Callosobruchus maculatus* en présence de différents variétés d'haricot et de pois chiche, et influence de quelques huiles essentielles (Cédré, Ciste et Eucalyptus) sur activité biologique de l'insecte. Mémoire de mastère en biologie. Option, Interaction plantes, animaux dans les écosystèmes naturels et cultivés, Université de Tizi-Ouzou : 117p.
- * Arduini I., Masoni A., Mariotti M. et Ercoli L., 2004. Low cadmium application increase miscanthus growth and cadmium translocation. Environ. Exp. Bot. 52: 89-100.

B

- * Baize D, 1997. Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France). INRA Editions, Paris, 408 pp.
- * Baize D. et Tercé M., 2002. Les éléments traces métalliques dans les sols. Approches fonctionnelles et spatiales. Inra Editions, Paris, 565 p.
- * 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.
- * Boulila Zoghلامي L., Djebali W., Chaïbi W., Ghorbel M.H., 2006. Physiological and structural modifications induced by cadmium calcium interaction in tomato (*Lycopersicon esculentum*). C. R. Biol. 329: 702-711. * Bourrelier P.H. et Berthelin J., 1998. Contamination des sols par les éléments en traces : les risques et leur gestion. Académie des Sciences, rapport 42, août 1998, Lavoisier Tec. Et Doc. 440.

Référence Bibliographique

C

- *Cataldo D.A., McFadden K.M., Garland T.R. et Wildung R.E., 1988 Organic constituents and complexation of nickel(II), iron(III), cadmium(II) and potonium (IV) in soybean xylem exsudates. *Plant Physiol* 86: 734-739.
- *Chandler JN and Bartels D 2008. Drought : Avoidance and adaptation. *In: SW Trimble, BA Stewart and TA Howel eds, Encyclopedia of Water Science. Taylor and Francis Group, London. pp. 224.*
- *Chaoui A. ET El Ferjani E., 2004. Impact of cadmium and copper excess on cell wall peroxidases in Pea stems. *Pak J. Biol. Sci.* 7: 902-904.
- *CHOLEWA, E. (2000). Calcium transport and delivery to the xylem in onion (*Allium cepa* L.) roots. In *PhD thesis.* , University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada.
- *Clarkson DT and Luttge U 1989. Mineral nutrition: Divalent cations, transport and compartmentalization. *Prog. Bot.* 51: 93-112.
- *Clemens S., Palmgren M.G. ET Krämer U., 2002. A long way ahead: understanding and engineering plant metal accumulation. *Trends Plant Sci* 7: 309-315.
- *Clemens S., 2006. Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants. *Biochimie* 88: 1707-1719.
- *Cutler J.M. ET Rains D.W., 1974. Characterization of cadmium uptake by plant tissue. *Plant Physiol* 54: 67-71.

D

- *Dahmani-Müller H., Van Oort F. ET 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.
- *Dafré A.L., Sies H. et Akerboom T., 1996. Protein S-thiolation and regulation of microsomal glutathione transferase activity by the glutathione redox couple. *Arch. Biochem. Biophys.* 332: 288-294.
- *Das P., Samantaray S. ET Rout G.R., 1997. Studies on cadmium toxicity in plants: a review. *Environ. Pollut.* 98: 29-36.
- *De La Rosa G., Peralta-Videa J.R., Montes M., Parsons J.G., Cano-Aguilera I. et Gardea-Torresdey J.L., 2004. Cadmium uptake and translocation in tumbleweed (*Salsola kali*), a potential Cd-hyperaccumulator desert plant species: ICP/OES and XAS studies. *Chemosphere* 55: 1159-1168.

E

Référence Bibliographique

*Elmsley J, 2001. Nature's Building Blocks. A A-Z guide to the elements. Oxford University Press, Oxford, UK.

*Elmayan T. ET Tepfer M., 1994. Synthesis of a bifunctional metallothionein/betaglucuronidase fusion protein in transgenic tobacco plants as a means of reducing leaf cadmium levels. *Plant J* 6: 433-440.

*ENSTONE, D.E. ET PETERSON, C.A. (1992). The apoplastic permeability of root apices. *Canadian Journal of Botany*, 70, p 1502-1512.

F

*Fabrégat S., 2010. Les métaux lourds : une pollution de long terme : l'air à bout de souffle. www.actu-environnement.com.

* Fediuc E., Lips S.H. et 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.

*Franklin ,2005; Huynh, 2009 ; Migeon, 2009 Les éléments traces métalliques dans les sols. Approches fonctionnelles et spatiales. Inra Editions, Paris, 565 p.

G

*Ghnaya T., Nouairi I., Slama I., Messedi D., Grignon C., Abdely C. et Ghorbel M.H., 2005. Cadmium effects on growth and mineral nutrition of two halophytes: *Sesuvium portulacastrum* and *Mesembryanthemum crystallinum*. *J. Plant Physiol.* 162: 1133-1140.

*Godt J., Scheidig F., Grosse-Siestrup C., Esche V., Brandenburg P., Reich A. ET Groneberg D., 2006. The toxicity of cadmium and resulting hazards for human health. *J. Occup. Med. Toxicol.* 1: 22-27.

*Godin 1985 ; Franklin ,2005; Huynh, 2009 ; Migeon, 2009 Les éléments traces métalliques dans les sols. Approches fonctionnelles et spatiales. Inra Editions, Paris, 565 p.

*Gowayed SMH and Almaghrabi OA 2013. Effect of copper and cadmium on germination and anatomical structure of leaf and root seedling in maize (*Zea mays* L.). *Australian Journal of Basic and Applied Sciences* 7(1): 548-555.

H

*Hart J.J., Welch R.M., Norvell W.A., Sullivan L.A. ET Kochian L.V. 1998b. Characterization of cadmium binding, uptake, and translocation in intact seedlings of bread and durum wheat cultivars. *Plant Physiol* 116: 1413-1420.

*Hasenstein K.H., Evans M.L., Stinemetz C.L., Moore R., Fondren W.M., Koon E.C., Higby M.A. ET Smucker A.J., 1988. Comparative effectiveness of metal ions in inducing curvature of primary roots of *Zea mays*. *Plant Physiol.* 86: 885-889.

Référence Bibliographique

*Henson M.C., Chedrese P.J., 2004. Endocrine disruption by cadmium, a common environmental toxicant with paradoxical effects on reproduction. *Exp Biol. Med (Maywood)* 229: 383-392.

K

*Kasim WA 2006. Changes Induced by Copper and cadmium stress in the anatomy and grain yield of *Sorghum bicolor* (L.) Moench. *Iin. J. Agri. & Bio.* 1: 123-128.

*Khudsar T, Muzzafar and M Iqbal 2001. Cadmium-induced changes in leaf epidermis, photosynthetic rate and pigment concentrations in *Cajanus Cajan*. *Biol. Pl.* 44: 59-64.

*Kazantzis G., 1979. Renal tubular dysfunction and abnormalities of calcium metabolism in cadmium workers. *Environ. Health Perspect* 28 : 155-159.

*Kuboi T., Noguchi A. et Yazaki J., 1986. Family-dependent cadmium accumulation characteristics in higher plants. *Plant Soil* 92: 405-415.

L

*Larbi A., Morales F., Abadía A., Gogorcena R., Lucena J. et 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.

M

* McBride M.B., 1980. Chemisorption of Cd on calcite surfaces. *Soil Sci Soc Am J* 44: 26-33.

*MacRobbie E.A. et Kurup S., 2007. Signalling mechanisms in the regulation of vacuolar ion release in guard cells. *New Phytol.* 175: 630-640.

*Mallick N; Rai LC, 2002. Physiological responses of non-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. 111-147.

*MANE, V.B., SAVANT, N.K. et SHINGTE, A.K. (1970). Relationship between cation exchange capacity of roots and mineral composition of plant tops influences by age. *Plant and Soil*, 33, p 113-119.

*Marschner H, 1995. Mineral nutrition of higher plants. Academic Press, London. 889 p.

*McLaughlin M.J. ET Singh B.R., 1999. Cadmium in soil and plants. Eds. Kluwer Academic Publisher, Dordecht, Netherlands, 273p.

Référence Bibliographique

*Mensh M. ET Baize D., 2004. Contamination des sols et de nos aliments d'origine végétale par les éléments en traces, mesures pour réduire l'exposition. Courrier de l'environnement de l'INRA 52 : 31-54.

*Miquel MG, 2001. Les effets des métaux lourds sur l'environnement et la santé, rapport de l'office parlementaire des choix scientifiques (Sénat).

*Mirlean N., Roisenberg A. et Chies J.O., 2007. Metal contamination of vineyard soils in wet subtropics (southern Brazil). *Environmental Pollution* 149: 10-17.

*Mondal NK, Das C, Roy S, Datta JK and Banerje 2013. Effect of varying cadmium stress on chickpea (*Cicer arietinum* L) seedlings: An ultrastructural study. *Annals of Environmental Science* 7: 59-70.

N

*NAGAHASHI, G., THOMPSON, W. ET LEONARD, R. (1974). The Casparian strip as a barrier to the movement of lanthanum in corn roots. *Science*, 183, p 670_671.

*Nieboer E; Richardson DHS; 1980. The replacement of the nondescript term «heavy metal» by a biologically and chemically significant classification of metal ions. *Environ. Pollut.*1: 3-26.

P

*Pereira MP, Rodriguez LCA, Correa FF, Ribeiro VE and Pereira FJ 2016. Cadmium tolerance in *Schinus molle* trees is modulated by enhanced leaf anatomy and photosynthesis. *Trees* 30(3): 807-814.

* Perfus-Barbeoch L., Leonhardt N., Vavasseur A. ET Forestier C., 2002. Heavy metal toxicity: cadmium permeates through calcium channels and disturbs the plant water status. *Plant J.* 32: 539-548.

*Pereira MP, Rodrigues LCA, Correa FF, Ribeiro VE and Pereira FJ 2016. Cadmium tolerance in *Schinus molle* trees is modulated by enhanced leaf anatomy and photosynthesis. *Trees* 30(3): 807-814.

*PETERSON, R.L. ET FARQUHAR, M.L. (1996). Root hairs: specialized tubular cells extending root surfaces. . *The Botanical Review*, 62, p 1-40.

*Polle A. ET Schützendübel A., 2003. Heavy metal signalling in plants: linking cellular and organismic responses. In H Hirt, K Shinozaki, eds. *Plant Responses to Abiotic Stress*, Springer-Verlag, Berlin 4: 187-215.

Référence Bibliographique

*Pokorny B., Sayegh-Petkovsek S., Ribaric-Lasnik C., Vrtacnik J., Doganoc D.Z. et Adamic M., 2004. Fungi ingestion as an important factor influencing heavy metal intake in roe deer: evidence from faeces. *Sci. Total Environ.* 324: 223-234.

R

*Raskin I; Ensley BD; Salt DE, 1997. Phytoremediation of metals: using plants to remove pollutants from the environment. *Current Opinion in Biotechnology* 8, 221-226.

*Robert M ; Juste C, 1999. Dynamiques des éléments traces de l'écosystème sol. Dans: Association ECRIN éd., Spéciation des Métaux dans le Sol, Les cahiers des clubs CRIN, Club CRIN Environnement et Ministère de l'Environnement, Paris. 15-37.

S

*Salt D.E., Prince R.C., Pickering I.J. ET Raskin I., 1995. Mechanisms of Cadmium Mobility. And Accumulation in Indian Mustard. *Plant Physiol.* 109: 1427-1433.

*Sanità di Toppi L. Et Gabbrielli R., 1999. Response to cadmium in higher plants. *Environ Exp Bot* 41: 105-130.

*SATTELMACHER, B. (2001). The apoplast and its significance for plant mineral nutrition. *New Phytologist*, 149, p 167-192.

*Sela M., Garty J. ET Tel-Or E., 1989. The accumulation and the effect of heavy metals on the water fern *Azolla filiculoides*. *New Phytol* 112: 7-12.

*Sharma S.S. et Kumar V., 2002. Responses of wild type and abscisic acid mutants of *Arabidopsis thaliana* to cadmium. *J Plant Physiol* 159: 1323-1327.

*Shi G and Cai Q 2008. Photosynthetic and anatomic responses of peanut leaves to cadmium stress. *Photosynthetica* 46(4):627-630.

*Stobart A.K., Griffiths W.T., Ameen-Bukhari I. ET Sherwood R.P., 1985. The effect of Cd²⁺ on the biosynthesis of chlorophyll in leaves of barley. *Physiol. Plant* 63: 293-298.

*Sridhara BBM, Diehl SV, Han FX, Monts DL and Su Y 2005. Anatomical changes due to uptake and accumulation..... *Environ. and Exp. Bot.* 54(2): 131-141.

*Sterckeman.T., Douay.F., Proix.N & Fourrier.H. (2008).Contamination des sols vers la profondeur à Noyelles-Godault et Aubry. In: Un point sur....les éléments traces métalliques dans les sols approches fonctionnelles et spatiales. INRA. Editions . Paris. p565.

*STRUGGER, S. et PEVELING, E. (1961). Die electronenmikroskopische Analyse der extrafaszikularen Komponente der Transpirations-stromes mit Hilfe von Edelmetallsuspensoiden adaquater Dispersitat. *Ber Dtsch Bot Ges*, 74, p 300-304.

T

Référence Bibliographique

*Taylor K, Albrigo LG and Chase CD 1988. Zinc complexation in the phloem of blight affected citrus. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* **113**: 407-411.

*Thurman DA and Collins JCL 1983. Metal tolerance mechanism in higher plants review. *In: Proceedings of International Conference on Heavy Metals in the Environment*, pp. 298-300. CEP Consultan's Edimburg, Heidelberg.

*TINKER, P.B. ET NYE, P.H. (2000). Solute movement in the rhizosphere. Oxford University Press, Oxford, pp. 444.

*Turner MA 1997. Effect of cadmium treatment on cadmium and zinc uptake by selected Vegetable species. *J. Environ. Qual.* **2**: 118-119.

*Tran TA, Paunova S, Nedeva D and Popova L 2011. Nitric oxide alleviates cadmium toxicity on photosynthesis in pea plants. *C. R. Acad. Bulg. Sci.* **64**: 1137-1142.

V

* Vander Maessen L. J.C., 1972. *Cicer L*, a monograph of the genus, with special reference to the chickpea (*Cicer arietinum L*), its ecology and cultivation. Meddling land bouw bog school wagenigen, Nederland : 72p.

*Vassilev A. ET Yordanov I., 1997. Reductive analysis of factors limiting growth of cadmium-treated plants: a review. *Bulg. J. Plant Physiol.* **23**: 114-133.

W

*Wagner G.J., 1993. Accumulation of cadmium in crop plants and its consequences to human health. *Adv Agron* **51**: 173-212.

Annexe

Elément	Teneurs normales	Teneurs en excès ou Toxiques	Teneurs tolérables pour plantes de grande culture
Cd	0,05-0,2	5-30	3
Cr	0,1-0,5	5-30	2
Cu	5-3	50	50
Hg	-	0,5-1	-
Ni	0,1-5	10-100	50
Pb	5-10	30-300	10
Se	0,01-2	5-30	-
Zn	27-150	100-400	300

,

Tableau 1: Concentration en éléments traces dans les parties aériennes de plantes (mg/kg MS) (Kabata-Pendias et Pendias, 1992).

éléments essentiels majeurs	Oligo- éléments essentiels	éléments essentiels en ultra trace	éléments non-essentiels
Calcium, Phosphore, Potassium, Soufre, Manganèse, Chlore, sodium	Fer, Iode, Cuivre, Manganèse ? Zinc, Cobalt, Molybdène, Sélénium, Chrome, Nickel, Vanadium, Silicone, Arsenic	Lithium, Fluor, Aluminum, Etain, Plomb, (Cadmium).	Cadmium Mercure

Tableau 2 : les principaux éléments métalliques essentiels et non essentiels (Hopkins, 1989).