

République Algérienne Démocratique et Populaire
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Université de M'Hamed Bougara, Boumerdes
جامعة امحمد بوقرة -بومرداس

Faculté des Sciences
Département de Biologie



Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master en Biologie

Domine : Science de la nature et de la vie

Filière : Ecologie et Environnement

Spécialité : Biodiversité et Environnement

Thème

Synthèse de données sur l'effet du cadmium sur le contenu en composés phénoliques chez quelques espèces végétales

Présenté par : M^{elle} DIGUER Asma, M^{elle} SID Somia, M^{elle} BOUYAHIAOUI Meryem

Soutenu publiquement le 28/09/2021 devant le jury composé de :

- | | | | |
|---------------------|------------------------|----------|------------|
| ▪ Mr. BELLOUT.Y | Maitre de Conférence B | à l'UMBB | Président |
| ▪ Mr. HARITI .M | Maitre Assistant A | à l'UMBB | Examineur |
| ▪ Mme. BENHABILAS.K | Maitre de conférence B | à l'UMBB | Promotrice |

-Promotion: 2020/2021-

Remerciements

*Il est primordial de remercier « **ALLAH** » le Tout-Puissant de tout ce qu'il nous apporte dans la vie et de nous avoir donné la force et le courage pour réaliser ce modeste travail.*

*Nous tenons tout d'abord à exprimer notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à notre encadreur, Mme **BENHABILAS**.*

*Nos respects et notre reconnaissance vont au Monsieur **BELLOUT Yacine**, pour avoir accepté de présider ce jury, qu'il trouve ici le témoignage de notre profonde considération.*

*Nous tenons à remercier Monsieur **HARITI M'hamed**, d'avoir accepté d'examiner ce mémoire.*

*Sans oublier de remercier le chef de spécialité Monsieur **AMGHAR Karim Fateh**, pour leur serviabilité durant toutes ces années d'étude.*

Un grand merci pour tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Dédicace

Je dédie ce modeste mémoire à :

*Mes chères parents, que nulle dédicace ne puisse exprimer ce que je leurs
dois, pour tous leurs sacrifices, leur bienveillance, leur amour, leur tendresse
et leur prières tout au long de mes études. Que ce travail soit témoignage de
ma grande reconnaissance « Que Dieu vous garde »*

Ma petite et unique sœur Bouchra

*Toutes mes adorables amies: Selma, Farah, Narimane, Khaoula, l'ham, Imare
et Meriem ...*

Les deux familles : Diquer et Doucene du petit au grand

Je vous aime tous



Asma

Dédicace

Chers parents **Ali** et **Fatma**, quoique je fasse ou que je dise je ne saurais jamais vous remercier comme il se doit. C'est avec une énorme reconnaissance et une grande émotion que je vous dédie ce travail

Merci pour votre soutien, votre compréhension, vos sacrifices, vos encouragements et vos précieux conseils tout au long de ma vie et pour l'appui que vous m'avez apporté durant toutes mes années d'études. Vous êtes et vous serez à jamais ma plus grande force, ma fierté et la source de mon bonheur, que Dieu vous garde pour moi, je vous aime infiniment.

C'est avec un grand plaisir que je dédie ce travail pour mes adorables frères **Samir**, **Kamel**, **Rabah**, **Djamel**, **Mohamed**, **Mourad**, **Karim**, **Nabil** et ma Sœur **Malak**, qui comptent énormément dans ma vie, que Dieu vous bénisse.

Mes dédicaces s'orientent aussi vers mes **nièces** et pour **ma grande famille** sans exception, **oncles et tantes, cousins et cousines** qui m'ont beaucoup encouragé.

Mes sincères remerciements pour **mes adorables amies**, qui au fil du temps, sont devenues des sœurs. Merci pour vos encouragements et votre fidélité, je vous souhaite beaucoup de réussite.

Je ne pourrai pas oublier de citer **Asma** et **Meriem**, qui grâce à elles, ces durs mois de travail ne ressemblaient qu'à de vrais moments de plaisir et de partage, je suis très reconnaissante pour l'effort que vous avez fourni pour la réalisation de ce travail, Merci.

Enfin, je dédie ce travail à toute personne qui me connaît.

Sid Somia

Dédicace

A Mes Très chers Parents, Je dédie ce mémoire à mes parents, pour l'amour qu'ils m'ont toujours donné, leurs encouragements et toute l'aide qu'ils m'ont apporté durant mes études.

Aucun mot, aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, mon amour et ma considération pour les sacrifices qu'ils ont consentis pour mon instruction et mon bien-être.

Trouvez ici, chère mère et cher père, dans ce modeste travail, le fruit de tant de dévouements et de sacrifices ainsi que l'expression de ma gratitude et de mon profond amour.

Puisse Dieu leur accorder santé, bonheur, prospérité et longue vie afin que je puisse un jour combler de joie leurs vieux jours.

A vous mes sœurs : Chaima, Besma, Chahrazed et mon frère Mohamed et sa femme Yousra et son petit oncle Lyad qui m'avez toujours soutenu et encouragé durant ces années d'études. Je leurs souhaite une vie plein du bonheur et de succès.

Mes sincères remerciements pour mes adorables amies, qui au fil du temps, sont devenues des sœurs. Merci pour vos encouragements et votre fidélité, je vous souhaite beaucoup de réussite.

A mes chers binômes «Somia et Asma», ce travail et le fruit de notre amitié. A tous mes amis, au nom de l'amitié qui nous réunit, et au nom de nos souvenirs inoubliables, a tous ceux qui me sont chers

Meriem

Table des matières

- Liste des abréviations
- Liste des tableaux
- Liste des figures

Introduction	2
---------------------------	---

I. synthèse bibliographique

Chapitre I : Le cadmium

1. L'élément Cadmium (Cd)	5
2. Propriétés physico-chimiques et biologiques de cadmium	5
2.1. Propriétés physiques	5
2.2. Propriétés chimiques	5
2.3. Propriétés biologiques	5
3. Origines du cadmium	6
3.1. Origine naturelle	6
3.2. Origine anthropique	6
3.2.1. Rejets d'origine industrielle	6
3.2.2. Les pratiques agricoles	6
4. Biodisponibilité et phytodisponibilité du Cd	7
5. Prélèvement et transport du Cd au niveau de la plante	7
6. Accumulation du Cd dans la plante	8
7. la toxicité du cadmium	9
8. Induction d'un stress oxydatif par le cadmium et la réponse des plantes	9

Chapitre II : Les composés phénoliques

1. Définition	11
2. Classification	11
2.1. Acides phénoliques	12
2.1.1. Acides hydroxybenzoïques C6-C1	12
2.1.2. Acides hydroxycinnamiques C6-C3	13
2.2. Coumarines C6-C3	13

2.3. Stilbènes (C6-C2-C6)	14
2.4. Flavonoïdes (C6-C3-C6).....	14
2.4.1. Flavonols	15
2.4.2. Flavones.....	15
2.4.3. Anthocyanes	16
2.4.4. Flavan-3-ols ou flavanols	16
2.4.5. Flavanones	17
2.4.6. Isoflavones.....	17
2.5. Lignanes (C6-C3) ₂	18
2.6. Lignines (C6-C3) _n	18
2.7. Tannins(C15) _n	19
2.7.1. Tannins hydrolysables.....	19
2.7.2. Tannins condensés	19
3. Les composés phénoliques dans la plante, Distribution, accumulation et variation	20
3.1. Répartition et accumulation des composés phénoliques.....	20
3.1.1. A l'échelle cellulaire	20
3.1.2. A l'échelle tissulaire.....	20
3.2. Variation au cours de la vie de plante	21
4. La biosynthèse des composés phénoliques	21
4.1. Les voies de biosynthèse	21
4.2. Biosynthèse des composés phénoliques sous stress environnemental.....	22
4.2.1. Stress biotique.....	22
4.2.2. Stress abiotique	22
5. Rôles, intérêts et propriétés des composés phénoliques	23

II. Méthodologie

II.1. Effet du cadmium sur la teneur en polyphénols des jeunes plantes d'orge (*Hordeum vulgare* L.)

II.1.1. L'objectif d'étude	26
II.1.2. Description de l'espèce	26
1.2.1. Classification	26

1.2.2. Origine et distribution géographique	27
1.2.3. Caractères morphologiques	27
1.2.4. Importance et usages de l'orge	27
II.1.3. Description de la méthodologie	28
1.3.1. Conditions de culture	28
1.3.1.1. Germination des graines	28
1.3.1.2. Mise en culture des graines germées	28
1.3.1.3. Traitement métallique par le Cd	28
1.3.2. Préparation du matériel végétal	28
1.3.3. Extraction des polyphénols totaux	29
1.3.4. Dosage des polyphénols totaux	29
1.3.5. Analyse statistique	29

II.2. Effets du cadmium sur la composition phénolique et les activités antioxydantes d'*Erica andevalensis*

II.2.1. L'objectif d'étude	30
II.2.2. Choix de l'espèce.....	30
2.2.1. Classification	30
2.2.2. Caractères botaniques.....	31
II.2.3. Description de la méthodologie	31
2.3.1. Récolte des échantillons	31
2.3.2. Conditions de culture	31
2.3.2.1. Germination des graines	31
2.3.2.2. Mise en culture des graines germées	31
2.3.2.3. Traitement métallique par le Cd.....	32
2.3.3. Préparation du matériel végétal	32
2.3.4. Extraction des polyphénols totaux.....	32
2.3.5. Analyse statistique	32

II.3. Effet du stress cadmié sur la teneur en polyphénols, les paramètres morphologiques, physiologiques et anatomiques du haricot (*Phaseolus vulgaris L.*)

II.3.1. L'objectif d'étude	33
----------------------------------	----

II.3.2. Choix de l'espèce.....	33
3.2.1. Classification	33
3.2.2. Origine et distribution géographique	34
3.2.3. Caractères botaniques.....	34
3.2.4. Intérêts agro-alimentaires de l'haricot	34
II.3.3. Description de la méthodologie	35
3.3.1. Conditions de culture	35
3.3.1.1. Germination des graines	35
3.3.1.2. Mise en culture des graines germées	35
3.3.1.3. Traitement métallique par le Cd.....	35
3.3.2. Extraction des polyphénols totaux.....	35
3.3.3. Dosage des polyphénols totaux	36
3.3.4. Analyse statistique	36

II.4. Changements induits par le cadmium sur les pigments, les composés phénoliques totaux et l'activité phénylalanine ammoniac-lyase dans les frondes d'*Azolla imbricata*

II.4.1.L'objectif d'étude	37
II.4.2. Choix de l'espèce.....	37
4.2.1. Classification	37
4.2.2. Origine et distribution géographique	37
4.2.3. Caractères morphologiques	38
4.2.4. Intérêts d' <i>Azolla imbricata</i>	38
II.4.3. Description de la méthodologie	38
4.3.1. Récolte des échantillons	38
4.3.2. Conditions de culture	39
4.3.2.1. Mise en culture	39
4.3.2.2. Traitement métallique par le Cd.....	39
4.3.3. Extraction des polyphénols totaux.....	39
4.3.4. Dosage des polyphénols totaux	39
4.3.5. Analyse statistique	39

II.5. Effet du cadmium sur la formation de composés phénoliques dans les cultures de callosités dérivées de divers organes du théier (*Camellia sinensis* L.)

II.5.1. L'objectif d'étude	40
II.5.2. Description de l'espèce	40
5.2.1. Classification	40
5.2.2. Origine et distribution géographique	40
5.2.3. Caractères botaniques.....	41
5.2.4. Intérêt et importance du théier	41
II.5.3. Description de la méthodologie.....	41
5.3.1. Conditions de culture	41
5.3.1.1. Culture de cals.....	41
5.3.1.2. Traitement métallique par le Cd.....	42
5.3.2. Extraction des polyphénols totaux	42
5.3.3. Dosage des polyphénols totaux	42
5.3.4. Analyse statistique	42

III. Résultats et discussions

III.1. Effet du cadmium sur la teneur en polyphénols des jeunes plantes d'orge (<i>Hordeum vulgare</i> L.)...	44
III.2. Effet du cadmium sur la composition phénolique d' <i>Erica andevalensis</i>	47
III.3. Effet du stress cadmié sur la teneur en polyphénols chez l'haricot (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.).....	49
III.4. Changements induits par le cadmium sur les composés phénoliques dans les frondes d' <i>Azolla imbricata</i>	51
III.5. Effet du cadmium sur la formation de composés phénoliques dans les cultures de callosités dérivées de divers organes du théier (<i>Camellia sinensis</i> L.).....	53
Conclusion	56

Liste des abréviations

ROS : Réactive Oxygène Species

ADN : Acide désoxyribonucléique

SOD : Superoxyde dismutase

CAT : Catalase

APX : Ascorbate peroxydase

GR : Glutathion réductase

POD : Peroxydases

PAL : Phénylalanine Ammoniac Lyase

EAG : Equivalents d'acide gallique

SKDH : Shikimate déshydrogénase

CAD : Alcool cinnamylique déshydrogénase

PPO: Polyphénol Oxydase

APG: Angiosperm Phylogeny Group

Liste des tableaux

Tableau 01: Les principales classes des composés phénoliques 12

Tableau 02: Augmentation de la teneur en polyphénols totaux causée par le traitement au Cd chez *Hordeum vulgare L.* 44

Liste des figures

Figure 01: Structure d'unité de base des polyphénols	11
Figure 02: Quelques exemples des acides hydroxybenzoïques	12
Figure 03: Quelques exemples des acides hydroxycinnamiques	13
Figure 04: Exemples des structures chimiques des coumarines	13
Figure 05: Quelques exemples des structures chimiques des stilbènes	14
Figure 06: Structure de base des flavonoïdes	14
Figure 07: Exemples de structure chimique de flavonols	15
Figure 08: Exemples des structures chimiques des flavones	15
Figure 09: Deux exemples de structure chimique des anthocyanes	16
Figure 10: Deux exemples des structures chimiques du flavan-3-ols	16
Figure 11: Exemples des structures chimiques des flavanones	17
Figure 12: Exemples des structures chimiques des isoflavones	17
Figure 13: Exemple de structure chimique des lignanes	18
Figure 14: Principaux constituants de la lignine	18
Figure 15: Exemple des tannins hydrolysables	19
Figure 16: Exemple des tanins condensés	19
Figure 17: L'Orge "Hordeum vulgare L."	26
Figure 18: Erica andevalensis	30
Figure 19: L'Haricot «Phaseolus vulgaris L.»	33
Figure 20: Azolla imbricata	37
Figure 21: Le théier « Camellia sinensis »	40
Figure 22: Relation entre les polyphénols totaux et la teneur en Cadmium des racines d'orge traitées au Cd	44
Figure 23: Relation entre les polyphénols totaux et la teneur en Cadmium des pousses d'orge traitées au Cd	45
Figure 24: Relation entre les polyphénols totaux et la teneur en Cadmium des limbes foliaires d'orge traités au Cd	45

Figure 25: Teneur en composés phénoliques totaux dans les extraits de feuilles de <i>E. andevalensis</i> après cinq jours de période de traitement, exposés à 0, 0.05, 0.5, 5 ou 50 µg de cadmium g ⁻¹ sol(C,T1, T2, T3 et T4).....	47
Figure 26: L'effet du Cd sur la teneur en polyphénols totaux dans les racines et la partie aérienne de l'haricot	49
Figure 27: Effets de différentes concentrations de Cd sur les teneurs en composés phénoliques totaux d' <i>A.imbricata</i> par rapport au temps.....	51
Figure 28: Effets du cadmium sur les teneurs en composés phénoliques solubles totaux dans les cultures de cals de (1) racines, (2) tige et (3) feuilles, du théier	53

Introduction

Introduction

Les activités humaines agricoles, urbaines et industrielles, sans cesse croissantes, sont à l'origine d'une contamination de notre environnement par les métaux lourds. Alors que de nombreuses molécules organiques peuvent être dégradées, les métaux lourds ne le peuvent pas et leur concentration augmente régulièrement dans les sols et les eaux. Ceci expose les plantes à des concentrations croissantes de métaux lourds. L'accumulation de métaux lourds dans les plantes présente un risque toxique pour l'Homme, car les plantes cultivées sont le point d'entrée dans la chaîne alimentaire.

Ces dernières années, une attention croissante des chercheurs s'est concentrée sur l'étude des effets de divers facteurs de stress, y compris les métaux lourds, sur l'activité vitale des plantes (**Sanita di topi et Gabbrielli, 1999 ; Seregin et Ivanov,2001**). Le cadmium fait partie des polluants environnementaux les plus répandus dans la nature, et il se caractérise par une grande mobilité dans la solution du sol et une absorption rapide par les plantes. Cette absorption s'accompagne d'une diminution du transport des métabolites dans les feuilles et les tiges, d'une chlorose des feuilles et d'une inhibition de la croissance (**Gadallah, 1995 ; Baryla et al.,2001**). Le cadmium induit un large spectre de mutations, y compris des aberrations localisées et chromosomiques, ainsi que des modifications morphologiques des noyaux (**Zhang et Xiao,1998 ; Kuthanova et al.,2004**). De plus, le cadmium contribue à l'apparition d'un stress oxydatif dans les cellules végétales, affectant l'activité de plusieurs enzymes, telles que la superoxyde dismutase, la catalase, l'oxydase et autres (**Sandalio et al.,2001 ; Dixit et al.,2001 ; Ferreira et al.,2002**).

De l'autre côté, les plantes ont développé des systèmes détoxifiants, qui affaiblissent l'effet toxique du cadmium sur les cellules. De nombreuses études aient été consacrées aux effets du cadmium sur les organismes végétaux, en particulier ceux qui concernent la formation de composés phénoliques en tant que métabolites secondaires les plus répandus des plantes. Les composés phénoliques sont connus pour être capables d'interagir avec les métaux (**Zaprometov et Minnesota,1993**) comme antioxydants ; ils se lient aux espèces réactives de l'oxygène et à d'autres radicaux libres, apparaissant sous l'effet de nombreux agents de stress (**Rice-Evans et al.,1997**). Toutes ces données démontrent que ces composés dits «secondaires» remplissent des fonctions importantes dans les cellules végétales. Ces fonctions incluent notamment le maintien de l'activité vitale de la plante dans des conditions de stress (**Dixon et Paiva,1995**) comme la présence de métaux lourds dans l'environnement.

Introduction

Notre présent mémoire s'inscrit dans le cadre d'une synthèse des données sur l'effet du cadmium sur le contenu en composés phénoliques chez quelques espèces végétales, en s'appuyant sur des résultats publiés. Notre travail s'articule en trois grandes parties :

- ✓ Une synthèse bibliographique : divisée elle-même en deux chapitres dans lesquels toutes les informations nécessaires à savoir sur le cadmium et les composés phénoliques, sont citées.
- ✓ Méthodologie : nous avons choisi cinq articles qui étudient en grande partie la composition phénolique des plantes en présence du cadmium. Nous avons décrit la méthodologie suivie par les auteurs dans chaque article séparément notamment la culture des plantes, le traitement métallique par le cadmium, l'extraction et le dosage des composés phénoliques, ainsi que les espèces sur lesquelles les expériences ont été effectuées.
- ✓ Résultats et discussion : Nous avons interprété et discuté les résultats obtenus dans les différents articles choisis. Enfin nous avons terminé par une conclusion générale et des perspectives.

Synthèse bibliographique

I. Synthèse bibliographique

Chapitre I : Le cadmium

1. L'élément Cadmium (Cd)

Le cadmium, découvert en 1817 par le chimiste allemand Stohmeyer est un métal blanc argenté avec des teintes de bleu appartenant à la famille des métaux de transition, qui présente une grande résistance à l'oxydation et une bonne conductibilité électrique (**Juste et al., 1995**). Le cadmium élémentaire a un numéro atomique de 48 et une masse atomique de 112,4 g/mol.

Le cadmium (groupe IIB de la table périodique des éléments chimiques) est un polluant ubiquitaire classé 7ème parmi les 20 principaux toxiques, en raison de son influence négative sur les systèmes enzymatiques cellulaires (**Santa di Toppi et Gabrielli ,1999**).

2. Propriétés physico-chimiques et biologiques de cadmium

2.1. Propriétés physiques

Le Cd est métal blanc argenté ayant des propriétés physiques proches de celles de zinc. Il fond à 320.9°C et bout à 767°C. Lors de son ébullition, il dégage des vapeurs jaunes toxiques. Sa masse spécifique (densité) est de 8650 kg /m³. Il est ductile (résistance à l'étirement) malléable (résistance à l'aplatissement) et résiste à la corrosion atmosphérique, ce qui en fait un revêtement de protection pour les métaux ferreux (**ATSDR, Public Health services.2008**).

2.2. Propriétés chimiques

Les propriétés chimiques du cadmium sont semblables à celles du zinc. L'ion cadmium est déplacé pas le zinc métallique en solution : il donc plus noble que le zinc. Ils s'oxyde très peu à la température ambiante et brule dans l'air en donnant de l'oxyde anhydre CdO, insoluble dans un excès d'hydroxyde de sodium. Il réagit avec les acides et les bases .Le cadmium est soluble dans l'acide nitrique dilué et dans les acides chlorhydrique et sulfurique concentrés et chauds. La masse molaire atomique du cadmium est de 112.4 g /mol (**ATSDR, public Health Services, 2008**).

2.3. Propriétés biologiques

Le cadmium n'est pas essentiel au développement des organismes, animaux ou végétaux et ne semble pas être biologiquement bénéfique au métabolisme cellulaire (**Chiffolleau et al.,**

2002). 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 (McLaughlin et Singh, 1999).

3. Origines du cadmium

3.1. Origine naturelle

Naturellement, le cadmium n'est pas très abondant dans la croûte terrestre. Dans les sols non pollués, le contenu en cadmium est généralement entre 0,1 et 2 ppm et la plupart du temps il est inférieur à 1 ppm (Kabata-Pendias et al., 2001). Les processus naturels d'érosion et d'altération de la roche mère, ainsi que le transport par les fleuves et dans l'air des particules contribuent au cycle naturel du cadmium. Le volcanisme de surface et sous-marin participe aussi à la libération du cadmium dans l'environnement.

3.2. Origine anthropique

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

3.2.1. Rejets d'origine industrielle

Les retombées atmosphériques provenant de l'activité industrielle et du trafic urbain contribuent à la pollution des sols et des eaux de surface et souterraines. Ces retombées représentent une source principale de contamination par le cadmium dans les zones urbaines (He et al., 2005a). Le rejet des déchets industriels contribue aussi à la pollution des sols et des eaux par le cadmium. Il s'agit essentiellement du cadmium renfermé dans des déchets industriels variés stockés sur des anciennes friches industrielles ainsi que le cadmium contenu dans les produits en fin de vie comme les batteries et les piles à Cd/Ni ou de celui existant dans des effluents liquides issus des usines.

3.2.2. Les pratiques agricoles

Les pesticides utilisés en agriculture, tel que les fongicides, les insecticides, les herbicides peuvent contenir plusieurs métaux toxiques comme Cu, Cd, Zn et Pb et peuvent donc contribuer à la contamination des terres agricoles (He et al., 2005a).

L'irrigation des eaux usées, domestiques et industrielles, contiennent souvent du cadmium à des concentrations plus élevées que les eaux normales. L'utilisation répétée d'eaux usées en agriculture peut donc contribuer à l'accumulation de ce métal dans les sols (He et al., 2005a).

Les matières fertilisantes utilisées pour l'enrichissement des sols en engrais minéraux contaminés par le cadmium, essentiellement les phosphates, constitue une autre source de pollution des sols agricoles. En effet, les teneurs en Cd^{2+} des engrais phosphatés sont dans la plupart des cas supérieures aux normes. Certains engrais phosphatés contiennent plus de 50mg de Cd / Kg (**Mortvedt et Beaton, 1995**).

4. Biodisponibilité et phytodisponibilité du Cd

La biodisponibilité d'un élément serait son aptitude à être transféré d'un compartiment quelconque du sol vers un organisme vivant (racine d'une plante, micro-organisme,...). La phytodisponibilité est la biodisponibilité de l'élément pour un végétal supérieur.

La phytodisponibilité du Cd dans les sols est une notion extrêmement complexe puisqu'elle fait intervenir une multitude de paramètres liés au sol et à la plante. 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 et donc dans sa phytodisponibilité. Comme les végétaux puisent le Cd dans la solution du sol, les techniques d'estimation de la mobilité potentielle du Cd (offre du sol) peuvent rendre compte de sa phytodisponibilité. Cependant, toutes les formes présentes dans la solution du sol (Cd^{2+} , CdSO_4 , CdCO_3 , CdCl^+ , CdHCO_3^+ ...) n'ont pas forcément la même affinité pour les transporteurs membranaires des végétaux. Le concept de phytodisponibilité devrait donc concerner un couple «éléments en trace-végétal» et non pas seulement l'élément (**Juste, 1988**).

5. Prélèvement et transport du Cd au niveau de la plante

On estime que, pour la majorité des métaux, le prélèvement se fait quand ces éléments sont sous forme de cations libres (**Hart et al., 1998a ; Hart et al., 1998b**).

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 a été rapporté que le cadmium peut être absorbé par simple diffusion ou par les transporteurs membranaires et que les différentes voies d'absorption du cadmium peuvent varier selon l'espèce végétale considérée. Chez le blé dur par exemple, les deux voies peuvent coexister où l'absorption du cadmium est effectuée par simple diffusion et par des transporteurs (**Hart et al., 1998b**).

Pour le cadmium, les transferts via la voie atmosphérique peuvent être négligés surtout dans les contextes agricoles éloignés de sources de contamination (**Hovmand et al., 1983**).

Le transport du cadmium des racines vers les feuilles se fait via la sève brute (xylème). Suite à l'absorption du cadmium par les racines, trois processus contrôlent le transport du cadmium des racines vers le xylème: la séquestration des métaux à l'intérieur des cellules racinaires, le transport symplasmique dans la stèle et la décharge du cadmium dans le xylème (**Clemens et al., 2002a**).

6. Accumulation du Cd dans la plante

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'hyperaccumulatrices. 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 hyperaccumulatrices la concentration du cadmium dans la plante est nettement supérieure à celle que l'on peut observer dans le sol (**Bourrelier et Berthelin, 1998**).

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**). Ainsi, des différences d'accumulation ont été observées entre différentes variétés d'une même espèce végétale.

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**).

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**).

7. la toxicité du cadmium

L'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**).

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

8. Induction d'un stress oxydatif par le cadmium et la réponse des plantes

Plusieurs indications montrent que le cadmium peut induire un stress oxydatif. En effet, en présence du cadmium, les plantes produisent des radicaux libres qui sont des formes très réactives de l'oxygène (ROS : Reactive Oxygen Species), capables d'endommager les structures cellulaires (**Razinger et al., 2008; Szöllösi et al., 2009 ; Ahmad et al., 2010 ; Martínez Domínguez et al., 2010**). Les plus connues de ces formes réactives sont : l'ion superoxyde (O_2^-), le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2), le radical hydroxyl (OH) et l'oxygène singulet (O_2) (**Dat et al., 2000 ; Asada, 1999**). Toutes ces formes sont extrêmement toxiques. Le peroxyde d'hydrogène est un inhibiteur de certaines enzymes du cycle d'assimilation photosynthétique du carbone (**cycle de Calvin-Benson**). Les radicaux libres OH sont des oxydants redoutables, capables d'arracher des électrons aux macromolécules organiques cellulaires, provoquant ainsi la peroxydation des lipides membranaires, la destruction des protéines et la dénaturation de l'ADN des chromosomes. Une inhibition de la photosynthèse peut également se produire du fait de la destruction de la machinerie photosynthétique (protéines du photosystème II) par les formes actives de l'oxygène singulet (O_2) (**Halliwell et Gutteridge, 1999 ; Dat et al., 2000**).

Les plantes soumises à un stress oxydatif font appel à des systèmes de défense enzymatiques très efficaces, tels que la superoxyde dismutase (SOD), la catalase (CAT), l'ascorbate peroxydase (APX), la glutathion réductase (GR), les peroxydases (POD) etc. permettant de

Synthèse bibliographique

maintenir les formes actives de l'oxygène à des faibles concentrations. Ils sont affectés en présence de cadmium, ce dernier inhibe ou stimule les activités des enzymes de défense. Ces modifications sont différentes selon l'espèce étudiée, l'organe, l'âge de la plante et la concentration du cadmium utilisée (**Metwally et al., 2003, Milone et al., 2003; Hsu et Kao,2004; Cho et Seo, 2005 ; Singh et al., 2010 ; Martínez Domínguez et al., 2010.**). En outre, les plantes possèdent un système de défense non enzymatique présenté par les antioxydants naturels capables de prévenir les dommages oxydatifs. Ils peuvent se comporter comme des piègeurs de radicaux libres par les interventions directs sur les molécules prooxydantes ou indirectement en chélatant les métaux de transition. Ce type de défense possède un avantage considérable par rapport aux antioxydants enzymatiques, assuré essentiellement chez le règne animal par l'apport alimentaire. Les principaux antioxydants non enzymatiques de poids moléculaire élevé sont les composés phénoliques ou appelés aussi les polyphénols (**Tsao,2010**). Ces derniers, sur lesquels notre présent travail s'effectue, sont bien étudiés dans le chapitre suivant.

Chapitre II : Les composés phénoliques

1. Définition

Les polyphénols ou bien les composés phénoliques, sont des molécules spécifiques du règne végétal. Cette appellation générique désigne un vaste ensemble de substances aux structures variées qu'il est difficile de définir, cependant l'élément structural de base est un noyau benzénique auquel sont directement liés un ou plusieurs groupes hydroxyles, libres ou engagés dans une autre fonction chimique (éther, ester, hétéroside...etc.) (Moghtader,2009; Lograda et al.,2014; Belmekki et al., 2013).

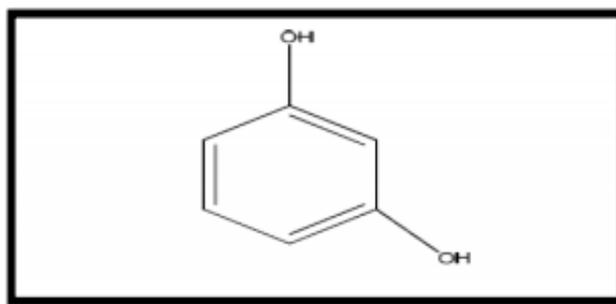


Figure01: Structure d'unité de base des polyphénols (Ghnémé, 2005)

2. Classification

Les composés phénoliques peuvent être regroupés en de nombreuses classes (tableau 01) qui se différencient d'abord par la complexité du squelette de base (allant d'un simple C6 à des formes très polymérisées), ensuite par le degré de modifications de ce squelette (degré d'oxydation, d'hydroxylation, de méthylation...), en fin par les liaisons possibles de ces molécules de bases avec d'autres molécules (glucides, lipides, protéines, autres métabolites secondaires pouvant être ou non des composés phénoliques...)(Macheix et al.,2005).

Tableau 01: Les principales classes des composés phénoliques (Macheix et al.,2005)

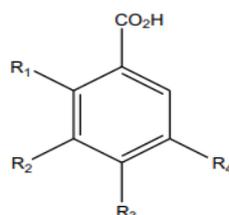
Squelette carboné	Classe	Exemple	Origine (exemple)
C6	Phénols simple	Catéchol	
C6-C3	Acides hydroxybenzoïques	p-Hydroxybenzoïques	Epices, fraise
C6-C3	Acides hydroxycinnamique	Acide caféique, acide férulique	Pomme de terre, pomme
	Coumarines	Scopolétine, esculétine	Citrus
C6-C2-C6	Silènes	Resvératrol	Vigne
C6-C3-C6	Flavonoïdes		
	• Flavonols	Kamphérol, quercétine	Fruits, légumes, fleurs
	• Anthocyanes	Cyanidine, pélargonidine	Fleurs, fruits rouges
	• Flavanols	Catéchine, épicatechine	Pomme, raisin
	• Flavanones	Naringénine	Citrus
	• Isoflavonols	Daidzéine	Soja
(C6-C3)2	Lignanes	Pinorésinol	Pin
(C6-C3)n	Lignines		Bois, noyau de fruits
(C15)n	Tanins		Raisin rouge, kaki

2.1. Acides phénoliques

Les acides phénoliques font partie des formes les plus simples des composés phénoliques et se séparent en deux grands groupes distincts qui sont les acides hydroxybenzoïques et les acides hydroxycinnamiques (Hoffmann, 2003).

2.1.1. Acides hydroxybenzoïques C6-C1

Les acides hydroxybenzoïques sont dérivés de l'acide benzoïque et ont une formule de base de type C6-C1 (Fig.2). Ils sont particulièrement représentés chez les gymnospermes et les angiospermes d'où ils sont souvent libérés après hydrolyse alcaline du matériel végétal. Les acides hydroxybenzoïques existent fréquemment sous formes d'esters ou de glycosides (Chanforan,2010).



$R_1=R_2=R_4=H, R_3=OH$	Acide p-hydroxybenzoïque
$R_1=R_4=H, R_2=R_3=OH$	Acide protocatéchique
$R_1=R_4=H, R_2=OCH_3, R_3=OH$	Acide vanillique
$R_1=H, R_2=R_3= R_4=OH$	Acide gallique
$R_1=OH, R_2=R_3= R_4=H$	Acide salicylique

Figure02: Quelques exemples des acides hydroxybenzoïques (Chanforan,2010)

2.2.2. Acides hydroxycinnamiques C6-C3

Les acides hydroxycinnamiques représentent une classe très importante dont la structure de base C6-C3 dérive de celle de l'acide cinnamique (Fig.3) (Macheix et al., 2005).

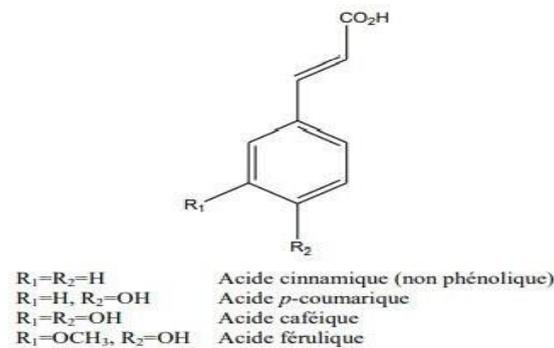


Figure03: Quelques exemples des acides hydroxycinnamiques (Macheix et al., 2005)

2.1. Coumarines C6-C3

Les coumarines sont des hétérocycles oxygénés ayant comme structure de base le benzo-2-pyrone (Fig.4). Les coumarines ont des effets différents sur le développement des plantes suivant leur concentration mais aussi suivant l'espèce. Dans la cellule, les coumarines sont principalement présentes sous forme glycosylés (Lacy et O'Kennedy ,2004). Elles présentent un intérêt physiologique, inhibant la croissance des graines en germination (Sandrine ,2004).

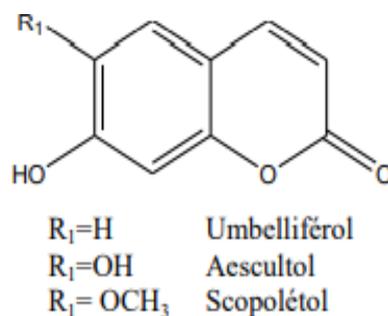


Figure 04 : Exemples des structures chimiques des coumarines (O'Kennedy et Thornes, 1997)

2.2. Stilbènes (C6-C2-C6)

Les Stilbènes possédant deux noyaux benzéniques reliés par une double liaison, formant un système conjugué (**Belkheiri, 2010**) (fig.5), Leur solubilité est négligeable dans l'eau et accrue dans la plupart des solvants organiques (**Jean-Denis, 2005**). Dans le règne végétal, le resveratrol est présent en quantité importante dans le raisin (**Chiran et al.,2008**).

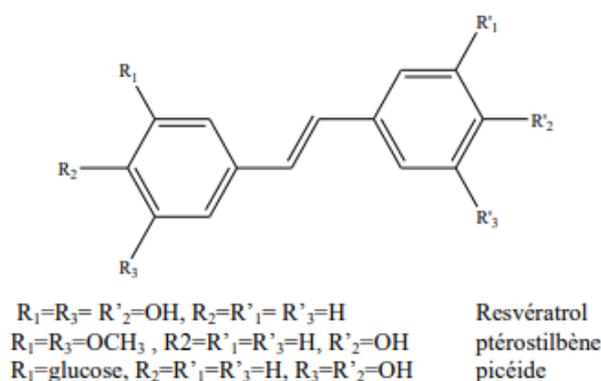


Figure05 : Quelques exemples des structures chimiques des stilbènes (Belkheiri, 2010)

2.3. Flavonoïdes (C6-C3-C6)

Les flavonoïdes constituent un groupe de plus de 6000 composés naturels qui sont quasiment universels chez les plantes vasculaires. Ils constituent des pigments responsables des colorations jaune, orange, et rouge de différents organes végétaux (**Ghedira k, 2005**). Tous les flavonoïdes possèdent la même structure de base (C6-C3-C6), ils contiennent quinze atomes de carbone dans leur structure de base: deux cycles aromatiques A et B à six atomes de carbones (Fig.6) liés avec une unité de trois atomes de carbone qui peut ou non être une partie d'un troisième cycle C (**Tapas et al., 2008**).

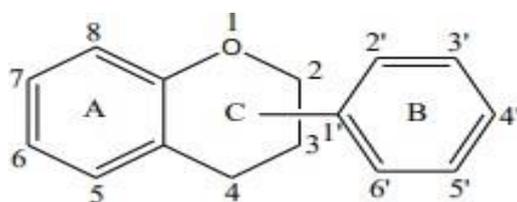


Figure06 : Structure de base des flavonoïdes (Tapas et al., 2008)

Les principales classes des flavonoïdes sont :

2.3.1. Flavonols

Elles sont les flavonoïdes les plus répandus dans le règne végétal, leur couleur varie du blanc au jaune, elles sont essentiellement représentés par la quercétine, le kaempférol et la myricétine (Fraga ,2009).

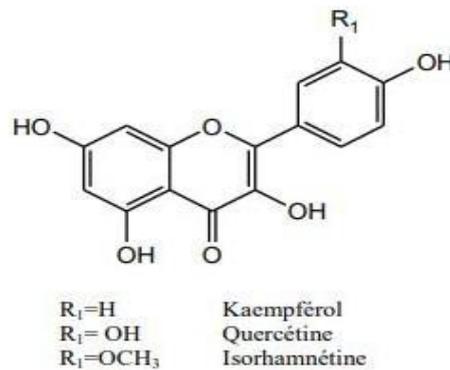


Figure07: Exemples de structure chimique de flavonols (Fraga ,2009)

2.3.2. Flavones

Les flavones sont structurellement très similaire aux flavonols et ne diffèrent que par l'absence d'hydroxylation en position 3 sur le cycle C (Fig.8). Elles sont principalement représentées dans l'alimentation par l'apigénine et la lutéoline (Fraga,2009).

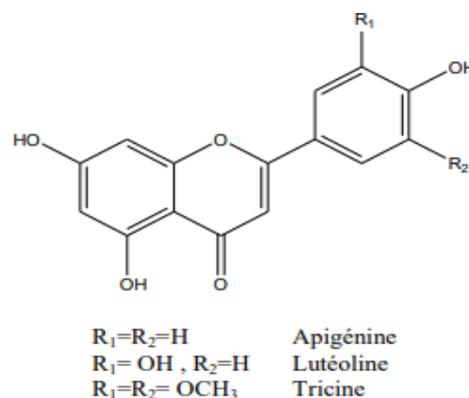


Figure08: Exemples des structures chimiques des flavones (Fraga,2009)

2.3.3. Anthocyanes

Les anthocyanes sont des pigments hydrosolubles présents dans la plupart des espèces (**Kong et al., 2003**). Ces pigments sont des dérivés du cation 2-phénylbenzopyrylium plus communément appelé cation flavylum (Fig.9). Ils sont accumulés dans les vacuoles cellulaires et ils sont responsables des couleurs rouges, violettes et bleues dans les fruits, les légumes, les fleurs et les graines, mais aussi jouent un rôle important dans la physiologie végétale comme attracteurs des insectes et dans la dispersion des graines (**Shipp et al.,2010**).

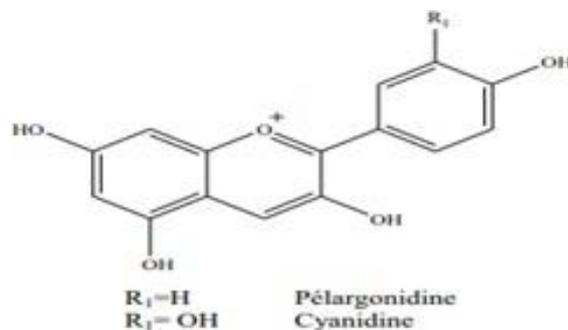


Figure 09: Deux exemples de structure chimique des anthocyanes (Shipp et al.,2010)

2.3.4. Flavan-3-ols ou flavanols

Les flavan-3-ols sont très abondant dans les fruits comme les abricots, les cerises, les raisins,... etc. Les flavanols sont largement répandus dans les fruits et légumes, mais la source la plus riche de flavanols au sein de l'alimentation humaine est certainement le thé (**Del Rio et al., 2010**).

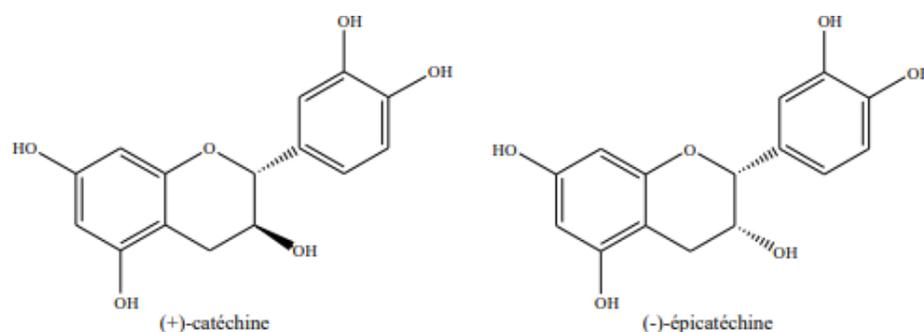


Figure10 : Deux exemples des structures chimiques du flavan-3-ols (Del Rio et al., 2010)

2.3.5. Flavanones

Ces molécules sont caractérisées par l'absence de double liaison en 2, 3 et par la présence d'un centre d'asymétrie en position 2 (fig.11). Elles existent sous forme libre ou sous forme glycosylée (**Portet, 2007**). La principale source des flavanones reste les agrumes qui sont caractérisés par l'accumulation des montants élevés en ces composés (**Tomas Barberan et al., 2000**).

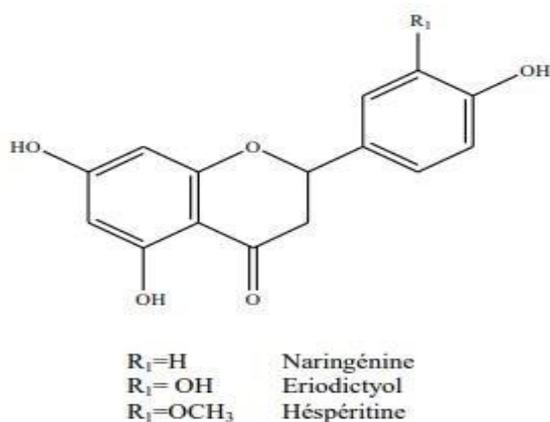


Figure 11: Exemples des structures chimiques des flavanones (Portet, 2007)

2.3.6. Isoflavones

Les isoflavones sont considérées comme des dérivés des flavones, elles représentent une sous-classe importante et très distinctive des flavonoïdes (**Bouheroum, 2007**). Contrairement à la plupart des autres flavonoïdes, les isoflavones sont caractérisées par la présence d'un cycle B fixé à C3 plutôt que la position C2 (Fig.12). Ils ont une distribution très limitée dans le règne végétal (**Fraga, 2009**).

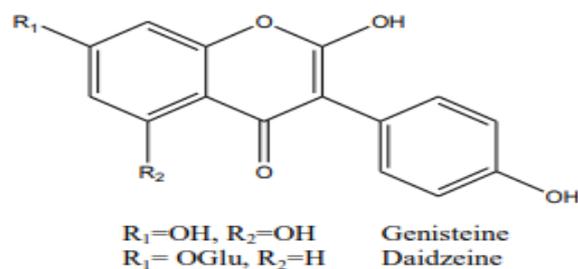


Figure12 : Exemples des structures chimiques des isoflavones (Fraga, 2009)

2.4. Lignanes (C6-C3)₂

Ce sont des composés phénoliques bioactifs, non-nutritifs, non caloriques. On les trouve en plus forte concentration dans le lin et les graines de sésame et en faibles concentrations dans les fruits et les légumes (**Peterson et al., 2010**). Ce sont des substances phénoliques apparentées aux lignines, ils n'ont guère de valeur alimentaire humaine. Ils sont présents dans la plante sous forme de glucosides (**Descheemaeker, 2003**).

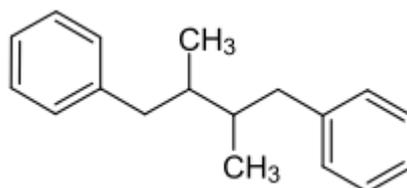


Figure13 : Exemple de structure chimique des lignanes (Descheemaeker, 2003)

2.5. Lignines (C6-C3)_n

La lignine est un polymère fortement ramifié, insoluble dans l'eau et dans la plupart des solvants organiques, formés par trois alcools phénoliques simples (fig.14). La lignine est localisée dans les parois cellulaires et plus spécialement dans les parois secondaires des éléments conducteurs, contribuant à la résistance mécanique et à la rigidité des tiges lignifiées (**Hopkins W.G, 2003**).

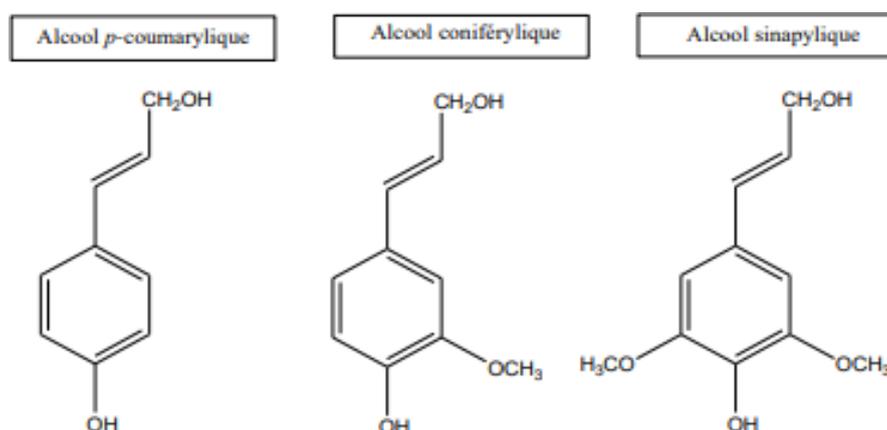


Figure14: Principaux constituants de la lignine (Hopkins W.G, 2003)

2.6. Tannins(C15)n

Sont des formes phénoliques ayant une masse moléculaire élevée allant de 500 à 3000 Dalton (**Guignard, 2000**) répartis en tannins hydrolysables et tannins condensés.

2.6.1. Tannins hydrolysables

Les gallotannins (acide gallique et glucose) et ellagitannins (acide hexahydroxydiphénique) présents uniquement chez les dicotylédones (**Jarrige et Ruckebusch,1995**).

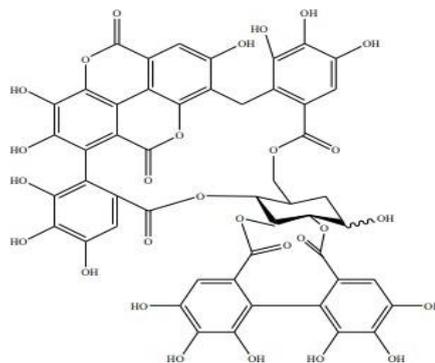


Figure15 : Exemple des tannins hydrolysables (Jarrige et Ruckebusch,1995)

2.6.2. Tannins condensés

Les tanins condensés(Fig.16) sont des polyphénols de masse molaire élevée. Ils sont très abondants dans certains organes végétaux par exemple de nombreux fruits (pomme, prune ...) ou des boissons fermentées ou non (thé, vin...) (**Macheix et al., 2005**).

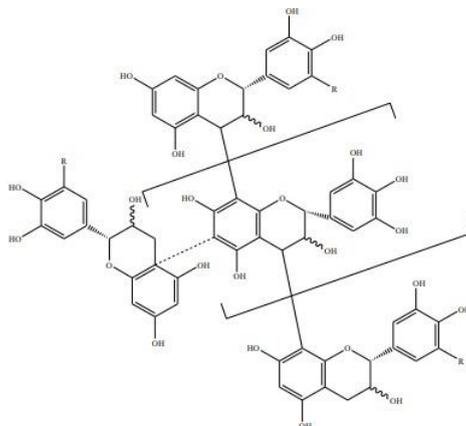


Figure 16: Exemple des tanins condensés (Macheix et al., 2005)

3. Les composés phénoliques dans la plante, Distribution, accumulation et variation

Une des caractéristiques des composés phénoliques, qu'ils montrent une répartition très inégale chez les différentes espèces végétales, et pour une même espèce, selon la variété et le stade d'évolution physiologique (Fleuriet et al., 2003). Les variations sont également considérables selon la nature des tissus et des cellules composant le végétal.

3.1. Répartition et accumulation des composés phénoliques

3.1.1. A l'échelle cellulaire

Une compartimentation nette des composés phénoliques avec deux localisations principales bien distinctes au niveau de la cellule végétale, est déterminée selon leur hydrosolubilité (Macheix et al., 2005).

- **La vacuole** : où sont présents tous les composés ayant un caractère hydrophile plus ou moins marqué. Ils correspondent à la plus part des formes simples et à certaines formes polymérisées comme les tannins.
- **La paroi** : où sont retrouvées la lignine et les différentes formes liées aux structures lipidiques. Dans les tissus où la plupart des cellules sont mortes (le bois par exemple), les composés phénoliques et en particulier les flavonoïdes, se retrouvent alors adsorbés sur les structures pariétales. Par ailleurs certains flavonoïdes simples à caractère apolaire peuvent également être présents dans les exsudats à la surface de bourgeons ou de feuilles.

3.1.2. A l'échelle tissulaire

La répartition des composés phénoliques montre également des accumulations très localisées, généralement en relation avec une fonction physiologique ou avec l'interaction de la plante avec son environnement. Ainsi, les composés phénoliques des feuilles présentent généralement une répartition très caractéristique, avec de fortes teneurs des anthocyanes et des flavonols dans les épidermes. A titre d'exemple, 80% de la quercétine sont dans l'épiderme supérieur chez la moutarde blanche alors que l'épiderme inférieur contient 82% des anthocyanes (Weirmann, 1981). Les racines présentent également des répartitions très inégales de leurs constituants phénoliques (Barz, 1977). Les fruits charnus offrent aussi des exemples très remarquables et fort intéressants pour la biologie de l'organe ou pour son

Synthèse bibliographique

utilisation par l'homme (**Macheix et al., 1990**). A l'échelle de la plante entière, il faut signaler que certains composés phénoliques ne sont accumulés que dans des organes bien définis. Par exemple, chez certaines espèces, les anthocyanes sont abondantes dans le fruit mûr (pomme, raisin rouge, fraise, cerise...) alors qu'elles n'apparaissent qu'exceptionnellement dans les autres organes de la plante (quelques fois dans les feuilles à l'approche de l'automne).

3.2. Variation au cours de la vie de plante

Les variations qualitatives et quantitatives des composés phénoliques peuvent être particulièrement marquées au cours de la vie de la plante (**Macheix et al., 2005**).

- Les teneurs en composés phénoliques sont quelques fois élevées dans les organes jeunes et diminuent ensuite au cours de la croissance. C'est le cas par exemple de l'acide caféoyltartrique du raisin ou de l'acide chlorogénique des pommes, dont la teneur passe par un maximum dans le jeune fruit puis décroît ensuite jusqu'à la maturation.
- A l'opposé, certains organes montrent de fortes concentrations en phénols au stade adulte ou lors de la sénescence: tannins dans les feuilles adultes de chêne, anthocyanes qui s'accumulent dans les fruits rouges murs (cerises, fraises, raisins, pommes...).

4. La biosynthèse des composés phénoliques

4.1. Les voies de biosynthèse

Les composés phénoliques sont synthétisés à partir de deux voies biosynthétiques (Annexe.01, figure01) (**Visioli et al., 2000**) :

- Celle de l'acide shikimique, qui conduit après transamination et désamination aux acides cinnamiques et à leurs nombreux dérivés tels que les acides benzoïques ou les phénols simples.
- Celle issue de l'acétate/malonate, qui conduit à des polys β -coesters (poly-acétates) de longueur variable menant par cyclisation à des composés polycycliques.

Deux acides aminés, phénylalanine et tyrosine, sont à l'origine de la formation de la plupart des molécules phénoliques. En effet, les formes métaboliquement actives des acides

Synthèse bibliographique

hydroxycinnamiques formés par une désamination, permettent d'accéder aux principales classes de composés phénoliques : vers les acides benzoïques par β oxydation, vers les esters hydroxycinnamiques par estérification, vers les coumarines par cyclisation interne, vers les lignines par deux réductions successives et vers les flavonoïdes (Macheix et al, 2005).

4.2. Biosynthèse des composés phénoliques sous stress environnemental

4.2.1. Stress biotique

Il est indiqué que l'infection par un micro-organisme pathogène (champignon, bactérie, ect.) ou l'apport de l'éliciteur qu'il produit, stimule la production de composés phénoliques par la plante, en déclenchant la synthèse des enzymes du métabolisme phénolique et en particulier de la PAL (Phénylalanine Ammonia Lyase) (Gundlach et al.,1992).

Une étude de (Franceschi et al.,1998) a démontré l'importance des cellules du parenchyme axial, aussi appelé parenchyme phénolique, dans la synthèse, le stockage et la modification des composés phénoliques en réponse à une blessure provoquée par certains insectes et champignons pathogènes chez l'épinette de Norvège.

4.2.2. Stress abiotique

- **Stress thermique** : Plusieurs études ont montré que l'accumulation de composés phénoliques sous l'influence d'un stress thermique est accompagnée d'une augmentation de l'activité PAL, première enzyme de la voie de biosynthèse des composés phénoliques et d'une diminution des activités des peroxydases et des polyphénols lyases (Rivero et al., 2001). une diminution de température se traduit par augmentation de la teneur en composés phénoliques totaux chez *C. annuum* (Esra et al., 2010).
- **Stress hydrique** : la teneur en composés phénoliques (acide betulinique, quercétine, et rutine) augmente chez les plantes en cas de stress hydrique (d'Abreu & Mazzafera, 2005). Chez *Glechoma longituba*, la teneur en flavonoïdes totaux est maximale à la capacité au champ et réduite en cas de stress hydrique (L. Zhang et al., 2012), de même chez *Ocimum basilicum* et *Ocimum americanum* (Khalid, 2006).
- **Stress rayonnement**: L'augmentation de la concentration foliaire en certains composés phénoliques (flavonols, anthocyanes, acides phénoliques) quand l'exposition aux UV-B augmente est l'une des réponses les plus conservées chez les plantes (Caldwell et al.,

2007). Les principaux effets des rayonnements UV-B sont sur la voie de conversion de la dihydroflavonol aux flavonoïdes (**Lavola et al., 2003**).

- **Stress salin** : Une augmentation de la teneur en polyphénols dans différents tissus sous une salinité croissante a également été signalée dans un certain nombre de plantes (**Parida et Das, 2005**). La teneur en flavonoïdes chez *Plantago ovata* augmente en présence d'un stress salin (**Haghighi et al., 2012**). (**Navarro et al., 2006**) ont montré une augmentation de la teneur totale en composés phénoliques avec un niveau modérément salin dans les poivrons rouges.
- **Stress métallique** : L'induction de la biosynthèse des composés phénoliques a été observée chez le blé en réponse à la toxicité du Ni (**Díaz et al., 2001**). Cependant, il a été rapporté que le Ni inhibait l'accumulation des anthocyanes (**Hawrylak et al., 2007**; **Ramakrishna and Ravishankar, 2011**). Les métaux traces limitent évidemment la biosynthèse des anthocyanes en inhibant l'activité de la PAL (**Krupa et al., 1996**). L'augmentation de la teneur en composés phénoliques a également été signalée chez *Phaseolus vulgaris* en présence de concentrations croissantes de Cd (**Díaz et al., 2001**) ou de Pb (**Hamid et al., 2010**). (**Melato et al., 2012**) ont observé une corrélation linéaire entre la concentration des métaux et la teneur totale en phénols solubles, acides phénols libres et composés phénoliques liés à la paroi cellulaire de *Chrysopogon zizanioides*, confirmant l'induction de la production des composés phénoliques chez cette plante en présence de concentration élevée en métaux.

5. Rôles, intérêts et propriétés des composés phénoliques

Le rôle des composés phénoliques est maintenant reconnu dans différents aspects de la vie de la plante et dans l'utilisation que fait l'homme des végétaux.

Ils peuvent en effet intervenir dans: La fertilité, la pigmentation, la signalisation et la protection contre des agents biotiques et abiotiques et encore la formation de polymères structuraux comme la lignine (**Guignard et al., 1985**; **Maury et Legrand, 2000**; **Macheix et al., 2005**).

Des travaux plus anciens (**Nitsch et Nitsch, 1961**) ont montré que les phénols seraient associés à de nombreux processus physiologiques: croissance cellulaire, différenciation, organogénèse, dormance des bourgeons, floraison et tubérisation.

Synthèse bibliographique

Dans les critères de qualité (couleur, astringence, amertume et qualité nutritionnelles...) qui orientent les choix de l'homme dans sa consommation des organes végétaux (fruits, légumes, tubercules) et des produits qui en dérivent par transformation; (**Macheix et al., 2005; Dicko et al., 2006**).

D'autre part, et d'après Bensegueni (1989) les techniques modernes d'isolement de molécules et d'exploration médicales montrent que beaucoup de propriétés thérapeutiques reposent sur les produits du métabolisme secondaires, et qu'il existe une relation directe entre les propriétés physicochimiques de ces composés et leur activité biologique et/ou pharmacologique.

De nos jours, les propriétés antioxydantes ou anti-inflammatoires des polyphénols participent à la prévention de diverses pathologies impliquant le stress oxydant et le vieillissement cellulaire, les maladies cardiovasculaires ou dégénératives, l'ostéoporose, (**Wang et Mazza, 2002; Macheix et al., 2005, Sarni Machando et Cheynier, 2006; Visioliet al., 1999**). Ils interagissent contre les radicaux libres soit directement en tant que piègeurs ou indirectement par l'inhibition de certains enzymes prooxydantes, (**Pussae et al., 2008**). Il a été observé que l'activité antioxydante dépend essentiellement du nombre de radicaux hydroxyles et de leurs positions à l'intérieur de la structure des composés phénoliques (**Derbel et Ghedira, 2005**).

Méthodologie

II. Méthodologie

Plusieurs études ont été réalisées dans le but d'évaluer l'effet du cadmium sur la synthèse des polyphénols par les végétaux. Notre travail consiste à faire une synthèse de quelques travaux réalisés pour évaluer la synthèse et l'accumulation des polyphénols sous stress cadmié chez cinq espèces végétales à savoir : L'orge (*Hordeum vulgare L.*), *Erica andevalensis*, l'haricot (*Phaseolus vulgaris L.*), *Azolla imbricata* et le théier (*Camellia sinensis L.*).

II.1. Effet du cadmium sur la teneur en polyphénols des jeunes plantes d'orge (*Hordeum vulgare L.*)

II.1.1. L'objectif d'étude

Le but de ce travail était de déterminer les effets du stress abiotique causé par le cadmium sur les niveaux de polyphénols dans les plantes d'orge.

II.1.2. Description de l'espèce

1.2.1. Classification

D'après Feillet 2000, L'orge est une monocotylédone, appartenant à la famille des Poaceae dont la classification est la suivante :

- Règne : *Plantae*
- Division : *Magnoliophyta*
- Classe : *Liliopsida*
- S/Classe : *Commelinidae*
- Ordre : *Poales*
- Famille : *Poaceae*
- S/Famille : *Hordeoideae*
- Tribu : *Hordeae (Hordées)*
- S/Tribu : *Hordeinae*
- Genre : *Hordeum*
- Espèce : *Hordeum vulgare L.*



Figure17: L'Orge "*Hordeum vulgare L.*"

1.2.2. Origine et distribution géographique

L'origine géographique de l'orge (*Hordeum vulgare*) remonte à plusieurs millénaires avant JC dans la région nommée le croissant fertile (**Feldman, 1976**). De nos jours, cette espèce représente la plus vaste distribution, étant présente dans toutes les régions tempérées du globe.

1.2.3. Caractères morphologiques

L'orge est une plante herbacée annuelle, qui, à maturité peut atteindre une hauteur de 60-120cm, selon les cultivars. La plante d'orge cultivée est constituée de racines, de tiges (chaume) cylindriques avec 5 à 7 nœuds, et de feuilles alternées. L'épi au sommet de la tige est constitué de fleurs disposées en épillets simples (portant chacun deux glumes et la fleur). Trois épillets sont attachés à chaque nœud sur un rachis en zigzag plat. Comme dans les autres céréales, le grain est un caryopse (**Gallais et Bannerot, 1992**).

1.2.4. Importance et usages de l'orge

Au début du XIXe siècle, l'orge venait en tête des cultures par son importance, elle était destinée à l'autoconsommation humaine et servait de complément fourrager aux troupeaux entretenus pendant la plus grande partie de l'année dans les régions steppiques (**Hakimi,1993**).

Dans le monde, l'alimentation animale est le principal débouché de l'orge, dans l'union européenne par exemple, elle représente environ les deux tiers de la production (soit entre 30 et 35 millions de tonne) (**Ney et al., 2002**). En Chine et au Japon, l'orge conditionnée fait partie du régime de la population, en extrême Orient, environ 80% de l'orge consommable est utilisée en alimentation humaine, (**Srivastava, 1977**).

Les usages industriels, principalement pour la fabrication de malt destiné à la brasserie, en absorbent entre 15 et 20% (soit autour de 7 millions de tonne), le reste est exporté, (**Gallais et al., 2002**). En Allemagne et au Royaume-Uni, de même qu'au Benelux et au Portugal, la fabrication de la bière représente le quart de l'utilisation intérieure.

II.1. 3. Description de la méthodologie

1.3.1. Conditions de culture

L'expérience a été réalisée dans des conditions contrôlées dans une salle climatisée du Département de botanique et de physiologie végétales de l'Université tchèque d'agriculture de Prague. La variété d'orge de printemps a été choisie comme matériel expérimental (**Dudjak et al.,2004**).

1.3.1.1. Germination des graines

Les caryopses ont été mis à germer dans de l'eau distillée à température du laboratoire (25°C) pendant 4 jours (**Dudjak et al.,2004**).

1.3.1.2. Mise en culture des graines germées

Les semis ont été replantés dans des boîtes spéciales avec un milieu nutritif. Le nombre de plantes cultivées variait d'environ 100 à 125 selon les dimensions des caisses utilisées. Les plantes ont été cultivées dans des boîtes en plastique conditionnées pendant 28 jours supplémentaires après leur replantation et le milieu nutritif a été échangé une fois par semaine. Les jeunes plantes ont été cultivées à un taux de fluence stable de la lumière (300 $\mu\text{mol photon/m}^2/\text{s}$) avec une période de jour de 16 heures, à une température de 22°C et une humidité de l'air de 60 à 80%. Les éléments nutritifs de base ont été fournis sous forme de solution nutritive de Knop diluée dans une demi-concentration, ce qui est utile pour l'orge de printemps, et les microéléments ont été fournis sous forme de solution de Shive diluée dans une demi-concentration (**Dudjak et al.,2004**).

1.3.1.3. Traitement métallique par le Cd

Deux variantes de l'expérience de culture ont été réalisées. La variante témoin sans ajout de cadmium et la variante expérimentale avec ajout de Cd sous forme de CdCl_2 , 2 heures dans le milieu nutritif à une concentration 1.10^{-6}mol/l . Chaque variante a été cultivée dans 8 boîtes. Les milieux nutritifs des deux variantes ne différaient que par les occurrences de Cd (**Dudjak et al.,2004**).

1.3.2. Préparation du matériel végétal

Après la culture, les plantes ont été séparées en racines, limbes et pousses et le matériel végétal a ensuite été lyophilisé à l'aide d'un lyophilisateur Lyovac GT 2 (Leybold-Heraeus, Allemagne) (**Dudjak et al.,2004**).

1.3.3. Extraction des polyphénols totaux

Des échantillons de plantes lyophilisées et homogénéisées (environ 0,3 g) ont été extraits dans un appareil Soxhlet avec un mélange éthanol-eau (80:20 v/v) pendant 20 heures et l'extrait a été transféré quantitativement dans une fiole jaugée et ajusté à 100 ml (**Dudjak et al.,2004**).

1.3.4. Dosage des polyphénols totaux

Une méthode modifiée de Lachman et al. (1998) avec le réactif phénol de Folin-Ciocateu, a été utilisé. Après une dilution de 5 ml d'échantillon aliquote dans une fiole jaugée de 50 ml avec une solution eau-éthanol à 80 % à environ 30 ml, 2,5 ml de réactif phénol de Folin-Ciocatleu (Fluka Chemie, AG) a été ajouté, agité et mélangé. Puis, a été ajouté 7,5 ml d'une solution de carbonate de sodium à 20 %, le volume a été ajusté avec de l'eau distillée à 50 ml et après une agitation poussée, il a été laissé au repos à la température du laboratoire pendant 2 heures pour une formation quantitative d'une couleur bleue. La même procédure a été utilisée pour le blanc où au lieu d'une solution d'échantillon ; 5 ml d'éthanol à 80 % ont été utilisés. Ensuite, les solutions ont été centrifugées à l'aide d'une centrifugeuse Janetzki T 30 à 2000 cycles par minute pendant 12 minutes. Les valeurs d'absorbance ont été mesurées à l'aide d'un Heλios (Spectronic Unicam, GB) contre le blanc à 765 nm et exprimé en mg d'acide gallique dans 1 kg de matière sèche d'un échantillon. L'écart type relatif de cette méthode était d'environ 1,96 %. (**Dudjak et al.,2004**).

1.3.5. Analyse statistique

Les résultats (valeurs moyennes de trois déterminations parallèles) ont été évalués statistiquement avec le programme Statgraphics par l'analyse de variance avec des groupements multiples. Une évaluation plus détaillée a été réalisée par le test de Scheffe (**Dudjak et al.,2004**).

II.2. Effets du cadmium sur la composition phénolique et les activités antioxydantes d'*Erica andevalensis*

II.2.1. L'objectif d'étude

- Evaluation de l'effet du cadmium sur la composition phénolique d'*Erica andevalensis*.
- Etude des mécanismes que possède cette espèce pour survivre en présence de métaux toxiques dans son habitat naturel.

II.2.2. Choix de l'espèce

Erica andevalensis (Cabezudo et Rivera) est une espèce endémique du sud-ouest de la péninsule ibérique, qui ne pousse que sur les sols unifiés par l'activité minière (périphérie des mines, berges des rivières Tinto et Odiel) (Cabezudo et Rivera,1980). *E. andevalensis* colonise les sols et les sédiments fortement pollués par une large gamme de métaux, dont le cadmium (Asensi et al.,1999).

2.2.1. Classification

- Règne : *Plantae*
- Division : *Magnoliophyta*
- Classe : *Magnoliopsida*
- S/Classe : *Ericales*
- Ordre : *Ericales*
- Famille : *Ericaceae*
- S/Famille : *Ericoideae*
- Tribu : *Ericaceae*
- Genre : *Erica*
- Espèce : *E.andevalensis*



Figure 18 : *Erica andevalensis*

2.2.2. Caractères botaniques

C'est une plante aux caractéristiques arbustives, qui peut mesurer jusqu'à 1.5 mètre de hauteur. La ramification de cette espèce est dense et ascendante, les feuilles de la *Erica andevalensis* ne dépassent pas 5 mm de longueur et sont composées de quatre verticilles.

La vérité qu'il s'agit d'une plante assez petite et simple, seulement qu'il se démarque dans le domaine où il est implanté grâce à la couleur de ses fleurs.

Une espèce totalement auto-compatible, mais qu'il ne peut pas être auto-pollinisé. Ses fleurs durent longtemps, mais elles n'ont pas autant de nectar que les autres fleurs. C'est pourquoi il n'y a pas de taux de pollinisation élevé et que cela ne dépend que des populations voisines.

Cette plante a la capacité de créer des graines qui peuvent être utilisées pour la multiplication. Excepté soumis à certaines conditions, ils se cassent de manière massive. En principe, cela est dû au froid et à l'humidité générée en hiver (Cabezudo et Rivera, 1980).

II.2.3. Description de la méthodologie

2.3.1. Récolte des échantillons

Les graines d'*E. andevalensis* ont été récoltées sur le terrain en automne, cueillant les fruits mûrs et extrayant et nettoyant les graines dans le laboratoire (Márquez-García et al., 2012).

2.3.2. Conditions de culture

Les graines ont été nettoyées à la main pour éliminer les matières étrangères telles que les fleurs, les feuilles et les tiges, et elles ont été placées dans de l'eau distillée (Márquez-García et al., 2012).

2.3.2.1. Germination des graines

Les graines qui ont coulé ont été identifiées comme viables. Par la suite, ils ont été imbibés d'eau distillée et conservés à 4°C dans le noir pendant 20 jours. Après ce temps, ils ont été séchés à l'air et stockés à 4°C dans l'obscurité (Márquez-García et al., 2012).

2.3.2.2. Mise en culture des graines germées

Les graines ont été semées dans un sol acide commercial (Floragard Rhodohum), un

Méthodologie

mélange de tourbe de sphaigne à base de 75 % de matière organique, 4,5-5,5 de pH(H₂O) et 200- 500µcm cm⁻¹ de conductivité, et ils ont été placées dans une chambre de croissance végétale avec une photopériode de 16h de lumière, 24-19°C Jour/nuite et 250µmol m⁻²s de rayonnement PAR. Le sol été arrosé régulièrement avec de l'eau du robinet. Les plantes poussaient depuis quatre mois et demi (Márquez-García et al.,2012).

2.3.2.3. Traitement métallique par le Cd

Immédiatement avant l'addition du Cadmium (8CdSO₄/3H₂O), les plantes ont été séparées en cinq groupes (trois pots par groupe), et chaque pot a été arrosé avec 25cm³ d'eau du robinet (contrôle) ou 25cm³ des solutions de cadmium suivantes : 0,53 µM, 5,3 µM, 53 µM, et 530 µM (équivalent à 0,05, 0,5, 5 et 50 µg de cadmium g⁻¹ sol et étiquetés T1, T2, T3 et T4) (Márquez-García et al.,2012).

2.3.3. Préparation du matériel végétal (feuilles)

Cinq jours plus tard, les feuilles ont été recueillies dans chaque pot, pesées, congelées dans un liquide N₂, et stocké à -80°C jusqu'à l'analyse.

2.3.4. Extraction des phénols totaux

Les feuilles ont été homogénéisées en liquide N₂ suivi d'une étape d'extraction à 30 % de méthanol (Márquez-García et al.,2012).

2.3.5. Dosage des phénols totaux

La teneur totale en composés phénoliques a été dosée par spectrophotométrie. Un spectrophotomètre Beckman Coulter DU 800 avec 1 cm de trajet a été utilisé pour toutes les mesures d'absorbance. Les résultats ont été exprimés en microgrammes d'équivalents d'acide gallique (EAG) par milligramme de poids frais (µg équivalents EAG mg⁻¹ FW), et après qu'une courbe d'étalonnage a été obtenue en utilisant l'acide gallique comme standard (Márquez-García et al.,2012).

2.3.6. Analyse Statistique

Les analyses statistiques ont été réalisées avec des échantillons indépendants t-test, et les différences significatives par rapport aux plantes témoins ont été indiquées par *P < 0,05 **P < 0,01 ; ***P < 0,001. Toutes les valeurs sont la moyenne de trois différents échantillons± erreur standard.

II.3. Effet du stress cadmié sur la teneur en polyphénols, les paramètres morphologiques, physiologiques et anatomiques du haricot (*Phaseolus vulgaris* L.)

II.3.1. L'objectif d'étude

L'un des buts de cette étude était d'évaluer l'effet du Cd sur l'accumulation de polyphénols dans les semis de l'haricot.

II.3.2. Choix de l'espèce

Haricot commun (*Phaseolus vulgaris* L.) est l'une des légumineuses à grains les plus importantes à l'échelle mondiale; c'est une source de nourriture précieuse pour les humains du monde entier et représente une consommation et une importance économique plus élevées. Cette culture est potentiellement exposée au Cd en raison d'un composant de formulations de fongicides et d'engrais et d'amendements couramment utilisés en agriculture dans le monde entier (Benhabiles Ait El Hocine et al.,2020).

3.2.1. Classification

Selon l'APG (2003), on attribue à l'haricot la classification suivante:

- Règne : *Plantae*
- S/Règne : *Tracheobionta*
- Division : *Magnoliophyta*
- Classe : *Magnoliopsida*
- S/Classe : *Rosidae*
- Ordre : *Fabales*
- Famille : *Fabaceae*
- S/Famille : *Faboideae*
- Tribu : *Phaseoleae*
- S/Tribu : *Phaseolinae*
- Genre : *Phaseolus*
- Espèce : *Phaseolus vulgaris* L.



Figure19 : L'Haricot «*Phaseolus vulgaris* L.»

3.2.2. Origine et distribution géographique

Le haricot commun est originaire d'Amérique centrale et d'Amérique du sud, il a été domestiqué indépendamment dans l'Amérique centrale (Mexique et Guatemala) et dans les Andes d'Amérique du sud (principalement le Pérou) (**Bernal et Graham,2001**). De nos jours, il a une importance considérable en particulier en Amérique du sud et en Afrique. L'espèce est bien établie dans de nombreux pays africains, et c'est dans la région des grands lacs d'Afrique centrale que sa culture est la plus intensive (**Wortmann et al.,1998 ; Nyabyenda,2005**).

3.2.3. Caractères botaniques

Le haricot est une plante herbacée annuelle à croissance déterminée ou indéterminée (**Laumonier,1979**). A la germination, la plante est généralement à racines pivotantes mais peu après des racines adventives longues de 10 à 15 Cm qui se développent sur toute la racine principale. Les fleurs sont portées en grappes axillaires et terminales. Elles sont zygomorphes composées de deux pétales en carène, deux pétales latéraux ailés et un pétale standard disposé extérieurement. La couleur de la fleur est généralement indépendante de celle des graines, mais l'association entre fleurs particulières et couleur des graines est connue (**Diaw,2002**).

Chez la haricot, la durée des stades de développement varie considérablement en fonction de la variété et les conditions environnementales (**Adams et al.,1985**).

3.2.4. Intérêts agro-alimentaires de l'haricot

La culture de haricot est destinée à la consommation humaine (les gousses ou graines sont consommées à l'état frais ou les graines à l'état sec) et à l'alimentation des animaux (les résidus de cultures : tiges et gousses). En effet, l'haricot constitue un aliment de base pour près de 500 millions d'êtres humains de part sa richesse en protéines (25% environ) (**Pujola et al.,2007**).

Sur le plan agronomique et en tant que légumineuse, l'haricot peut s'intégrer dans les systèmes de production biologiques qui utilisent la bio-fertilisation (**Canado et al.,2003**).

II.3. 3. Description de la méthodologie

3.3.1. Condition de culture

L'étude a été réalisée en Algérie en Afrique du Nord dans des conditions de laboratoire. Haricot commun (*Phaseolus vulgaris L.*) Le génotype Djadida couramment cultivé là-bas a été utilisé. Les graines ont été sélectionnées, désinfectées en surface avec 0,1% d'hypochlorite de sodium (NaClO) pendant 10 min, rincées et trempées dans de l'eau distillée à température ambiante pendant 12 h (**Benhabiles Ait El Hocine et al.,2020**).

3.3.1.1. Germination des graines

Les graines ont été mises à germer dans des boîtes en plastique scellées avec du papier filtre humidifié à 25 °C dans l'obscurité pendant 3 jours (**Benhabiles Ait El Hocine et al.,2020**).

3.3.1.2. Mise en culture des graines germées

Des semis uniformes ont été sélectionnés et transplantés dans des pots contenant de la moisissure avec un cycle de lumière de 16 h et un cycle d'obscurité de 8 h à une température moyenne jour/nuit de 25°C/20°C et une humidité relative moyenne de 75 %, arrosés au besoin selon la capacité du champ calculée en gramme d'eau par gramme de sol jusqu'à la fin de l'expérience pendant 21 jours (**Benhabiles Ait El Hocine et al.,2020**).

3.3.1.3. Traitement métallique par le Cd

Les traitements suivants ont été considérés : (1) 0,25 g.l⁻¹ de Cd, (2) 0,5 g.l⁻¹ de Cd, (3) 1g.⁻¹ de Cd. La concentration en Cd nous a été fournie CdCl₂ Solution aqueuse. Pour l'expérience de contrôle, Cd a été omis (**Benhabiles Ait El Hocine et al.,2020**).

3.3.2. Extraction des polyphénols totaux

Les composés phénoliques ont été extraits d'échantillons de pousses et de racines séchées de *Phaseolus vulgaris L* (**Benhabiles Ait El Hocine et al.,2020**).

3.3.3. Dosage des polyphénols totaux

La quantité de composés phénoliques totaux dans l'extrait a été déterminée en utilisant le réactif de Folin Cioaltea comme décrit par Meyers et al. (2003). L'absorbance a été mesurée à 750 nm et les résultats exprimés en équivalents d'acide gallique (mg eq. GA g⁻¹ DW), utilisé en standard (**Benhabiles Ait El Hocine et al.,2020**).

3.3.4. Analyse statistique

Toutes les données présentées sont les valeurs moyennes des répétitions de l'arbre \pm écart type (SD). L'analyse statistique a été réalisée par analyse d'étudiant à un niveau de signification de 5%, 1% et 0,1%, en utilisant le logiciel statistique STATISTICA version 8.0 (**Benhabiles Ait El Hocine et al.,2020**).

II.4. Changements induits par le cadmium sur les pigments, les composés phénoliques totaux et l'activité phénylalanine ammoniac-lyase dans les frondes d'*Azolla imbricata*

II.4.1. L'objectif d'étude

L'objectif principal de l'étude était d'étudier la toxicité du Cd pour *A. imbricata*. Dans cette étude, nous avons déterminé quantitativement le changement des composés phénoliques totaux.

II.4.2. Choix de l'espèce

Azolla imbricée (*A. imbricée*) est une fougère aquatique, largement répandue dans les régions tropicales et tempérées chaudes du monde. Il pousse à la surface de l'eau dans les étangs, les fossés et les rizières avec peu ou pas de soins (He et al., 2005b). Récemment, la fougère a été utilisée pour éliminer les métaux lourds des eaux usées, en raison de son efficacité dans l'accumulation de métaux lourds (Sela et al., 1989; Zhao et al., 1999).

4.2.1. Classification

- Règne : *Plantae*
- Phylum : *Tracheophyta*
- Classe : *Polypodiopsida*
- Ordre : *Salviniales*
- Famille : *Salviniaceae*
- Genre : *Azolla*
- Espèce : *Azolla imbricata*

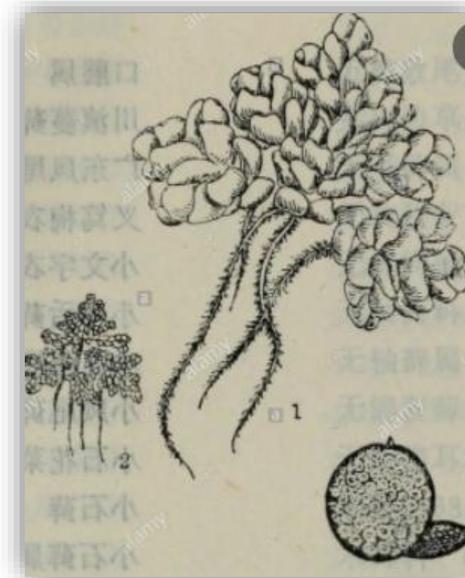


Figure 20: *Azolla imbricata*

4.2.2. Origine et distribution géographique

Azolla imbricata est une petite fougère aquatique flottant librement à la surface des écosystèmes d'eaux douces des régions tropicales, subtropicales, tempérées chaudes de l'Afrique, l'Asie et des Amériques (Costa et al., 2009).

4.2.3. Caractères morphologiques

Cette espèce pousse naturellement dans les milieux lenticules comme les étangs, les marécages, etc. La plante est souvent appelée fronde. Chaque fronde est constituée d'une tige principale (**Van Hove, 1989**) dont la longueur maximale excède rarement 3 à 4 cm, flottant à la surface de l'eau et couverte de petites feuilles alternes étroitement imbriquées et cachant ainsi la tige. Sa forme est plus ou moins circulaire.

4.2.4. Intérêts agronomiques d'*Azolla imbricata*

Azolla imbricata est une algue fixatrice d'azote atmosphérique grâce à sa symbiose avec l'algue bleu-vert *Anabaena azollae* qui pousse dans leurs cavités (**Uheda et al.,1999**). La plante est utilisée comme engrais vert dans les rizières de nombreux pays asiatiques. Dans ces milieux, elle permet aussi de contrôler la prolifération des mauvaises herbes (**Serag et al.,2000**). Elle est utilisée dans le traitement des eaux riches en nutriments par biofiltration (**Cohen-Shoel et al., 2002**).

Du fait de ses caractéristiques nutritionnelles, l'*Azolla imbricata* est convenable pour la consommation humaine et pour supplément alimentaire à divers animaux comme : poisson, canards, bétail, volaille etc. afin de réduire le coût de l'alimentation (**Hassan et al., 2009 ; Raja et al., 2012**). En effet, l'*Azolla* est également utilisée avec succès comme ingrédient dans l'alimentation de la volaille (**Beccera et al., 1995 ; Basak et al., 2002; Khatun et al.,1999; Alalade et Iyayi, 2006**). Ces auteurs ont souligné l'importance de cette ressource alimentaire non conventionnelle comme une alternative efficace pour nourrir le poulet. Au Bénin, l'*Azolla* a été utilisé avec succès dans l'aquaculture (**Shiomi et Kitoh, 2001 ;Fiogbé et al., 2004**) et dans l'alimentation des porcs (**Accodji et al., 2009**).

II.4.3. Description de la méthodologie

4.3.1. Récolte des échantillons

Les frondes d'*A.imbricata* ont été collectées à Luna Lake, dans la ville de Wuhan, en Chine. Les vieilles frondes ont été jetées et les jeunes frondes vertes et saines ont été utilisées pour les expériences (**Dai et al.,2006**).

4.3.2. Conditions de culture

4.3.2.1. Mise en culture

L'expérience a été réalisée dans des pots en plastique conservés à l'intérieur d'une chambre de croissance. Trois litres de solution de Hoagland 2/5 fois sans N ont été ajoutés à chaque pot en plastique. Pendant 9 jours d'expérience, la température de la chambre de croissance a été maintenue à (25/38°C), l'éclairage était fourni avec une lumière fluorescente blanc froid d'une intensité de 4000 lx, la photopériode était de 16/8h jour/nuit, et la solution de croissance de chaque pot était renouvelée quotidiennement pour minimiser les changements de concentration de Cd et de nutriments. Au début de l'expérience, 25 g (masse fraîche) de frondes ont été ajoutés à chaque pot (**Dai et al.,2006**).

4.3.2.2. Traitement métallique par le Cd

Cinq niveaux de traitement au Cd ont été utilisés dans cette étude : 0, 0,01, 0,05, 0,1 et 0,5 mg/L 1Cd (comme CdCl₂), chaque traitement avec trois répétitions. Les plantes placées dans la solution de Hoagland sans Cd ont servis de témoins (**Dai et al.,2006**).

4.3.3. Extraction des polyphénols totaux

Des échantillons ont été prélevés pour analyse les 1^{er}, 3^{ème}, 5^{ème}, 7^{ème} et 9^{ème} jours. Les frondes (1 g FW) ont été extraites avec 1 % de HCl-méthanol (5 ml), l'extrait a été filtré et le filtrat a été dilué avec 1 % de HCl-méthanol à 10 ml (**Dai et al.,2006**).

4.3.4. Dosage des polyphénols totaux

Les teneurs en composés phénoliques totaux ont été mesurées selon Zhang et Quantick (1997). L'absorbance du diluant a été mesurée à 280 nm pour les composés phénoliques. Les phénols totaux ont été calculés à partir d'une courbe standard réalisée avec de l'acide gallique (**Dai et al.,2006**).

4.3.5. Analyse statistique

Les données sont présentées en moyenne \pm 6 écart-type ($m \pm 3$). Une ANOVA (analyse de variance) à sens unique a été utilisée pour tester l'effet du traitement au Cd sur la teneur en composés phénoliques totaux (**Dai et al.,2006**).

II.5. Effet du cadmium sur la formation de composés phénoliques dans les cultures de callosités dérivées de divers organes du théier (*Camellia sinensis* L.)

II.5.1. L'objectif d'étude

L'étude des changements induits par le cadmium dans l'accumulation de composés phénoliques dans les cultures de callosités d'origines diverses.

II.5.2. Description de l'espèce

5.2.1. Classification

La classification selon Cronquist établie en 1981 est la suivante :

- Règne : *Plantae*
- Division : *Magnoliophyta*
- Classe : *Magnoliopsida*
- Ordre : *Théales*
- Famille : *Theaceae*
- Genre : *Camellia*
- Espèce : *Camellia sinensis*



Figure21 : Le théier «*Camellia sinensis* »

5.2.2. Origine et distribution géographique

Le thé (*Camellia sinensis* L.), est originaire de Chine, plus tard répandu en Inde et au Japon, puis en Europe et en Russie, arrivant dans le Nouveau Monde à la fin du 17ème siècle.

5.2.3. Caractères botaniques

A l'état sauvage, le théier (*Camellia sinensis*) est un arbuste de cinq à dix mètres de haut, mais dans la plupart des plantations, il est taillé à environ 1,20 m pour faciliter la cueillette des feuilles. Les jeunes feuilles à l'extrémité des branches donnent les meilleurs thés, alors que les quatre ou cinq feuilles suivantes servent à la production courante. Les facteurs environnementaux comme le climat, le type de sol et l'altitude contribuent à la teneur en tanins (responsable de la couleur et de la saveur) et en théine (la caféine du thé) (**Xiao et Zhen,2002**).

5.2.4. Intérêt et importance du théier

Le thé est manufacturé de la feuille et du bourgeon du *Camellia sinensis*, est le deuxième liquide le plus souvent bu sur terre après l'eau. Il est consommé socialement et habituellement par les gens depuis 3000 avant J.C. Le thé était un remède médicinal, il est devenu boisson. Entré dans le monde de la poésie chinoise du VIII^e siècle en tant que divertissement de politesse, il fut anobli au XV^e siècle par le Japon, parmi ces propriétés il est un puissant antioxydant (**Kakuzo et Okakura,2003**).

II.5. 3. Description de la méthodologie

5.3.1. Conditions de culture

Dans ce travail, nous avons utilisé du théier (*Camélia sinensis L.*, variété géorgienne) : cultures de cals dérivés de feuilles, de tiges et de racines (**Zagodkina et al.,2007**).

5.3.1.1. Culture de cals

Les cals ont été cultivés à l'obscurité sur un milieu nutritif Heller modifié contenant du 2,4-D (5 mg/l) et du glucose (25 g/l) (**Zagodkina et al.,2007**).

Les cultures de cals sont des modèles appropriés pour étudier le métabolisme cellulaire. Ils sont supérieurs aux plantes intactes dans une organisation plus simple de leurs cellules et tissus et dans une capacité à contrôler étroitement leurs conditions de croissance (**Butenko,1999**). De plus, dans la plupart des cas, les cultures cellulaires conservent la capacité de synthétiser des métabolites secondaires caractéristiques des tissus intacts (**Stafford,1991 ; Zaprometov,1989**). Ce fait permet de les utiliser pour étudier le métabolisme des composés phénoliques et son rôle dans la vie végétale, y compris

l'adaptation des plantes aux conditions de stress (**Kuthanova et al.,2004 ; Zagoskina et al.,2003**). Les cultures de cals de théier peuvent être considérées comme un modèle approprié pour de telles études, car elles se caractérisent par un métabolisme spécialisé visant à la synthèse de divers composés phénoliques, tels que les phénylpropanoïdes, les avonoïdes et la lignine (**Zaprometov et al.,1979**).

5.3.1.2. Traitement métallique par le Cd

Dans les cultures traitées, le milieu nutritif a été additionné de 6.3×10^{-5} M ou 10.6×10^{-5} M nitrate de cadmium.

5.3.2. Extraction des polyphénols totaux

Les composés phénoliques ont été extraits des cals avec de l'éthanol chaud à 96 % (**Zagodkina et al.,2007**).

5.3.3. Dosage des polyphénols totaux

La teneur totale en composés phénoliques solubles a été déterminée par spectrophotométrie à 725 nm en utilisant le réactif de Folin-Denis, la courbe d'étalonnage a été réalisée à l'aide de l'épicatéchine (**Zagodkina et al.,2007**).

5.3.4. Analyse statistique

Les chiffres présentent les moyennes de trois déterminations effectuées en trois répétitions (trois cals chacune) et leurs erreurs types. Les données de trois réplifications de tous les traitements ont été soumises à une analyse de variance à l'aide de SPSS 8.0 pour Windows (**Zagodkina et al.,2007**).

Résultats et discussions

III. Résultats et discussions

III.1. Effet du cadmium sur la teneur en polyphénols des jeunes plantes d'orge (*Hordeum vulgare* L.)

Tableau 02 : Augmentation de la teneur en polyphénols totaux causée par le traitement au Cd chez *Hordeum vulgare* L. (Dudjak et al.,2004).

Variantes	Partie de la plante	Total moyen : Teneur en polyphénols (mg/Kg ms)	Augmentation(%)	Ecart-type
Contrôle	Racines	3310		522.096
	Pousses	3080		400.595
	Lames de feuilles	6170		645.374
Cd (1.10^{-6} mol/l)	Racines	3650	10.3	579.527
	Pousses	3590	16.7	725.123
	Lames de feuilles	8340	35.2	606.717

Il ressort des données extraites du tableau 2, que le traitement au Cd a provoqué une augmentation de la teneur en polyphénols totaux par rapport au variant témoin. Concernant les parties végétales, l'augmentation des composés polyphénoliques totaux après traitement au cadmium a été la suivante : limbes foliaires (35,2%) > pousses (16,7%) > racines (10,3%). Les teneurs moyennes en polyphénols totaux dans les variantes témoins et traitées au Cd étaient de 6170 et 8340, 3070 et 3590, 3310 et 3650mg/kg MS dans les limbes, les pousses et les racines, respectivement.

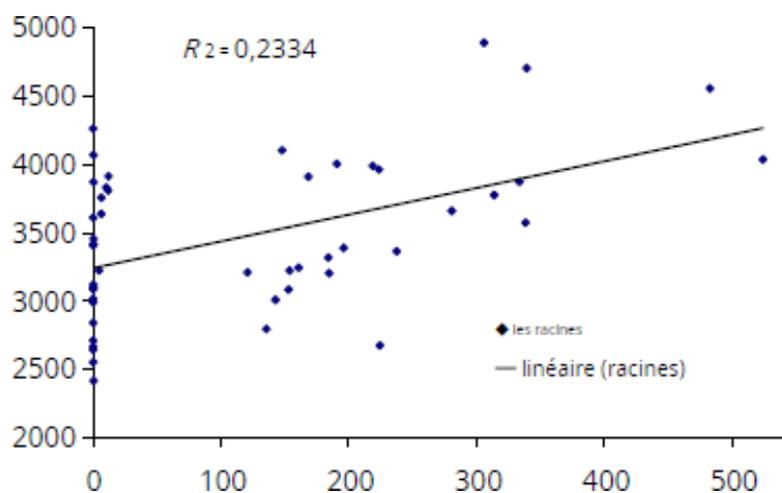


Figure 22: Relation entre les polyphénols totaux et la teneur en Cadmium des racines d'orge traitées au Cd (Dudjak et al.,2004).

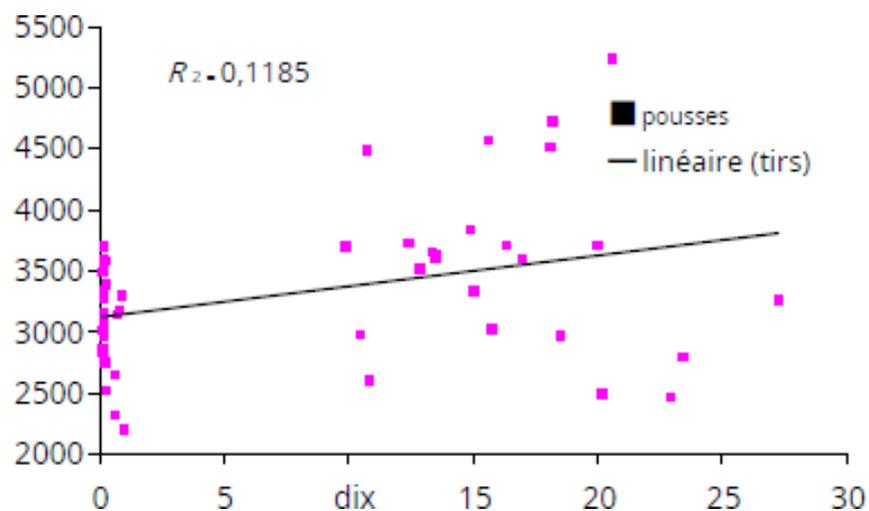


Figure 23 : Relation entre les polyphénols totaux et la teneur en Cadmium des pousses d'orge traitées au Cd (Dudjak et al.,2004).

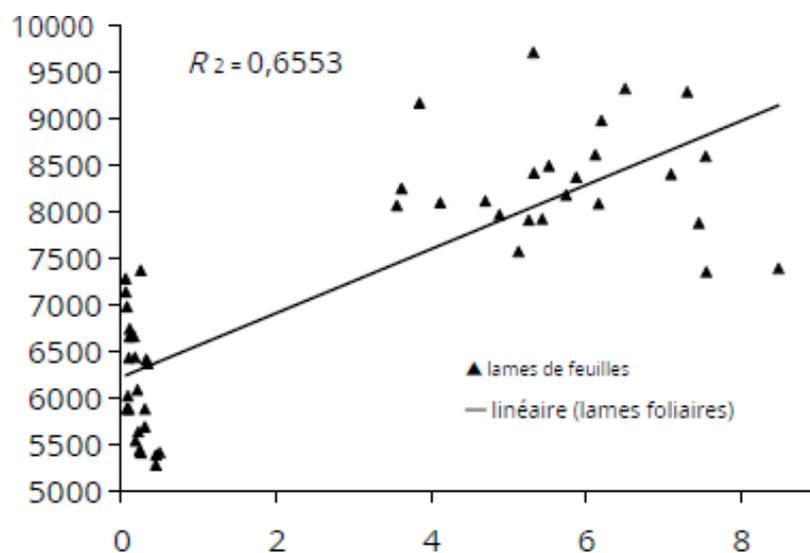


Figure 24: Relation entre les polyphénols totaux et la teneur en Cadmium des limbes foliaires d'orge traités au Cd (Dudjak et al.,2004).

Une relation entre la teneur totale en polyphénols et la teneur en Cd dans tous les organes d'orge étudiés était linéaire (figures 22, 23 et 24). Les teneurs en polyphénols totaux et en Cd dans les racines, les pousses et les limbes des feuilles d'orge étaient réciproques.

Cette enquête a montré que la contrainte Cd ($1,10^{-6}$ mol/l) a causé une augmentation des niveaux de Cd et de polyphénols totaux dans les plantes d'orge et que l'augmentation des polyphénols totaux est une réponse au stress Cd. Il s'agit du premier rapport similaire à d'autres facteurs de stress abiotiques, UV-irradiation, sécheresse, humidité ou température plus élevée (**Lachman et al.,2001, Orsák et al.,2001, Hakala et al.,2002, Hideg et al., 2002**). Le stress causé par le Cd affecte également le niveau de composés polyphénoliques en tant que composés métabolites secondaires protecteurs chez les plantes. Ceci est en accord avec les résultats obtenus par **Wu et al. (2003)** que le stress au Cd induit une réponse au stress oxydatif dépendante de la concentration et du type de gène et des changements dans les limbes des feuilles d'orge caractérisés par le modèle d'altération des enzymes antioxydantes superoxyde dismutase(SOD) et peroxydase(POD). L'augmentation de la teneur totale en polyphénols en réponse au stress au Cd est similaire, comme **Baisakhi et al. (2003)** déterminé dans le clone tolérant de *Chloris barbata Sw.* au niveau protéine-thiol. Comme **Chai et al. (2003)** trouvé dans le haricot vert (*Phaseolus vulgaris*), l'expression de gènes liés au stress comme PvSR2 peut améliorer la tolérance au Cd, en particulier à des concentrations externes de Cd plus élevées. Les preuves que les composés phénoliques jouent un rôle clé dans le durcissement des réponses aux facteurs de stress abiotiques soutiennent également les résultats de **Metwally et al. (2003)**, qui ont découvert que l'acide salicylique atténue la toxicité du Cd dans les plants d'orge et augmente le niveau de tolérance aux concentrations élevées de Cd. Cela appuie la conclusion selon laquelle l'acide salicylique affecte les mécanismes de détoxification du Cd.

III.2. Effet du cadmium sur la composition phénolique d'*Erica andevalensis*

Dans le présent travail, l'effet du cadmium sur la composition phénolique d'*E. andevalensis*, est décrit. Peu d'informations sont disponibles sur l'effet du cadmium dans le métabolisme phénolique de la famille des Ericaceae.

La teneur en cadmium du sol a augmenté proportionnellement au cadmium ajouté. Simultanément, *E. andevalensis* a absorbé le cadmium du sol, et il s'est accumulé dans les feuilles, en fonction des niveaux dans les sols. Pas de visuel effets ont été observés dans les plantes sous l'un des traitements appliqués, et les feuilles sont restées vertes dans tous les traitements, sans différences dans la chlorophylle a et la chlorophylle b par rapport à la réduction capable de pousser dans des conditions contrôlées en l'absence de pollution (Márquez-García et al.,2011).

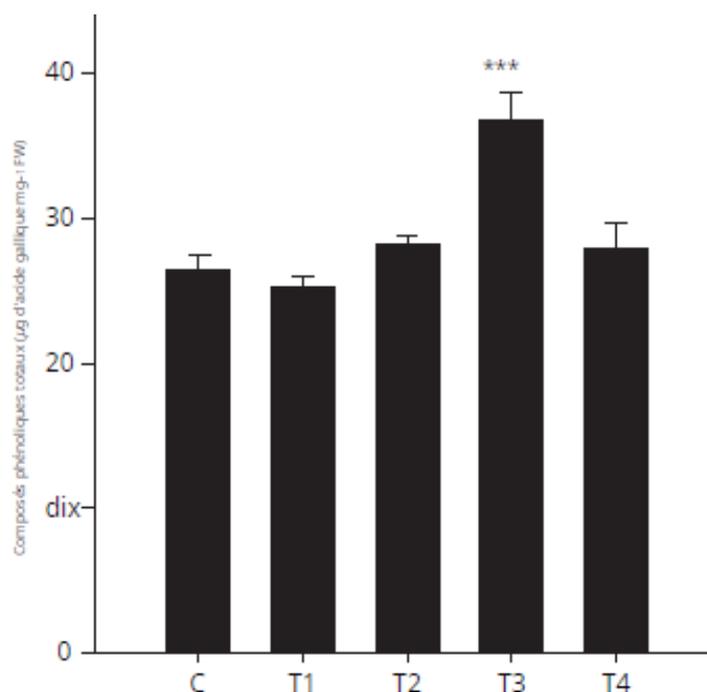


Figure 25: Teneur en composés phénoliques totaux dans les extraits de feuilles de *E. andevalensis* après cinq jours de période de traitement, exposés à 0, 0.05, 0.5, 5 ou 50 µg de cadmium g⁻¹ sol(C, T1, T2, T3 et T4) (Márquez-García et al.,2012).

Résultats et discussions

Le niveau total de composés phénoliques dans les plantes témoins était similaire au niveau des plantes sauvages (Márquez-García et al.,2009). Cependant, les niveaux de composés phénoliques n'ont pas été augmentés comme prévu par la présence de cadmium, compte tenu du fait que les plantes témoins ne contenaient pas de cadmium et que la teneur en métaux des plantes de T1 à T4 était plus de huit fois supérieure. Il est intéressant de noter que la concentration phénolique la plus élevée a été observée dans les plantes T3, même si les plantes T4 contiennent environ 40% plus de cadmium que les plantes T3 (fig.25).

L'absence d'augmentation des composés phénoliques a été observée dans T4 pourrait s'expliquer en tenant compte du fait que les radicaux phénoxyles résultant de la réaction antioxydante pourraient agir comme pro-oxydants (Sakihama et al.,2002). Par conséquent, les plantes exposées à la plus forte concentration de cadmium peuvent réduire la synthèse ou la libération de composés phénoliques par un mécanisme inconnu pour éviter un délétère effet causé par les radicaux phénoxyles produits. Une autre hypothèse pour expliquer l'absence d'augmentation des composés phénoliques dans les plantes T4 pourrait être que l'excès de cadmium pourrait avoir altéré les réponses du système antioxydant basé sur les composés phénoliques et d'autres composés de telle sorte que les plantes ne sont pas capables de synthétiser de nouveaux phénols. Une situation similaire a été observé dans *Spartine densiflora* qui n'est pas capable de contrecarrer une exposition élevée au cadmium, mais il réagit avec succès en synthétisant des métabolites antioxydants tels que l'acide ascorbique ou le glutathion lorsqu'il est exposé à des concentrations modérées de cadmium (Domínguez et al.,2010).

Les résultats présentés dans cette étude ont montré que les composés phénoliques jouent un rôle important dans la défense des *E. andevalensis* contre le cadmium. Étonnamment, la réponse la plus élevée a été observée à 5µg de cadmium g⁻¹ terre ajoutée aux sols, tandis qu'avec 50 µg de cadmium g⁻¹sol, les plantes du sol ont réagi de la même manière que celles exposées à de faibles concentrations, telles que 0,5 µg de cadmium g⁻¹sol, indiquant un mécanisme sélectif possible qui rend les plantes tolérantes aux métaux efficaces à une gamme définie de concentrations de cadmium. Depuis *E. andevalensis* vit dans des sols acides et pollués par des métaux durs, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour analyser les synergies d'interaction et les antagonismes entre les métaux à pH acide contrôlé et les composés phénoliques, mais les composés phénoliques pourraient être utilisés comme indicateurs de la présence de métaux dans les feuilles des espèces végétales.

III.3. Effet du stress cadmié sur la teneur en polyphénols chez l'haricot (*Phaseolus vulgaris* L.)

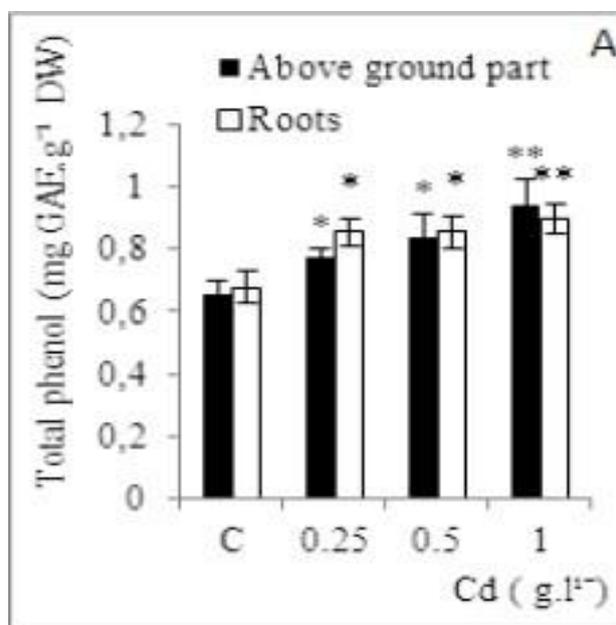


Figure 26: L'effet du Cd sur la teneur en polyphénols totaux dans les racines et la partie aérienne de l'Haricot (Benhabiles Ait El Hocine et al., 2020).

Le contenu phénolique dans *Phaseolus vulgaris* L. extrait est montré dans figure 26 : L'augmentation des niveaux de Cd a nettement augmenté la synthèse de ces métabolites dans tous les traitements à la fois dans la partie aérienne et les racines ($p < 0.05^*$) contrairement au témoin. Les taux d'augmentation étaient jusqu'à 43% dans la partie aérienne et jusqu'à 32% dans les racines.

Le stress oxydatif est un mécanisme important de la toxicité du cadmium (Smeets et al., 2005). Les plantes utilisent un système de défense antioxydant complexe pour prévenir les dommages oxydatifs et maintenir les concentrations d'espèces réactives de l'oxygène dans une plage fonctionnelle étroite (Ozgun et al., 2013). Les principaux composants de ce système comprennent des piègeurs de radicaux non enzymatiques parmi lesquels les composés phénoliques. Ces composants maintiennent les cellules végétales à l'abri des dommages oxydatifs en éliminant les ROS (Schafer et al., 2002). Une meilleure compréhension des mécanismes antioxydants sous-jacents médiés par les composés phénoliques est nécessaire pour développer des stratégies pour les sols de culture contaminés. *Phaseolus vulgaris* L. cultivé sous traitement au Cd a montré une augmentation significative de la teneur en polyphénols totaux dans les deux parties de la plante. Sous le stress des métaux lourds, les

Résultats et discussions

composés phénoliques peuvent agir comme des chélateurs d'ions de métaux de transition, des piègeurs de ROS (Vollmannova et al., 2014; Manquian-Cerda et al., 2016) et peuvent supprimer la peroxydation lipidique en brisant les réactions en chaîne radicalaires pendant la peroxydation lipidique (Arora et al., 2000 ; Sakihama et Yamasaki, 2002). Chen et al. (2019) ont rapporté que l'activité de la Shikimate déshydrogénase (SKDH), de l'alcool cinnamylique déshydrogénase (CAD) et de la polyphénol oxydase (PPO) augmentait pendant ce temps, lorsque les composés phénoliques totaux augmentent en *Kandelia obovata* exposés à des concentrations plus élevées de cadmium (Cd) et de zinc (Zn), ce qui indique que le Cd et le Zn jouent un rôle auparavant non reconnu mais majeur dans la synthèse, le transport et le métabolisme des composés phénoliques. Kovácik et al. (2006) ont affirmé que l'activation de l'enzyme phénylalanine ammoniac lyase (PAL) est la principale cause de l'augmentation de la concentration en métabolites phénoliques, puisqu'il s'agit de la principale voie de biosynthèse des composés phénoliques. Une augmentation des composés phénoliques totaux sous la pollution au Cd a été signalée dans plusieurs usines, y compris *P. vulgaris* (Manquian-Cerda et al., 2016 ; Mongkhonsin et al., 2016 ; Younis et al., 2018b ; Chen et al., 2019).

La présente étude a clairement montré que le Cd avait des effets notables sur les teneurs en composés phénoliques en tant que réponse antioxydante au Cd.

III.4. Changements induits par le cadmium sur les composés phénoliques dans les frondes d'*Azolla imbricata*

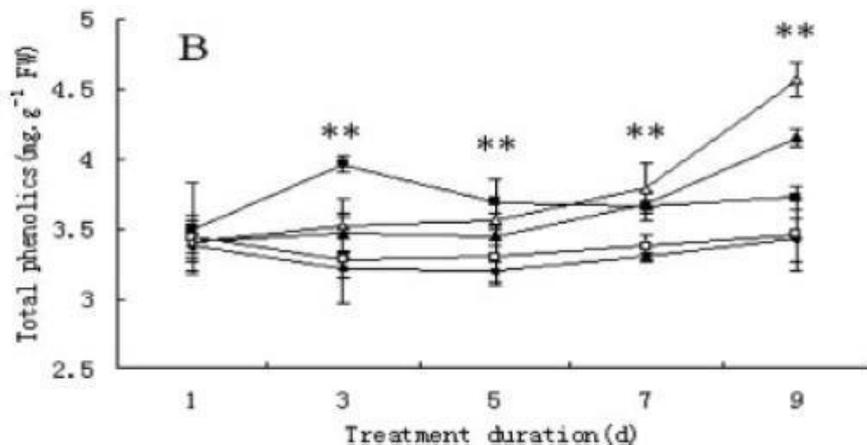


Figure 27: Effets de différentes concentrations de Cd sur les teneurs en composés phénoliques totaux d'*A. imbricata* par rapport au temps (Dai et al., 2006).

La figure 27 montre l'évolution de la teneur totale en composés phénoliques des plantes traitées au Cd pendant les 9 jours de culture. Il n'y avait pas de différence significative dans les teneurs en phénols entre les traitements Cd et le contrôle à 1 jour ($P > 0,05$). Cependant, il y avait des différences significatives dans les teneurs en phénols aux jours 3, 5, 7 et 9 ($P < 0,05$). Les plantes cultivées en contrôle et 0,01 mg/L de Cd sont restées presque constantes en teneurs phénoliques pendant 9 jours de traitement. Au contraire, les plantes cultivées dans 0,5 mg/L de Cd ont montré une augmentation rapide de la teneur en phénols, atteignant la valeur maximale au jour 3, puis ont diminué. Ce résultat indiquait clairement qu'un processus de synthèse de phénol dans les frondes était induit par le traitement au Cd.

Des augmentations de la concentration phénolique en réponse à l'exposition à différents métaux lourds, y compris le Cd, ont été notées dans plusieurs plantes, telles que, *Arabidopsis thaliana* (Lummerzheim et al., 1995), le bouleau (Loponen et al. 1998), *Phyllanthus tenellus* Roxb. (Santiago et al., 2000), Nymphées (*Nymphaeaceae*) (Lavid et al., 2001) et le pin sylvestre (Schützendübel et al., 2001). Il a également été démontré que le principal mécanisme d'accumulation du cadmium était basé sur la liaison du cadmium par les composés phénoliques polymérisés dans Nymphée (*Nymphaeaceae*) (Lavid et al., 2001). Les propriétés antioxydantes des composés phénoliques ont également été bien démontrées (Rice-Evans et al., 1997). Les phénols peuvent contribuer avec l'ascorbate à la destruction de H_2O_2 dans la

Résultats et discussions

réaction d'ascorbate peroxydase couplée au phénol (APX) (Polle *et al.*, 1997), et ainsi protéger les plantes du stress oxydatif. Yamamoto *et al.* (1998) ont rapporté que les composés phénoliques protégeaient les cellules de tabac cultivées de la toxicité de l'aluminium. Dans la présente étude, le stress en Cd a provoqué une augmentation significative de la teneur totale en composés phénoliques dans les frondes (Fig.27). Cette augmentation des composés phénoliques totaux pourrait être considérée comme une réaction protectrice de la plante au stress en Cd.

Nos résultats ont indiqué que la teneur en composés phénoliques totaux était diminuée après 5 jours de traitement à 0,5 mg/L de Cd. Il semble possible qu'un traitement à 0,5 mg/L de Cd soit toxique et létal pour la cellule végétale, conduisant à une inhibition de PAL et donc à une diminution de la biosynthèse des composés phénoliques. Ces résultats suggèrent que le Cd pourrait devenir inhibiteur de PAL au-dessus d'une concentration donnée de Cd et/ou après une période d'exposition donnée. Il est intéressant de noter qu'un phénomène similaire est souvent rapporté dans les réponses des enzymes antioxydantes à l'exposition au Cd dans les racines et les feuilles des plantes (Dixit *et al.*, 2001 ; Schützendübel *et al.*, 2001). Les activités de la plupart des enzymes antioxydantes ont montré une augmentation initiale suivie d'un déclin.

En conclusion, nos résultats ont montré que Les composés phénoliques totaux peuvent être impliqués dans les mécanismes de détoxification interne des frondes contre la toxicité du Cd.

III.5. Effet du cadmium sur la formation de composés phénoliques dans les cultures de callosités dérivées de divers organes du théier (*Camellia sinensis* L.)

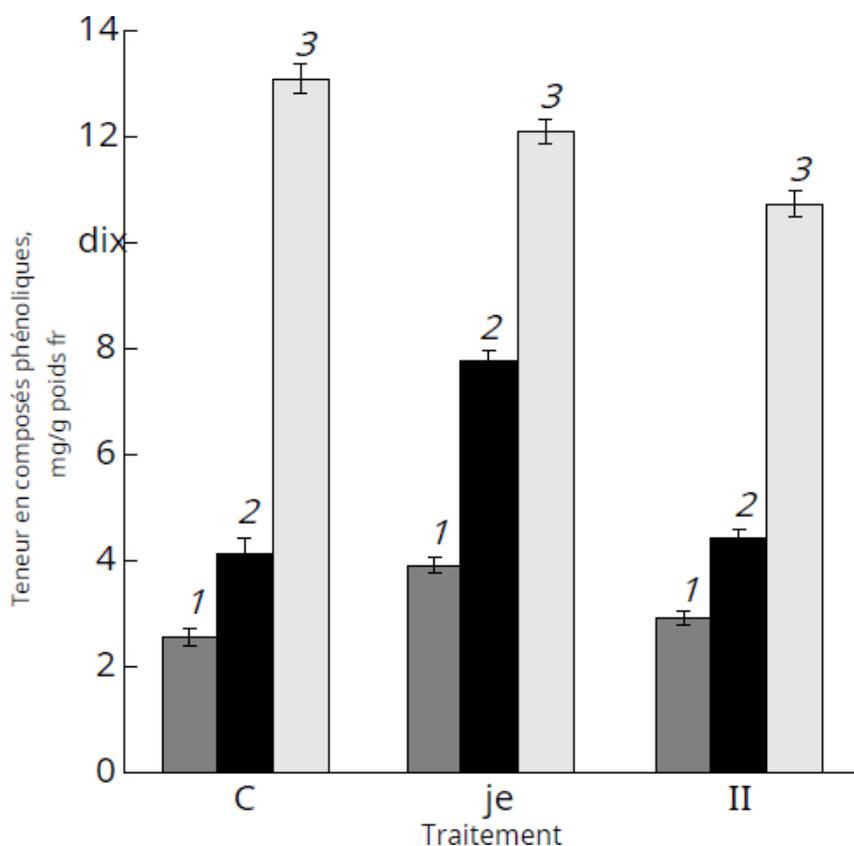


Figure 28 : Effets du cadmium sur les teneurs en composés phénoliques solubles totaux dans les cultures de cals de (1) racines, (2) tige et (3) feuilles, du théier (Zagodkina et al.,2007).

La détermination de la teneur en composés phénoliques a démontré des différences considérables dans le potentiel biosynthétique de la culture de cals de théier (Fig.28). La plus grande accumulation de composés phénoliques solubles totaux a été observée dans la culture de cals foliaires, et la plus faible, dans la culture de racines; les différences entre ces cals dépassaient 500%. Dans le même temps, dans la culture de cals de tige, la teneur en composés phénoliques était trois fois plus faible que dans la culture dérivée des feuilles, et 1,5 fois plus que dans la culture de cal de racine.

La présence de cadmium dans le milieu a affecté la capacité de la culture du cal à former des composés phénoliques. A la concentration en cadmium de $6.3 \times 10^{-5} \text{M}$ (je), les teneurs en composés phénoliques solubles totaux dans les cals des racines et des tiges ont augmenté de 50 et 87 %, respectivement, par rapport au témoin, tandis que dans les cals des feuilles, il n'y

Résultats et discussions

avait qu'une légère diminution (Fig.28). La même tendance, mais un peu moins prononcée, a été observée à une concentration de cadmium plus élevée (10.6×10^{-5} M). Dans ce dernier cas, les cals des racines et des tiges dépassaient les cals témoins dans l'accumulation de composés phénoliques totaux de seulement 13 et 6 %, respectivement, tandis que dans les cals des feuilles, la diminution induite par le cadmium de la teneur en composés phénoliques s'élevait à 20 % par rapport au témoin.

Le cadmium est connu pour initier un stress oxydatif dans les cellules végétales, ce qui entraîne la génération de radicaux libres (**Dixit et al.,2001**). Dans ce cas, les composés phénoliques peuvent agir comme antioxydants endogènes, et nombre d'entre eux sont très compétitifs dans leur activité avec des substances telles que l'acide ascorbique (**Zhao et Zou, 2002**). Il semble que ce soit ce fait qui puisse expliquer l'accumulation de composés phénoliques dans les cultures de cals de théier cultivées en présence de 6.3×10^{-5} M cadmium (Fig.28). La seule exception est le cal foliaire, où le cadmium a entraîné une diminution de la teneur en composés phénoliques.

Comme le montre la Fig.28, la culture foliaire témoin était caractérisée par la plus forte accumulation de composés phénoliques. Par conséquent, leur contenu endogène semble être adéquat pour remplir les fonctions des composés phénoliques, y compris celles antioxydantes. Une diminution induite par le cadmium de la teneur en composés phénoliques est évidemment provoquée par l'atténuation du métabolisme cellulaire sous une croissance de culture supprimée.

Il faut également souligner que la variabilité de la réponse des cultures de cals de théier dérivé des feuilles, des tiges et des racines peut être causée par le fait que les caractéristiques épigénétiques et génétiques des tissus de la plante initiale sont conservées sous conditions in vitro (**Butenko,1999**). A ce propos, il faut noter que les mêmes mécanismes, qui assurent la résistance cellulaire à un agent de stress dans des conditions in vivo, déterminent en grande partie les réponses des cellules végétales dédifférenciées dans des conditions in vitro.

Conclusion

Conclusion

Notre présente étude vise à synthétiser des données sur l'effet du cadmium sur le contenu en composés phénoliques, chez quelques espèces végétales. Pour cela, nous avons choisi les cinq articles précédents, qui étudient en grande partie la variation des teneurs en composés phénoliques totaux en fonction des concentrations de Cd, dont chaque article, présente une espèce traitée différemment par ce métal. Les espèces étudiées sont : L'orge (*Hordeum vulgare L.*), *Erica andevalensis*, l'haricot (*Phaseolus vulgaris L.*), *Azolla imbricata* et le théier (*Camellia sinensis L.*).

L'analyse et la comparaison entre les résultats obtenus, pour toutes les espèces étudiées, ont clairement montré que le cadmium a des effets notables sur la composition phénolique des différents organes de la plante, il a provoqué une augmentation de la teneur des polyphénols totaux dans la partie aérienne et les racines à des pourcentages différents, selon l'organe, les concentrations en Cd et l'espèce étudiée. Généralement, les organes qui synthétisent plus les composés phénoliques sont les feuilles.

Le cadmium joue un rôle indirect dans la synthèse des composés phénoliques. L'augmentation des composés phénoliques en présence du Cd, est considérée comme une réaction protectrice de la plante, en effet, ce sont les composés phénoliques qui jouent un rôle important, en tant que des molécules antioxydantes, dans la détoxification contre le Cd, qui induit un stress oxydatif capable de générer des dommages graves au sein de la cellule.

Lorsque les plantes ont été exposées à des concentrations modérées de cadmium, la teneur en polyphénols totaux a augmenté considérablement, tandis que des concentrations plus élevées ont provoqué une légère augmentation des polyphénols totaux, par rapport aux témoins, et parfois une augmentation élevée suivie d'un déclin après une certaine période d'exposition.

Dans des concentrations élevées de Cd, Les plantes impliquent un mécanisme de défense inconnu en réduisant leur synthèse ou libération de composés phénoliques pour éviter un délétère effet causé par les radicaux phénoxydes de ces derniers, qui peuvent interagir comme des pro-oxydants. D'un autre côté, le cadmium peut conduire au dessus d'une concentration donnée à l'inhibition de l'activité de l'enzyme PAL, responsable de la synthèse des composés phénoliques.

Conclusion

En résumé, le cadmium provoque une augmentation de la synthèse des composés phénoliques, qui est proportionnelle à la dose et la durée d'exposition à ce métal, et qui diffère d'une espèce à l'autre.

Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour analyser les synergies d'interaction et les antagonismes entre le cadmium et les composés phénoliques, mais les composés phénoliques pourraient être utilisés comme biomarqueurs de la présence de cadmium dans les espèces végétales.

De plus, malgré que les espèces végétales se diffèrent par leurs tolérances au cadmium, certaines d'entre elles peuvent être considérées comme bioindicatrices, puisqu'elles colonisent les milieux fortement pollués par le Cd, comme elles peuvent être utilisées comme biofiltres de phytoremédiation à condition qu'elles soient bien contrôlées.

Références bibliographiques

A

- Accodji J-MM., Fiogbé ED., Gangbazo KH. (2009).** Essai de valorisation d'Azolla (*Azolla microphylla Kaulf*) dans la production porcine en zone humide. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* **3(5)**: 890-898.
- Adams MW., Coyne DP., Davis GH., Graham PH., Francis CA. (1985).** Common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Ed. In. R.J. Summer field and E.H. Roberts, Colins, London, Grain legume Crops: 433-476.
- Ahmad P., Nabi G., Ashraf M. (2010).** Cadmium-induced oxidative damage in mustard [*Brassica juncea* (L.) Czern. & Coss.] plants can be alleviated by salicylic acid. *S Afr J Bot*, In Press.
- Alalade OA., Iyayi EE. (2006).** Chemical composition and the feeding value of Azolla (*Azolla pinnata*) Meal for egg-type chicks. *International Journal of Poultry Science*, **(5)**, no. 2. pp.137-141.
- Andrine Louis. (2004).** Diversité structurale et d'activité biologique des Albumines entomotoxiques de type 1b des graines de Légumineuses. N° d'ordre 04 ISAL 012. Lyon.
- Arora A., Byrem TM., Nair MG., Strasbourg GM. (2000).** Modulation de la fluidité de la membrane liposomale par les flavonoïdes et les isoflavonoïdes. – *Archives de biochimie et biophysique.* **(373)** : 102-109.
- Asada K. (1999).** The water-water cycle in chloroplasts: scavenging of active oxygens and dissipation of excess photons. *Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Bio.* **(50)**: 601-639.
- Asensi A., Bennett R., Brooks B., Robinson., Stewart R. (1999).** Copper uptake studies on *Erica andevalensis*, une plante tolérante aux métaux du sud-ouest de l'Espagne. *Communication en sciences du sol et analyse des plantes.* **(30)**: 1615-1624.
- ATSDR. (2008).** ATSDR Toxicological profile for Cadmium (Draft for Public Comment), US Département of Health and Human Services, Public Health Service, Atlanta Google Scholar.

B

- Baisakhi B., Patra J., Panigrahy RK., Panda BB. (2003).** Réponses différentielles enzymatiques antioxydantes et thiols de clones tolérants et non tolérants de *Chloris barbata* au stress en cadmium. *Acta Physiol. Plantaire.* **(25)** : 357-363.
- Baryla A., Carrier P., Franck F. (2001).** Chlorose foliaire chez les plants de colza (*Brassica napus*) Cultivé sur sol pollué par le cadmium : causes et conséquences pour la photosynthèse et la croissance, *Plante.* **(212)** : p. 696–709.
- Berz W. (1977).** Degradation of polyphenols in plants and plant cell suspension cultures, *Physiol. Vég.* **(15)**: pp. 261-277.
- Basak B., Pramanik Mdah., Rahman MS., Tarafdar SU., Roy BC. (2002).** Azolla (*Azolla pinnata*) as a feed ingredient in Broiler ration. *International Journal of Poultry Science.* **1 (1)** :29-34.

Belkheiri N. (2010). Dérivés phénoliques à activités antiathérogènes. Thèse de Doctorat : Université de TOULOUSE.

Belmekki Nacéra., Nassima Bendimerad., Chahrazed Bekhechi., Xavier Fernandez. (2013). Chemical analysis and antimicrobial activity of *Teucrium polium* L. essential oil from Western Algeria, *Journal of Medicinal Plants Research.* **7(14):**897–902.

Benaroya RO., Tzin V., Elisha TO., Zamski E. (2004). Accumulateur de plomb lation dans la fougère aquatique *Azolla filiculoides*. *Plante Physiol Biochem.* **(42):** 639-645.

Benhabilas Ait EL Hocine K., Bellout Y., Amghar F. (2020). Effet du stress cadmié sur la teneur en polyphénols, les paramètres morphologiques, physiologiques et anatomiques du haricot (*Phaseolus vulgaris* L.). *Ecologie appliqué et recherche environnementale.* **18(2):**3757-3774.

Bernal G., Graham PH. (2001). Diversity in the rhizobia associated with *Phaseolus vulgaris* L. in Ecuador, and comparisons with Mexican bean rhizobia. *Canadian J Microbiol.* **47 (6):** 526-534.

Bourrelier PH., Berthelin J. (1998). Contamination des sols par les éléments en traces: les risques et leur gestion. Rapport de l'Académie des sciences n°42

Butenko RG. (1999). *Biologiya kletok vysshikh rastenii In Vitro I biotekhnologii na ikh osnove* (Biologie des cellules végétales supérieures cultivées et leur utilisation en biotechnologie), Moscou : FBK.

C

Caldwell MM., Bornman JF., Ballaré CL., Flint SD., Kulandaivelu G.(2007). Terrestrial ecosystems, increased solar ultraviolet radiation, and interactions with other climate change factors. *Photochemical et Photobiological Science.* **(6) :** 252-266.

Cabezudo B., Rivera J. (1980). Notas taxonomicas y corologicas sobre la ora de *Andalucia occidental.2. Erica andevalensis*. *NI., Lagasalia.* **(9) :**223-226.

Canado IC., Doussinague C., Villena E. (2003). *Technicien en agriculture.* Ed. Cultural S.A.Madrid. 519.

Chanforan C. (2010). Stabilité de microconstituants de la tomate (composés phénoliques, caroténoïdes, vitamines C et E) au cours des procédés de transformation : études en systèmes modèles, mise au point d'un modèle stoechio-cinétique et validation pour l'étape unitaire de préparation de sauce tomate. Thèse de Doctorat : Université D'AVIGNON et des PAYS de VAUCLUSE.

Chen S., Wang Q., Lu H., Li J., Yang D., Liu J., Yan C. (2019). métabolisme phénolique et mécanisme de tolérance aux métaux lourds associé dans *Kandelia obovata* sous contrainte Cd et Zn.

Chiffolleau ., Chiffolleau JF., Auger D., Chartier E., Truquet I. (2002). Identification et devenir des apports inta-estuariens de métaux-traces dans l'estuaire de la Seine. Programme scientifique Seine-aval, technical report 1996/FIN. **(3) :** pp. 5-23.

Chira K., Suh JH., Teissedre PL. (2008). Les polyphenols du raisin. *Phytotherapie.* **(6):**75-82.

Cho UH., Seo NH. (2005). Oxidative stress in *Arabidopsis thaliana* exposed to cadmium is due to hydrogen peroxide accumulation. *Plant Sci.* (168): 113-120.

Clemens S. (2006). Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants. *Biochimie.* (88): 1707-1719.

Clemens S., Palmgren MG, Krämer U. (2002). A long way ahead: understanding and engineering plant metal accumulation. *Trends Plant Sci.* (7): 309-315.

Cohen-Shoel N., Barkay Z., Ilzyer D., Gilath I., Tel-Or E. (2002). Biofiltration of toxic elements by *Azolla* biomass. *Water, Air, and Soil Pollution.* (135): 93-104.

Cosio C., DeSantis L., Frey B., Diallo S., Keller C.(2005). Distribution of cadmium in leaves of *Thlaspi caerulescens*. *J Exp Bot.* (56): 765-775.

Costa ML., Santos MCR., Carrapico., F Pereirac AL.(2009). *Azolla*-*Anabaena*'s behaviour in urban wastewater and artificial media-Influence of combined nitrogen. *Water Resource.* (43) :3743-3750.

Coullery P .(1997).Comportement de métaux lourds en agrosystèmes tempérés à faible taux de pollution. Thèse de Doctorat. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne.

D

Dai Ling-Ping., Xiong Zhi-Ting., Hung Yu., Li Min-Jing. (2006). Changements induits pr le cadmium dans les pigments, les composés phénoliques totaux et l'activité phénylalanine ammoniac-lyase dans les frondes de *Azolla imbricata*. *Environ toxicol.* (21) : 505-512.

Dahmani-Müller H. (2000). Phytoréhabilitation des sols pollués par des éléments métalliques : facteurs et mécanismes de prélèvement dans les sols et d'accumulation par les espèces métalliques. Thèse de Doctorat, ENGREF, Paris.

De La Rosa G., Peralta-Videa JR., Montes M., Parsons JG., Cano-Aguilera I., Gardea- Torresdey JL. (2004).Cadmium uptake and translocation in tumbleweed (*Salsola kali*), a potential Cd-hyper accumulator desert plant species: ICP/OES and XAS studies. *Chemosphere.* (55): 1159-1168.

Del Rio D., Stalmach A., Calani L., Crozier A. (2010). Bioavailability of coffee chlorogenic acids and green tea flavan-3-ols. *Nutrients.* (2) : 820-833.

Derbel S., Ghedira K. (2005). Les phytonutriments et leurs impacts sur la santé. Tunisie. *Phytothérapie.* Numéro. (1) :28-34.

Descheemaeker K. (2003). Nutri-et Phytothérapie : Developpements Recents. Edition *Garant.* Pp 12-46.

Diaw NF. (2002). Utilisation des inoculums de rhizobium pour la culture du haricot (*Phaseolus vulgaris*) au Sénégal. Thèse doctorat. Université Cheikh Anta Diop. Dakar, 97.

Díaz J., Bernal A., Pomar F., Merino F. (2001). Induction of shikimate dehydrogenase and peroxidase in pepper (*Capsicum annuum* L.) seedlings in response to copper stress and its relation to lignification.

Dicko MH., Gruppen H., Traoré AS., Alphons GJ., Willem JH., Berkel V.(2006). Phenolic compounds and related enzymes as determinants of sorghum for food use. *Biotechnology and Molecular Biology Review* . **1 (1)**: Pp. 21-38, April.

Dixit V., Pandey V., Shyam R. (2001). Differentia lAntioxidative Responses to Cadmium in Roots and Leaves of Pea (*Pisum sativum* L., cv. Azad.), *J. Exp. Bot.* (**52**): p. 1101–1109.

Dixon RA., Paiva NL. (1995). Stress-Induced PhenylpropanoidMetabolism, *Cellule de plante.* (**7**) : p. 1085–1097.

Domínguez DM., Garc'ía FC., Raya AC., Santiago RT. (2010). Cadmium-induite par le stress oxydatif et la réponse du système de défense antioxydant dans *Spartine densiflora*," *Physiologie plantaire.* (**139**), non. 3, p. 289-302.

Dudjak J., Lachman D., Miholova D., Kilofova V., Pivec. (2004). Effet du cadmium sur la teneur en polyhénolq des jeunes plantes d'orge (*Hordeum vulgare* L.). *Envirennement du sol végétal*, **50 (11)** : 471-477.

E

Esra K., İŞLEK C., Üstün AS. (2010). Effect of cold on protein, proline, phenolic compounds and chlorophyll content of two pepper (*Capsicum annum* L.) varieties. *Gazi Univ. J. Sci.* (**23**) : 1–6.

F

Feillet P. (2000). Le grain de blé composition et utilisation. Ed. INRA, Paris, p.308.

Feldman M. (1976). Taxonomic classification and names of wild, primitive, cultivated, and modern cultivated wheat. In: Simmonds N.W. ed., *Evolution of crop plants*. Longman, London, 120-128.

Ferreira R., Fornazier R., Vitoria A. (2002). Modifications des activités enzymatiques antioxydantes dans le soja sous stress cadmium, *J. Plant Nutr.* (**25**) : p. 327-342.

Fiogbé ED., Micha J C., Van Hove C. (2004). Use of a natural aquatic fern, *Azolla microphylla*, as a main component in food for the omnivorous– phytoplanktonophagous tilapia, *Oreochromis niloticus* L. *J. Appl. Ichthyol.* (**20**): pp. 517–520.

Fleuriet A., Macheix J. (2003). Phenolic acids in fruits and vegetables. In: *Flafonoids in health and Disease*, Rise-Evans CA, Packer L, eds, Marcel Dekker, New York, , pp. 1-41.

Fraga CG. (2009). Plant phenolics and human health : *Biochemistry, Nutrition, and Pharmacology*. John Wiley & Sons Edition, pp 5-13.

Franceschi VR., Krekling T., Berryman AA., Christiansen E. (1998). Specialized phloem parenchyma cells in Norway spruce (*Pinaceae*) bark are an important site of defense reactions. *American Journal of Botany.* (**85**) : 601–615.

G

Gadallah.(1995). MAA, Effet du Cd et de la kinétine sur la teneur en chlorophylle, les saccharides et l'accumulation de matière sèche dans les plants de tournesol, Biol. Plante. (37) :233-240.

Ghedira K. (2005). Les flavonoïdes: structure, propriétés biologiques, rôle prophylactique et emplois en thérapeutique. Phytotherapie .3(4) : 162-169.

Ghnimi W. (2015). Etude phytochimique des extraits de deux Euphorbiacées : Ricinus communis et Jatropha curcas. Evaluation de leur propriété anti-oxydante et de leur action inhibitrice sur l'activité de l'acétylcholinestérase, pp 26-42.

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

Guignard J L. (2000). Les metabolites secondaires. In biochimie végétale 2eme Edition. Paris Dounot, 155-176.

Guignard J L., Cosson L., Henry M. (1985). Abérgé de phytochimie, Masson. Paris, Pp 138.

Gundlach H., Muller MJ. Kutchan TM. MHZ. (1992). Jasmonic acid is a signal transducer in elicitor-induced plant cell cultures, Proc. Natl. Acad. Sci. USA. (89): pp. 2389-2393.

H

Haghighi Z., Modarresi M., Mollayi S., others. (2012). Enhancement of compatible solute and secondary metabolites production in Plantago ovata Forsk. by salinity stress. J. Med. Plants Res (6): 3495–3500.

Halliwell B., Gutteridge JMC. (1999). Free radicals in biology and medicine. 3rd ed. New. York, Oxford University Press, 936 pp

Hamid N., Bukhari N., Faiza J. (2010). Physiological responses of *Phaseolus vulgaris* to different lead concentrations. 239–246.

Hart JJ. Norvell WA., Welch RM., Sullivan LA., Kochian LV. (1998a). Characterization of zinc uptake, binding, and translocation in intact seedlings of bread and durum wheat cultivars.

Hart JJ., Welch RM., Norvell WA., Sullivan LA., Kochian LV. (1998b). Characterization of cadmium binding, uptake, and translocation in intact seedlings of bread and durum wheat cultivars. Plant Physiol. (116): 1413-1420.

Hasan MR., Chakrabarti R. (2009). Use of algae and aquatic macrophytes as feed in small-scale aquaculture. A review. FAO Fisheries and Aquaculture technical paper, 531. FAO, Rome, Italy.

Hawrylak B., Matraszek R., Szymańska M. (2007). Response of Lettuce (*Lactuca Sativa L.*) to Selenium in Nutrient Solution Contaminated with Nickel. Veg Crops Res Bull. (67):63– 70.

He SG., Joyce D., Zu M. (2005b). Caractérisation des polyamines oxy-dase de la fougère aquatique fixatrice d'azote *Azolla imbricata*. Plant Sci . (169):185-190.

He ZL., Yang XE., Stoffella PJ. (2005a). Trace éléments in agroecosystems and impacts on the environment. *J Trace Elem Med Biol.* (19): 125- 140.

Hideg E., Juhasz M., Bornman JF., Asada K. (2002). : La distribution et l'origine possible du fluo-bleu-vertrescence dans les limbes des feuilles d'orge témoins et stressés. *Photochem. Photobiol. Sci.*(1): 934-941.

Hoffmann D. (2003). Medical Herbalism : The Science and Practice of Herbal Medicine. Edition Inner Traditions / Bear & Co., p 90.

Hopkins HG. (2003). Physiologie végétale. De Boeck Supérieur, p 280.

Hopkins WG. (2003). Molécules et métabolismes In physiologie végétal. De Boeck et Lacier (S.a). PP, 268-282. ISBN 2-7445-0089-5.

Hovmand MF., Tjell JC., Mosbaek H. (1983). Plant uptake of airborne cadmium. *Environ Poll.* (30): 27-38.

Hsu YT., Kao CH. (2004). Cadmium toxicity is reduced by nitric oxide in rice leaves. *Plant Growth Regul.* (42): 227-238.

J

Jarrige R., Ruckebusch Y. (1995). Nutrition des ruminants domestiques : Ingestion et digestion. Editions Quae, p 57.

Jean-denis JB. (2005). Caractérisation de polyphénols stilbéniques et de dérivés induits ou constitutifs de la vigne impliqués dans sa défense contre l'agent pathogène du mildiou de la vigne, *Plasmopara viticola* (Berk. and Curt.). Thèse de Doctorat : Université de NEUCHÂTEL.

Juste C. (1988). Appréciation de la mobilité et de la biodisponibilité des éléments en traces des sols. *Science du sol.* 26 (2):103-112.

Juste C., Chassin P., Gomez A., Linéres M. (1995). Mécrot B les Micro-polluants Métalliques dans les Boues Résiduaire des stations d'épuration ADEME, Angers and INRA, Paris, France.

K

Kabata Pendias A., Pendias H. (2001). Trace éléments in soils and plants. Third Edition. CRC Press Press, Boca Raton, Florida.

Kakuzo Okakura d'Or., Corraillod N. (2003). Le livre de Thé, Arbre avril Suisse 4.

Khalid KA. (2006). Influence of water stress on growth, essential oil, and chemical composition of herbs (*Ocimum* sp.). *Int Agrophys.* (20): 289–296.

Khatun A., Ali MA., Dingle JG.(1999). Comparative of the nutritive value for laying hens of diets containing *Azolla* (*Azolla pinnata*) based on formulation using digestible protein and digestible amino acid versus total protein and total amino acid. *Animal Feed Science and Technology.* (81): 43-56.

Kong JM., Chia LS., Goh NK., Chia T F., Brouillard R. (2003). Analysis and biological activities of anthocyanins. *Phytochemistry.* (64): 923–933.

Kovcik J., Tomko J., Backor M., Repek M. (2006). Matricaire camomille n'est pas un hyperaccumulateur, mais tolérant au stress en cadmium. – Régulation de croissance des plantes. (50) : 239-247.

Krupa Z., Baranowska M., Orzol D. (1996). Les anthocyanes peuvent-elles être considérées comme un indicateur de stress des métaux lourds chez les plantes supérieures ? Plante Acta Physiol. (18):147-51.

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

Kuthanova A., Gemperlova L., Zelenkova S., Eder J., Machackova I., Opatrny Z., Cvikrova M. (2004). Cytological Changes and Alterations in Polyamine Contents Induced by Cadmium en Cellules Tabac BY-2, Physiol végétal. Biochimie, (42): p.149-156.

L

Lachman J., Orsák M., Lapčík O., Pivec V., Hosnedl V. (2001). Modifications des taux d'isoflavonoïdes dans le pois (*Pisum sativum* L.) graines, plantules et plantes influencées par les UV-A et -irradiation. Sci. Agric. Bohème. (32):183-196.

Lacy A., O'Kennedy R. (2004). Studies on Coumarins and Coumarin-Related Compounds to Determine their Therapeutic Role in the Treatment of Cancer. Current Pharmaceutical Design. (10): 3797-3811.

Lahouel M. (2005). Interaction flavonoïdes-mitochondrie et rôle de la propolis dans la prévention de l'apoptose induite par certains médicaments anticancéreux, Thèse de doctorat de l'université Mentouri de Constantine.

Laumonier R. (1979). cultures légumières et maraichères. ED. J.B. Baillière, Paris 276.

Lavid N., Schwartz A., Lewinsohn E., Tel-Or E. (2001). Phénols et les phénol oxydases sont impliquées dans l'accumulation de cadmium dans les plantes aquatiques *Nymphoides peltata* (Menyanthaceae) et *Nymphaeae* (Nymphaeaceae). Planta. (214): 189-195.

Lavola A., Aphalo P.J., Lahti M., Julkunen-Tiitto R. (2003). Nutrient availability and the effect of increasing UV-B radiation on secondary plant compounds in Scots pine. Environ. Exp. Bot. (49): 49–60.

Lograda T. (2014). Chemical analysis and antimicrobial activity of *Teucrium polium* L. Essential oil from eastern Algeria. American Journal of Advanced Drug Delivery. 697-710.

Loponen V.O.J., Lempa E.H.K., Pihlaja K. (1998). Concentrations et corrélations entre composés de composés phénoliques individuels dans des feuilles de bouleau blanc soumises à un stress de pollution atmosphérique. Chemosphère. (37) : 1445–1456.

Lozano-Rodriguez E., Hernandez L.E., Bonay P., Carpena-Ruiz R.O. (1997). Distribution of cadmium in shoot and root tissues of maize and pea plants: Physiological disturbances. J Exp Bot. (48): 123-128

Lummerzheim M., Sandroni M., Castresana C., Oliveira DDE., Vanmontagu M., Roby D., Timmerman B. (1995). Caractérisation microscopique et enzymatique comparative de la nécrose foliaire induite chez *Arabidopsis thaliana* par le nitrate de plomb et par *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* après pulvérisation foliaire. *Cellule de plante Environ.* (18) :499-509.

M

Macheix JJ., Fleuriet A., Billot J., CRC Press Boca Raton. (1990). 378.

Macheix JJ., Fleureit A., Jay-Allemand C. (2005). Les composés phénoliques : un exemple de métabolites secondaires d'importance économique. Lausanne, Presses Polytechniques et universitaires romandes.1, 2-88074-625.(6), pp.27-30.

Macheix JJ., Fleureit A., Sarni-Manchado P. (2005). Les composés phénoliques dans la plante: structure, biosynthèse, répartition et rôles. In : Les polyphénols en agroalimentaire, Cheynier V., Sarni-Manchado P., eds, Tec et Doc, Lavoisier, Paris, à paraître.

Manquián-Cerda K., Escudey M., Zúñiga G., Arancibia-Miranda N., Molina M., Cruces E. (2016). Effet du cadmium sur les composés phénoliques, l'activité enzymatique antioxydante et le stress oxydatif chez le bleuët (*Vaccinium corymbosum* L.) plantules cultivées in vitro. – *Ecotoxicol. Environ. Saf.* (133) : 316-326.

Márquez-García B., Fernández MA., Córdoba F. (2009). « Phenolics composition in *Erica* sp. différentiellement exposé à la pollution métallique dans la ceinture pyritique sud-ouest ibérique », *Bioressources Technologie*, 100, non. 1, p. 446–451.

Márquez-García B., Horemans N., Cuypers., Guisez Y., Córdoba F. (2011). Les antioxydants dans *Erica andevalensis* : une étude comparative entre les plantes sauvages et les plantes exposées au cadmium dans des conditions contrôlées. *Physiologie et biochimie végétales*, 49, non. 1, p. 110-115.

Márquez-García B., Angeles Fernandez-Recamales M., Cordoue F. (2012). Effet de la composition phénolique du cadmium et des activités antioxydantes de *Erica andevalensis*. *Journal de botanique* (2012) :6.

Martínez Dominguez D., Cordoba Garcia F., Canalejo Raya A., Torronteras Santiago R. (2010). Cadmium-induced oxidative stress and the response of the antioxidative defense system in *Spartina densiflora*. *Physiol Plant*

Maury S., Legrand M. (2000). Etude des O-méthyltransférases de la voie des phénylpropanoïdes dans le tabac et modulation de leur expression dans les tabac transgénique: conséquences sur la synthèse de la lignine et d'autres composés phénoliques et sur la résistance aux agents pathogènes : INIST-CNRS, cote INVIST: T 127548. Université de strasbourg, France.

McLaughlin MJ., Tiller KG., Naidu R., Stevens DP.(1999). The behaviour and environmental impact of contaminants in fertilisers. *Aust. J. Soil Res.* (34): 1-54.

Melato FA., Regnier T., McCrindle RI., Mokgalaka N S. (2012). Impact of metals on secondary metabolites production and plant morphology in vetiver grass (*Chrysopogon zizanioides*). *South Afr J Chem.* (65):178–183.

Metwally A., Finkemeier I., Georgi M., Dietz KJ. (2003). Salicylic acid alleviates the cadmium toxicity in barley seedlings. *Plant Physiol.* (132): 272-281.

Milone MT., Sgherri C., Clijsters H., Navari- Izzo F. (2003). Antioxidative responses of wheat treated with realistic concentration of cadmium. *Environ Exp Bot* (50): 265-276.

Moghtader M. (2009). Chemical composition of the essential oil of *Teucrium polium* L. from Iran. *Am-Eurasian J Agric Environ Sci.* (56) : 843-846.

Mongkhonsin B., Nakbanpote W., Hokura A., Nuengchannon N., Maneechai S. (2016) .Composés phénoliques répondant aux traitements au zinc et/ou au cadmium dans *Gynura pseudochina* (L.) DC. Extraits et biomasse. – *Physiol Végétal. Biochimie.* (109) : 549-560.

Mortvedt JJ., Beaton JD. (1995). Heavy métal and radionuclide contaminants in phosphate fertilisers. In: Tiessen H, editor. *Phosphorus in the global environment: transfer, cycles and management.* New York: Wiley p 93-106.

N

Navarro JM., Flores P., Garrido C., Martinez V. (2006). Modifications du contenu des composés antioxydants dans les fruits du poivre aux stades de maturation, en fonction de la salinité. *Chimie alimentaire.* (96): 66-73.

Nissiotis M., Tasioula-Margari M. (2002). Changes in antioxidant concentration of virgin olive oil during thermal oxidation. *Food chemistry,* (77), Pp. 371-376. Valorisation des polyphénols extraits des margines en tant qu'antioxydants naturels dans les huiles végétales. IN Nassif, D.2004. Mémoire (DEA).INRA.FRANCE.

Nyabyenda P. (2005). les plantes cultivées en régions tropicales d'altitude d'Afrique : Généralités, légumineuses alimentaires, Plantes à tubercules et racines, céréales. Gembloux : presses agronomiques de Gembloux.

O

O'Kennedy R., Thornes RD. (1997). Coumarins: Biology, Applications and Mode of Action. John Wiley & Sons Inc. New York. N.Y.

Orsák M., Lachman J., Vejdová M., Pivec V., Hamouz K. (2001) : Modifications de certains métabolites secondaires dans les pommes de terre et le sarrasin causées par les UV, - et l'irradiation par micro-ondes. *Rostl. V ýr.* (47) : 493-500.

Ozgun R., Uzilday B., Sekmen AH ., Turkan I. (2013). Régulation des espèces réactives de l'oxygène et défense antioxydante chez les halophytes. – *Biologie végétale fonctionnelle.* (40) : 832-847.

P

Parida AK., Das AB. (2005). Tolérance au sel et effets de la salinité sur les plantes : une revue. *Ecotoxicol Environ Saf.* (60):324-49.

Pei-gen Xiao., Zhen-yuLi. (2002). Peroxydation lipidique et activités de capacité antioxydante. *Environ. Exp. Bot.* (50): 67-78.

Peterson J., Dwyer J., Adlercreutz H., Scalbert A., Jacques P., McCullough ML. (2010). Dietary lignans: physiology and potential for cardiovascular disease risk reduction. *Nutr. Rev.* **68(10)**: 571–603.

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

Polle A., Otter T., Sandermann HJ. (1997). Biochimie et physiologie de la synthèse de la lignine. Dans : Rennenberg H, Escherich W, Ziegler H, éditeurs. Arbres : Contributions à la physiologie moderne des arbres. Leyde : Éditeurs Backhuys. pages 455–477.

Portet B. (2007). Recherche bioguidée de molécules antipaludiques d'une plante guyanaise. *Piper hostmannianum* var. *berbicense*. Thèse de Doctorat : Université de TOULOUSE.

Pujola M., Farreras A., Casanas F. (2007). Protein and Starch content of raw, soaked and cooked beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Food chemistry.* **(102)**: 1034-1041.

R

Raja W., Rathaur P., John SA., Ramteke PW. (2012). Azolla: an aquatic pteridophyte with great potential. *International Journal of Research in Biological Sciences* 2012. **2(2)**: 68-72.

Ramakrishna A., Ravishankar GA. (2011). Influence of abiotic stress signals on secondary metabolites in plants. *Plant Signal Behav.* **(6)**:1720–1731.

Ramos I., Esteban E., Lucena JJ., Garate A. (2002). Cadmium uptake and subcellular distribution in plants of *Lactuca* sp Cd-Mn interaction. *Plant Sci.* **(162)**: 761-767.

Razinger J., Dermastia M., Koce JD., Zrimec A. (2008). Oxidative stress in duckweed (*Lemna minor* L.) caused by short-term cadmium exposure. *Environ Pollut.* **(153)**: 687-694.

Rice-Evans CA., Miller NJ., Paganga G. (1997). Propriétés antioxydantes des composés phénoliques, *Tendances Plant Sc.* **(2)** : p. 152-159.

Rivero RM., Ruiz JM., García PC., López-Lefebvre LR., Sánchez E., Romero L. (2001). Resistance to cold and heat stress: accumulation of phenolic compounds in tomato and watermelon plants. *Plant science (Shannon, Ireland).* **(160)** : 315-321.

S

Sakihama Y., Yamasaki H. (2002). La peroxydation lipidique induite par les composés phénoliques en liaison avec les ions aluminium. – *Biol. Plantarum.* **(45)** : 249-254.

Sakihama Y., Cohen MF., Grace SC., Yamasaki H. (2002). Activités antioxydantes et prooxydantes phénoliques des plantes : dommages oxydatifs induits par les phénols médiés par les métaux dans les plantes» *Toxicologie.* **(177)** : non. 1, p. 67-80.

Sandalio LM., Dalurzo NC., Gomez M. Cadmium-Induced Changes in the Growth and Oxidative.

Sanita di Toppi L., Gabbrielli R. (1999). Response to Cadmium in Higher Plants, *Environ. Exp. Bot.* (41), p. 105-130.

Santiago LJM., Louro RP., De Oliveira DE. (2000). Compartimentation de composés phénoliques et de phénylalanine ammonia-lyase dans les feuilles de *Phyllanthus tenellus* Roxb et leur induction par le sulfate de cuivre. *Ann Bot.* (86) : 1023-1032.

Sarni-Manchado P., Cheynier V. (2006). Les polyphénols en agroalimentaire, Tec et Doc Lavoisier-Paris.

Schafer F Q., Wang HP. Kelly EE. (2002). Comparaison du bêta-carotène, de la vitamine E et de l'oxyde nitrique en tant qu'antioxydants membranaires. – *The Journal of Biological Chemistry.* (383) : 671- 681.

Schützendübel A., Schwanz P., Teichmann T., Gross K., Heyser RL., Godbold DL., Polle A. (2001). Changements induits par le cadmium dans les systèmes antioxydants, la teneur en peroxyde d'hydrogène et la différenciation dans les racines de pin sylvestre. *Plante Physiol.* (127): 887-898.

Sela M., Garty J., Tel-Or E. (1989). L'accumulation et l'effet de métaux lourds sur la fougère d'eau *Azolla filiculoides*. *Nouveau Phytol.* (112) :7-12.

Serag MS., El-Hakeem A., Badway M., Mousa MA. (2000). On the Ecology of *Azolla filiculoides* Lam. in Damietta District, Egypt. *Limnologia.* (30): 73-81.

Seregin IV., Ivanov VB. (2001). Aspects physiologiques des effets toxiques du cadmium et du plomb sur les plantes supérieures, *Russ. J. Plante Physiol.* (48), p.523-544.

Shiomi N., Kitoh S. (2001). *Azolla* in a pond, nutrient composition, and use as fish food. *Soil Sci, Plant Nutr.* 47(1): pp. 27-34.

Shipp J., Abdel-Aal El-S M. (2010). Food Applications and Physiological Effects of Anthocyanins as Functional Food Ingredients. *The Open Food Science Journal.* (4): 7-22.

Singh R., Tripathi RD., Dwivedi S., Singh M., Trivedi PK., Chakrabarty D.(2010). Cadmium-induced biochemical responses of *Vallisneria spiralis*. *Protoplasma*

Singh S., Sinha S. (2005). Accumulation de métaux et ses effets chez *Brassica juncea* (L.) Czern. (cv. Rohini) cultivé sur divers amendements de déchets de tannerie. *Ecotoxicol Environ Saf.* (62) : 118-27.

Smeets K., Cuypers A., Lambrechts A., Semane B., Hoet P., Van Laere A., Vangronsveld J. (2005). Induction du stress oxydatif et mécanismes antioxydants dans *Phaseolus vulgaris* après application du Cd. – *Physiologie et biochimie végétales.* (43) : 437-444.

Stafford A. (1991). Produits naturels et métabolites de plantes et de cultures de tissus végétaux, *Culture cellulaire et tissulaire végétale*, Stafford, A. et Warren, G., Eds., Milton Keynes : Open Univ. pp. 124-162.

Szőllősi R., Varga IS., Erdei L., Mihalik E. (2009). Cadmium-induced oxidative stress and antioxidative mechanisms in germinating Indian mustard (*Brassica juncea* L.) seeds. *Ecotoxicol Environ Saf.* (72): 1337-1342.

T

Tapas AR., Sakarkar DM., Kakde RB. (2008). Flavonoids as Nutraceuticals: A Review. *Tropical Journal of Pharmaceutical Research.* **7 (3):1089-1099.**

Tomas-Barberan . A., Ferreres F., Gil M L. (2000). Antioxidant phenolic metabolites from fruit and vegetables and changes during postharvest storage and processing. *Atta-ur-Rahman (Ed.) Studies in Natural Products Chemistry.* **(23): p747.**

Tsao R. (2010). Chemistry and biochemistry of dietary polyphenols. *Nutrients.* **(2): 1231-1246.**

U

Uheda E., Kitoh S., Shiomi N. (1999). Réponse de six *Azolla* espèce aux contraintes transitoires à haute température. *Aquat Bot.* **64:87-92.** Wagner directeur général. **(1997).** *Azolla : Un examen de sa biologie et de son utilisation.* *Bot Rev.* **(63): 1–26.**

V

Vazquez MD., Poschenrieder C., Barcelo J. (1992). Ultrastructural effects and localization of low cadmium concentrations in bean roots. *New Phytol.* **(120): 215-226**

Visioli F., Galli C., Bornet F., Mattei A., Patelli R., Galli G., Caruso D. (2000). Olive oil phenolics are dose- dependently absorbed in humans. *FEBS Letters.***(468) :159-160.**

Visioli, F., Romani, A., Mulinacci N., Zarini, S., Conte D., Vincieri F ., Galli C. (1999). Antioxidants and other biological activities of olive mill waste waters. *J.Agric.Food Chem* **(47): Pp. 3397-3401.**

Vollmannova A., Musilova J., Toth T., Arvay J., Bystrick J., Medvecky M., Daniel J. (2014). Composés phénoliques, activité antioxydante et teneur en Cu, Zn, Cd et Pb dans les canneberges sauvages et cultivées et les bleuets Stagiaire. – *J. Environ. Anal. Chem.* **(94): 1445-1451.**

W

Wagner GJ. (1993). Accumulation of cadmium in crop plants and its consequences to human health. *Adv Agron.* **(51): 173-212.**

Wang J ., Mazza G. (2002). Effect of Anthcyanins and other phenolic compounds on the production of Tumor Necrosis Factors α in LPS/IFN- γ -Activated RAW.264.7.Macrophages. *J.Agric.Food.Chem.***(50) :4183-4189.**

WEIRMAN R. (1981). Secondary plant products and cell and tissue differentiation. In: *Secondary plant products*, Conn E.E., ed, Academic Press, New York, , pp. 85-116.

Wortmann CS., Kirkby RA., Eledu CA., Allen DJ. (1998). Atlas of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in Africa. CIAT, Cali , Colombia.

Wu FB., Zhang GP., Dominy P. (2003). Quatre génotypes d'orge répondent différemment au cadmium.

Y

Yamamoto Y., Hachia A., Hamada H., Matsumoto H. (1998). Phénylpropanoïdes comme protecteur de la toxicité de l'aluminium dans les cellules de tabac en culture. *Cellule végétale Physiol.* (39): 950-957.

Younis ME., Tourky SMN., Elsharkaw SEA. (2018). Paramètres symptomatiques du stress oxydatif et du système de défense antioxydant chez *Phaseolus vulgaris L.* en réponse à un stress de cuivre ou de cadmium. – *South African Journal of Botany.* (117) : 207-214.

Z

Zagoskina NV., Dubravina GA., Alyavina AK., Goncharuk EA. (2003). Effet du rayonnement ultraviolet (UV-B) sur la formation et la localisation de composés phénoliques dans les cultures de cals de théier, *Russ. J. Physiol.* (50) : p. 270-275.

Zagoskina NV., Gontcharuk EA., Alyavina AK. (2007). Effet du cadmium sur la formation de composés phénoliques dans les cultures de callosités dérivées de divers organes du théier. Institut Timiryazev de physiologie végétal. 7(495) : 977-8018.

Zaprometov., Minnesota., Fenol'nye soedineniya .(1993). (Composés phénoliques), Moscou : Nauka,

Zaprometov MN. (1989). La formation de composés phénoliques dans les cultures cellulaires et tissulaires végétales et la possibilité de sa régulation, *Av. Culte cellulaire .* (7): 201-260.

Zaprometov MN., Zagoskina NV., Strekova VYu., Morozova GA. (1979). Formation et différenciation de composés phénoliques dans les cultures de cals de théier, *Sov. Physiol Végétal.* (26): p. 485-491.

Zhang L., Wang Q., Guo Q., Chang Q., Zhu Z., Liu L., Xu H. (2012). Growth, physiological characteristics and total flavonoid content of *Glechoma longituba* in response to water stress. *J. Med. Plants Res.*(6) : 1015–1024.

Zhang Y., Xiao H. (1998). Effet antagoniste de l'aberration chromosomique induite par le cadmium et de la micronu-clei dans les cellules de racine de *Hordeum vulgare*, *Mutat. Rés.* (420) : p. 1-6.

Zhao M., Duncan JR., Vanhille RPV.(1999). Enlèvement et récupération de nickel à partir d'une solution aqueuse et d'un effluent de rinçage de galvanoplastie utilisant *Azolla filiculoides*. *Eau Res.* (33):1516-1522.

Zhao HJ., Zou Q. (2002). Protective Effects of Exogen Antioxidants and Phenolic Compounds on Photosynthesis of Wheat Leaves under High Irradiance and Oxidative Stress, *Photosynthétique .* (40): p. 523-527.

Annexes

Annexe 01 : la biosynthèse des composés phénoliques

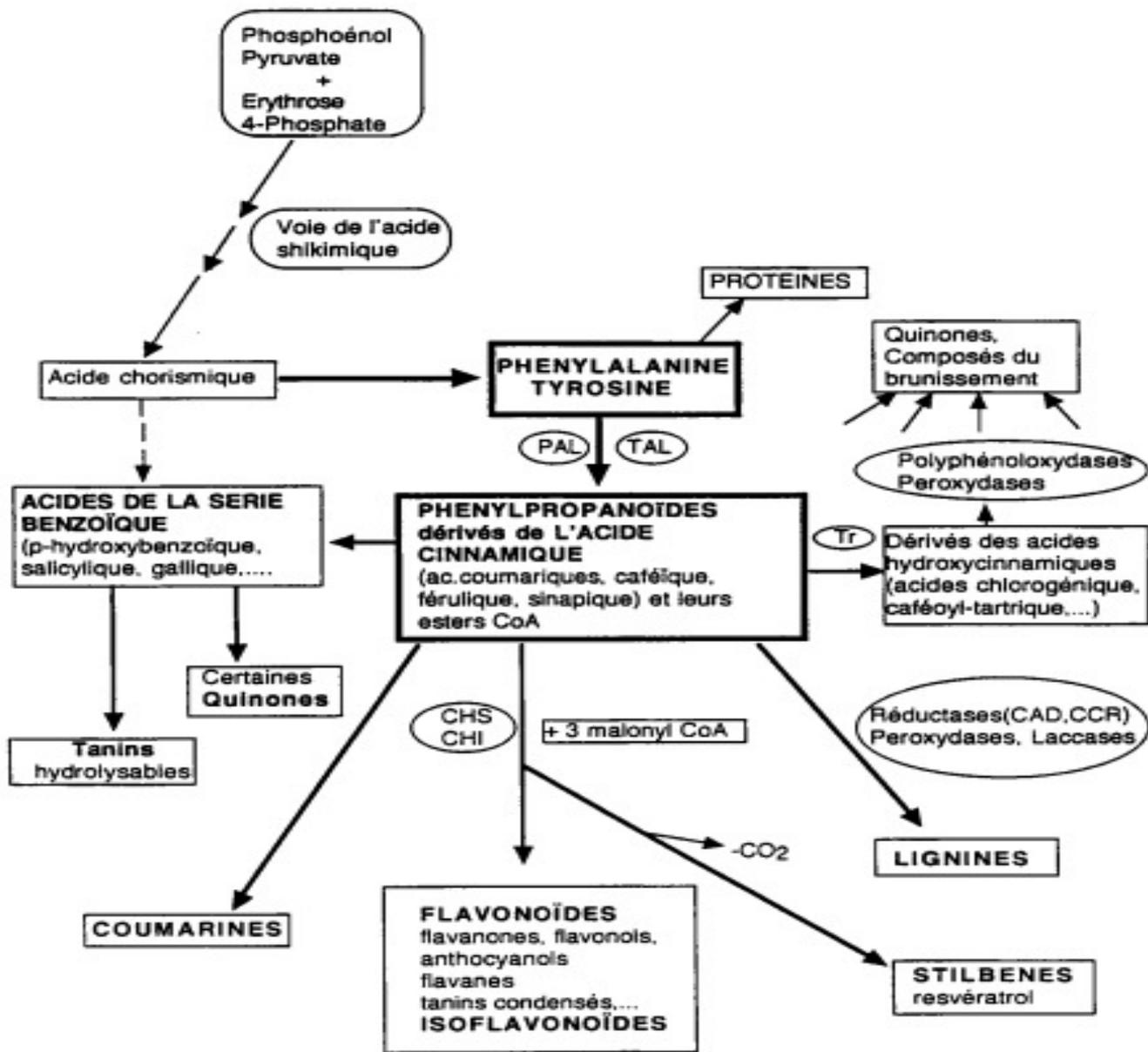


Figure01 : Les grandes lignes du métabolisme phénolique (Macheix et al., 2005)

Abstrait

Le cadmium est un métal toxique qui, lorsqu'il s'accumule dans les tissus de l'organisme, provoque un stress oxydatif, par la production des radicaux libres. Les composés phénoliques sont des métabolites secondaires de poids moléculaire élevé, spécifiques du règne végétal, connus par leurs propriétés antioxydantes. Notre présent travail, vise à synthétiser des données sur l'effet du cadmium sur le contenu en composés phénoliques chez cinq espèces végétales : L'orge (*Hordeum vulgare L.*), *Erica andevalensis*, l'haricot (*Phaseolus vulgaris L.*), *Azolla imbricata* et le théier (*Camellia sinensis L.*), en s'appuyant sur des résultats publiés.

Les résultats montrent que des concentrations modérées en cadmium ont augmenté la teneur en polyphénols totaux, dans les différents organes de la plante, fortement dans les feuilles, tandis que des concentrations plus élevées ont provoqué une régression dans l'augmentation des polyphénols totaux après un certain temps d'exposition.

Le cadmium provoque une augmentation de la synthèse des composés phénoliques, qui est proportionnelle à la dose et la durée d'exposition à ce métal, et qui diffère d'une espèce à l'autre.

Mots clés : cadmium, stress oxydatif, polyphénols totaux, *Hordeum vulgare L.*, *Erica andevalensis*, *Phaseolus vulgaris L.*, *Azolla imbricata*, *Camellia sinensis L.*

المخلص

الكادميوم معدن سام ، عندما يتراكم في أنسجة الجسم ، يسبب الإجهاد التأكسدي من خلال إنتاج الجذور الحرة. المركبات الفينولية هي مستقبلات ثانوية ذات وزن جزيئي مرتفع ، خاصة بالمملكة النباتية ، معروفة بخصائصها المضادة للأكسدة. يهدف عملنا الحالي إلى تجميع البيانات حول تأثير الكادميوم على محتوى المركبات الفينولية في خمسة أنواع نباتية ، بناءً على النتائج المنشورة.

أظهرت النتائج أن التراكيز المعتدلة من الكادميوم أدت إلى زيادة محتوى البوليفينول الكلي في مختلف أعضاء النبات بقوة في الأوراق ، بينما أدت التركيزات الأعلى إلى تراجع في زيادة إجمالي البوليفينول بعد فترة تعرض معينة.

يسبب الكادميوم زيادة في تخليق المركبات الفينولية ، والتي تتناسب مع جرعة ومدة التعرض لهذا المعدن ، والتي تختلف من نوع إلى آخر.

الكلمات المفتاحية: الكادميوم ، الإجهاد التأكسدي ، البوليفينول الكلي ، الأنواع النباتية.

Abstract

Cadmium is a toxic metal which, when it accumulates in body tissues, causes oxidative stress through the production of free radicals. Phenolic compounds are secondary metabolites of high molecular weight, specific to the plant kingdom, known for their antioxidant properties. Our present work aims to synthesize data on the effect of cadmium on the content of phenolic compounds in five plant species: Barley (*Hordeum vulgare L.*), *Erica andevalensis*, beans (*Phaseolus vulgaris L.*), *Azolla imbricata* and tea (*Camellia sinensis L.*), based on published results.

The results show that moderate concentrations of cadmium increased the content of total polyphenols, in the different organs of the plant, strongly in the leaves, while higher concentrations caused a regression in the increase of total polyphenols after a certain exposure time.

Cadmium causes an increase in the synthesis of phenolic compounds, which is proportional to the dose and the duration of exposure to this metal, and which differs from one species to another.

Key words: cadmium, oxidative stress, total polyphenols, *Hordeum vulgare L.*, *Erica andevalensis*, *Phaseolus vulgaris L.*, *Azolla imbricata*, *Camellia sinensis L.*