

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Université Abdelhamid Ibn  
Badis - Mostaganem  
Faculté des Sciences de la Nature  
et de la Vie



جامعة عبد الحميد بن باديس  
بجستغانم  
كلية علوم الطبيعة و الحياة

DEPARTEMENT D'AGRONOMIE

N° ...../SNV/2020

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Présenté par

AMRANE Nassereddine et TAHRA Hasnia

Pour l'obtention du diplôme de

**MASTER EN AGRONOMIE**

**Spécialité: BIOTECHNOLOGIE ALIMENTAIRE**

THÈME

**Effet du stress cadmique sur les paramètres  
morpho métriques du soja (*Glycine max L.*)**

Soutenu le 28/09/2020

DEVANT LE JURY

Président :	BENKHELIFA Mohammed	Prof.	Univ. Mostaganem
Rapporteur :	NEMMICHE Saïd	Prof.	Univ. Mostaganem
Examineur :	HENNIA Aïcha	MCB	Univ. Mostaganem
Co-encadreur :	TADJOURI Houria	Doctorante	Univ. Mostaganem

*Thème réalisé au Laboratoire de Structure, Élaboration et Application des Matériaux  
Moléculaires (S.E.A.2M)*

Année universitaire : 2019 /2020.

## *Dédicace*

**TAHRA Hasnia**

Au nom d'**ALLAH** tout puissant

A mes très chers parents qui m'ont communiqué leur passion et leur savoir-faire, pour leurs sacrifices et leur dévouement.

A mon époux Abdellah qui m'a tous le temps soutenu dans les moments difficiles.

A ma grande famille TAHRA

A la famille BELADEL

A mes frères et sœurs

## *Dédicace*

**AMRANE Nassereddine**

Au nom d'Allāh tout puissant qui nous a donné la force, la volonté et le courage afin d'accomplir ce travail.

*Je dédie ce travail à*

*Mes très chers parents, frères et sœurs, ma femme, mes enfants toute ma famille AMRANE, et mes amis.*

# *Remerciements*

*A NOTRE Encadreur Mr. NEMMICHE Saïd*

Nous exprimons nos profonds remerciements pour l'aide compétente qu'il nous a apporté, pour sa patience, son encouragement et sa disponibilité.

*A NOTRE Co-encadreur de Mémoire, Mme TADJOURI Houria*

Nous exprimons nos profonds remerciements à notre CO-Encadreur *Mme TADJOURI Houria* qui s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire. Un grand merci pour l'inspiration, l'aide et le temps que vous avez bien voulu nous consacrer.

Nous sommes particulièrement reconnaissant et honoré que le *Professeur BENKHELIFA Mohammed* à bien voulu accepté la présidence du jury de notre travail.

Nous remercions énormément **Madame HENNIA Aicha** d'avoir acceptée d'être examinatrice de ce travail.

Nous remercions aussi **Melle Saji Rabiaa et Mr FOUAD** pour leur aide et disponibilité tout le long de la réalisation de ce mémoire.

**ENORMÉMENT MERCI.**

### ***Résumé :***

La pollution de l'écosystème du sol est devenue aujourd'hui une des préoccupations des problèmes écologiques majeurs. Le cadmium est considéré comme un métal lourd dangereux et un polluant environnemental. Ce travail vise à évaluer l'accumulation du cadmium (Cd) au niveau des organes de jeunes plants de soja (*Glycine max* L.). Une évaluation de la morphométrie a été réalisée. Des plantules préalablement cultivées sur un milieu du sol, après 60 jours du semis, soumis à un stress au Cd à différentes concentrations de 50, 150, et 300 ppm pendant 10 jours. L'accumulation du Cd dans les différentes parties des plantes a été analysée à l'aide du spectromètre d'absorption atomique. Les résultats obtenus montrent que l'accumulation du cadmium est importante dans les racines que dans les feuilles de soja, et que le stress induit un effet significatif sur la longueur et la biomasse des racines et des feuilles avec une réduction du contenu des chlorophylles. Une augmentation significative de la concentration de Cd dans tous les organes végétaux obtenue selon l'ordre suivant racines> feuilles> tiges.

Mots clés : Cadmium ; soja (*Glycine max* L.) ; stress oxydatif ; paramètres morphométriques et biochimiques.

### ***Summary:***

The pollution of the soil ecosystem has become today one of the concerns of the major ecological problems. Cadmium is considered as a dangerous heavy metal and an environmental pollutant. This work aims to evaluate the accumulation of cadmium (Cd) in the organs of young soybean seedlings (*Glycine max* L.). An evaluation of the morphometric parameters has been carried out. Seedlings previously cultivated on a soil medium, after 60 days of sowing, subjected to Cd stress under treatment of 50, 150, and 300 ppm for 10 days. The accumulation of Cd in different parts of the plants has been analyzed using the atomic absorption spectrometer. The results obtained show that cadmium accumulation is higher in the roots than in the leaves of soybeans, and that stress induces a significant effect on root length and biomass, and a reduction in the chlorophyll content. A significant increase in the concentration of Cd in all plant organs obtained in the following order roots > leaves > stems.

Keywords: Cadmium; soybean (*Glycine max* L.); oxidative stress; morphometric and biochemical parameters

### ملخص:

أصبح تلوث النظام البيئي للتربة اليوم أحد اهتمامات المشاكل البيئية الرئيسية. يعتبر الكاديوم من العناصر الخطرة والملوثات البيئية. يهدف هذا العمل إلى تقييم تراكم الكاديوم (Cd) في أعضاء شتلات الصويا الصغيرة (Glycine max L.). الصيف تم إجراء تقييم لقياسات الشكل. الشتلات المزروعة سابقاً على وسط التربة بعد 60 يوماً من البذر معرضة لضغط الكاديوم تحت معاملة (ppm300, 150,50) لمدة 10 أيام. تم تحليل تراكم الكاديوم في أجزاء مختلفة من النباتات باستخدام مطياف الامتصاص الذري. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن تراكم الكاديوم أعلى في الجذور منه في أوراق فول الصويا ، وأن الإجهاد يؤدي إلى تأثير معنوي على طول الجذر والكتلة الحيوية وتقليل محتوى الكلوروفيل. زيادة معنوية في تركيز الكاديوم في جميع أعضاء النبات التي تم الحصول عليها بالترتيب التالي الجذور < الأوراق < السيقان.

الكلمات الرئيسية: الكاديوم ؛ فول الصويا (Glycine max L) ؛ الأكسدة؛ المعلمات المورفولوجية والكيميائية

# Sommaire

Introduction Générale.....1

## **PARTIE I : Synthèse bibliographique**

Chapitre I Le Cadmium..... 5

Chapitre II La plante de soja.....11

Chapitre III Le stress oxydatif.....23

## **PARTIE II : Méthodologie Expérimentale**

Matériels et méthodes.....29

## **TROISIEME PARTIE: RESULTATS ET DISCUSSION**

Résultats et Discussion.....38

**Conclusion** ..... 48

**Références bibliographiques** .....49

# *Introduction*

# Introduction générale

---

L'accumulation des métaux lourds dus à la pollution de l'environnement, et en particulier par certaines pratiques agricoles où les agriculteurs utilisent des eaux usées et celles issues d'usines pour l'irrigation de leurs cultures, induisent une omniprésence des métaux lourds toxiques. En plus la productivité des cultures dépend en grande partie de l'application de pesticides tels que fongicides, insecticides et herbicides.

Le cadmium (Cd), par exemple, interfère avec des fonctions de base comme la photosynthèse et l'absorption d'eau et de minéraux. De plus, le Cd pose un risque sérieux pour la santé des animaux et des humains lorsqu'il traverse la chaîne alimentaire.

Les espèces réactives de l'oxygène (ROS) sont un ensemble de molécules générées par des réductions partielles de l'oxygène moléculaire. La production des ROS est une conséquence inévitable de la vie en condition aérobie, formés en continu dans les cellules. Il a été montré qu'ils causent des dommages au niveau cellulaire mais qu'ils sont également impliqués dans des voies de signalisation d'adaptation au stress, de défense aux pathogènes et de développement.

Dans cette étude, le matériel végétal utilisé est le soja, qui est un des éléments majeurs de la cuisine asiatique et en est un exemple caractéristique. La richesse du soja en protéine en fait un produit de choix pour l'industrie agroalimentaire, de par sa composition qui en fait un aliment intéressant non seulement pour l'Homme, mais aussi pour les animaux d'élevage qui nourrissent en partie la planète.

L'objectif de notre présent travail est de mieux comprendre la réponse des plantules de soja «*Glycine max* L.» au stress causé par la présence du cadmium. Ainsi, l'effet de ce xénobiotique sera analysé à différents niveaux, sur la croissance (la longueur et poids des racines, parties aériennes), la morphologie, les pigments (chlorophylle a, b, totale et caroténoïdes), et une quantification de la teneur du Cd au niveau des racines tiges et feuilles sera réalisée.

Hormis, l'introduction et la conclusion de ce travail, le mémoire est donc organisé en trois chapitres, et comporte deux grandes parties :

- Une synthèse bibliographique sur les connaissances actuelles sur les métaux lourds, la plante de soja et le stress oxydatif ;
  - Une étude expérimentale présentant le cadre de l'étude, le matériel et méthodes ;
  - et enfin une troisième partie consacrée aux résultats et discussion.
- 
-

# Partie I

## Synthèse bibliographique

# ***CHAPITRE I***

## ***Le Cadmium***

## 1 Introduction

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

Les métaux lourds sont définis comme étant les éléments métalliques ayant une densité supérieure à 5 g/cm<sup>3</sup>. Les métaux lourds que l'on retrouve le plus souvent dans le sol sont : le cadmium, le manganèse, le cobalt, le chrome, le cuivre, le plomb, le mercure, le nickel et le zinc.

Certains comme Cu, Fe, Zn, Mn peuvent jouer un rôle essentiel pour les plantes et/ou les animaux, d'autres tels que Cd, As, Pb et Hg sont non essentiels et peuvent entraîner des effets néfastes pour la santé, même en quantités infimes (Fedda, 2016).

## 2 Le cadmium

### 2.1 Définition

Le cadmium est un métal blanc argenté appartenant à la famille des métaux de transition, avec un numéro atomique de 48 et une masse atomique de 112,4 g/mol. Il n'est pas essentiel au développement des organismes animaux ou végétaux. En revanche, ses propriétés physiques et chimiques, proches de celles du zinc et du calcium, lui permettent de traverser les barrières biologiques et de s'accumuler dans les tissus (Zorrig, 2010).

### 2.2 Les sources du cadmium

Le Cd est un métal lourd d'origine naturelle présent à des concentrations plus élevées en association avec les sols riches en Cd, y compris les schistes, les sédiments lacustres et les phosphorites. Cependant, plus de 90% du Cd dans l'environnement de surface est le résultat de l'industrie et de l'agriculture. Il est considéré comme un des éléments les plus toxiques dans l'environnement, avec un large éventail de toxicité d'organe et une longue demi-vie d'élimination (Lane et *al.*, 2014).

## 2.2.1 Rejets d'origine industrielle

Le cadmium se retrouve dans les déchets industriels stockés sur des anciennes friches industrielles ainsi que dans les produits en fin de vie comme les batteries et les piles à Cd/Ni et les effluents liquides issus des usines.

Les retombées atmosphériques provenant de l'activité industrielle et du trafic urbain favorisent également la pollution des sols et des eaux de surface et souterrains par le cadmium. Ces facteurs représentent la source principale de contamination dans les zones urbaines.

## 2.2.2 Pratiques agricoles

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

## 3 Les effets du cadmium

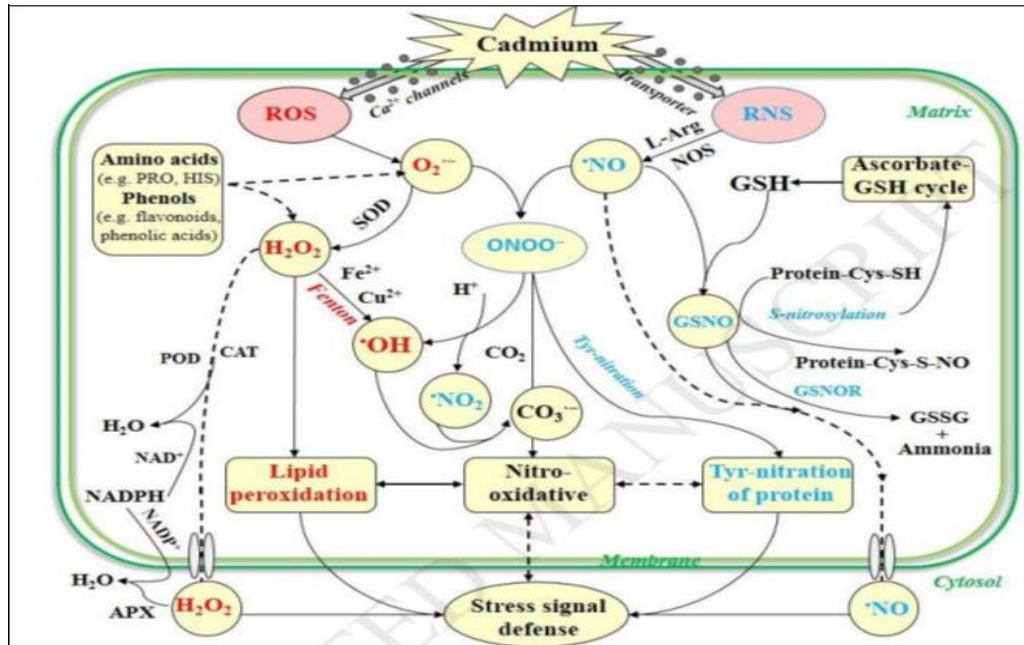
Parmi les métaux lourds, le Cd est relativement mobile dans le sol et peut être toxique pour les plantes et les animaux tandis que pour les êtres humains passent principalement par le cycle de la chaîne alimentaire qui peut causer un certain nombre de troubles (Rizwan et *al.*, 2017). Il agit sur l'homéostasie cellulaire tout en induisant la formation des espèces réactives oxygénées (ROS) et espèces réactives azotés (RNS) (Nemmiche, 2017) (Figure 1).

### 3.1 Effets de cadmium sur la santé humaine

Le Cd est un métal lourd toxique très puissant et aussi un contaminant environnemental répandu. Les principales voies d'exposition au Cd chez l'homme sont les voies digestives et respiratoires. Les expositions environnementales et non professionnelles proviennent des aliments, de l'eau contaminée, de la poussière contaminée et de la fumée du tabac et divers dommages biologiques sont causés par la toxicité du Cd (Nemmiche, 2017). Il est considéré et classé comme un cancérigène humain de classe 1 par le centre international de recherche sur le cancer, mais il n'est que faiblement génotoxique.

### 3.2 Effets du cadmium sur les plantes

La toxicité du Cd diminue la croissance végétale, la biomasse, la photosynthèse et le rendement, et modifie la nutrition minérale des plantes.



**Figure 01.** Effets du cadmium dans la génération de ROS et RNS (Liu *et al.*, 2017)

#### 3.2.1 Effets sur la croissance et la biomasse

La mesure de la croissance est un paramètre biométrique souvent utilisée pour la détermination d'un éventuel effet phytotoxique des métaux lourds. Dans les conditions environnementales, les métaux lourds pénètrent par les racines où ils causent les premiers dommages. Le Cd affecte négativement la croissance des plantes. Étant très mobile dans le phloème, il peut s'accumuler dans n'importe quelle partie de la plante, ce qui cause un retard de croissance, la chlorose et l'épinastie des feuilles. Il induit également des changements biochimiques dans les racines et les feuilles, comme la lignification des parois cellulaires dans les tissus racinaires et la veine principale des feuilles (Gallego *et al.*, 2012).

Rizwan *et al.* (2017) rapportent que l'absorption du Cd par les plantes de concombres, stressés à une concentration de 10  $\mu\text{M}$  Cd dans des conditions hydroponiques, a considérablement réduit la longueur de la racine, la surface et l'extrémité des racines par rapport au contrôle.

## 3.2.2 Effets sur la photosynthèse

Ce métal lourd altère l'ultra-structure du chloroplaste et réduit le taux net de photosynthèse, la conductance stomatique et la transpiration des feuilles. En outre, le Cd inhibe la photosynthèse en diminuant la transcription des gènes liés à la photosynthèse (psbA, psaB et rbcL), inactive les enzymes impliquées dans la fixation du CO<sub>2</sub>, induit la peroxydation lipidique et la protéolyse, et perturbe le métabolisme d'azote (N) et du soufre (S) ainsi que les mécanismes antioxydants chez les plantes (Gallego et al., 2012). L'effet du Cd sur l'activité photosynthétique varie selon l'âge des feuilles, et diminue la teneur en chlorophylle chez le pois (*Pisum sativum* L.), soja, tomate, laitue et pomme de terre (Rizwan et al., 2017).

## 3.2.3 Effets sur la nutrition minérale

L'absorption et l'accumulation des différents nutriments dans les légumes peuvent changer considérablement sous le stress Cd. La présence de Cd dans la solution nutritive peut agir sur l'absorption et l'accumulation des éléments nutritifs essentiels pour la croissance des plantes. Dans la plupart des cas, le Cd inhibe l'absorption des cations K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup> et Fe<sup>3+</sup> et des anions NO<sup>3-</sup>. Certains signes de toxicité des plantes par le Cd ont été attribués à des perturbations d'origine nutritionnelle (Souguir, 2009).

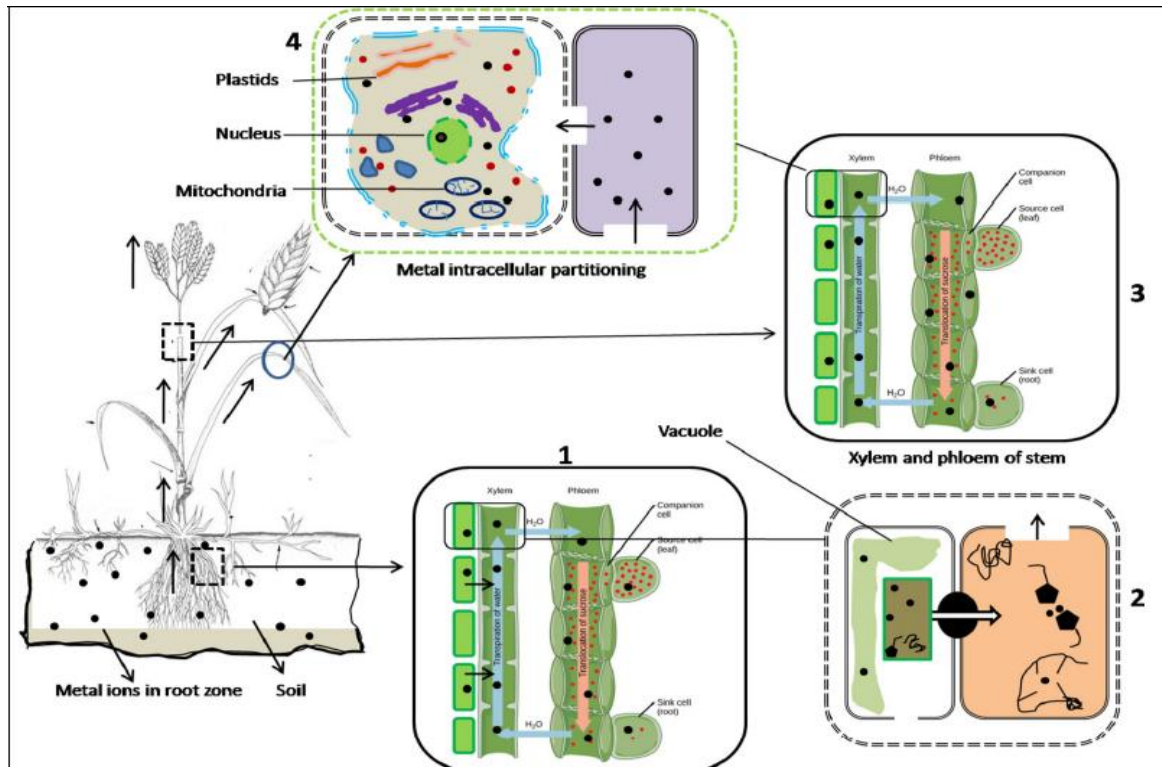
## 3.3 Le mécanisme de toxicité du cadmium chez les végétaux

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

### 3.3.1 L'absorption

Les métaux lourds toxiques pénètrent dans des cellules végétales par le système de transport impliqués dans l'assimilation micro-nutritive. Particulièrement l'assimilation Cd<sup>2+</sup> arrive par des transporteurs transmembranaires. Les plantes peuvent absorber le Cd selon sa biodisponibilité et sa concentration, à partir du sol ou de l'eau; assez peu absorbé directement de l'atmosphère. Le Cd fait partie des éléments qui peuvent s'accumuler dans ces plantes à

des niveaux supérieurs à 0,01 % du poids sec des pousses, sans causer de symptômes de toxicité (Gallego et *al.*, 2012).



**Figure 02.** Voie principale d'absorption et de transport des métaux dans les plantes (Dal Corso et *al.* (2014) rapporté par Gupta et *al.* (2019)).

### 3.3.2 Le transport

Les transporteurs ZIP-IRT1 sont des transporteurs non spécifiques les mieux étudiés, responsables de l'absorption de fer de haute affinité du sol. Ce sont des protéines de transport à membrane plasmatique. Le Cd peut pénétrer dans les cellules racinaires sous forme de  $Cd^{2+}$  par l'intermédiaire de transporteurs ZIP tels que les orthologues d'At IRT1 et Tc ZNT1/ Tc ZIP4. Il pourrait également pénétrer dans les cellules racinaires sous forme de Cd-chélates par les protéines YSL (Yellow-Stripe 1-Like), qui appartiennent à la superfamille OPT des transporteurs d'oligopeptides (Gallego et *al.*, 2012)

### 3.3.3 La distribution

Les concentrations du Cd sont souvent (mais pas toujours) plus élevées dans les racines que dans les pousses, ce qui suggère que le transport du Cd vers le xylème est limité dans la plupart des plantes et à des teneurs plus faibles dans les graines, fruits et tubercules (Gallego et *al.*, 2012).

## 4 Le mécanisme de tolérance du cadmium chez les végétaux

Pour faire face au stress abiotique, les plantes ont développé un système immunitaire qui implique principalement des antioxydants enzymatiques et non enzymatiques, et la séquestration des métaux dans des parties métaboliquement inactives telles que les parois des cellules radiculaires et les vacuoles.

La réponse des antioxydants varie selon les génotypes de la même espèce. Par exemple, l'activité de l'ascorbate peroxydase (APX) diminue, tandis que l'activité du glutathion (GSH) augmente chez les génotypes de pois sensibles au Cd (Rizwan et *al.*, 2017).

La séquestration du Cd dans les parois des cellules radiculaires et les vacuoles des feuilles peut être impliquée dans la détoxification du Cd chez les plantes. Toutefois, la séquestration du Cd dans différentes parties métaboliquement inactives varie selon les espèces et les génotypes au sein de la même espèce. Les plantes pourraient tolérer le stress Cd par la production de phytochelatines (PC) dans différentes parties de la plante (Rizwan et *al.*, 2017).

## ***CHAPITRE II***

# ***LE SOJA (GLYCINE MAX L.)***

### 1. Matériel végétal :

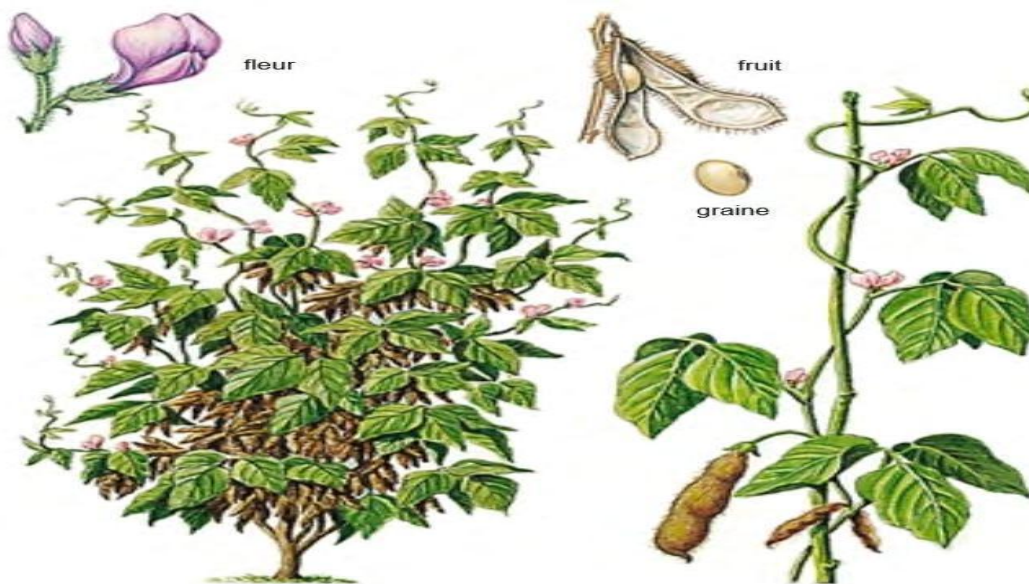
#### 1.1 Les caractéristiques botaniques

Le soja, espèce *Glycine max* (L.) Merrill, est une plante herbacée annuelle, velue. Le soja possède un port végétatif et un appareil reproducteur caractéristique de la famille des Fabacées.

##### 1.1.1. Appareil végétatif

L'appareil végétatif du soja comporte :

- o Un port érigé d'une hauteur de 30 à 150 centimètres,
- o Des feuilles alternes à trois folioles acuminées avec stipelles, qui tombent avant la maturité complète de la plante.



**Figure 03:** Le soja, *Glycine max*, légumineuse herbacée (Archives Larousse).

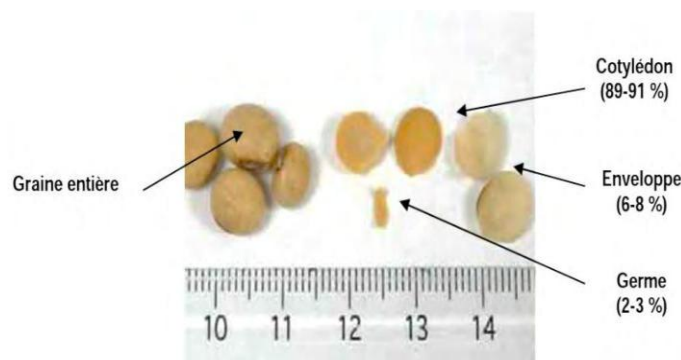


**Figure 04 :** La plante de soja (Tadjouri, 2019)

### 1.1.2. Appareil reproducteur.

L'appareil reproducteur du soja est caractérisé par :

- Des fleurs isolées, petites, violettes ou jaunâtres, zygomorphes (avec un plan de symétrie), hermaphrodites et autogames ;
- Une corolle avec cinq pétales vexillaires : un pétale dorsal (vexillum) qui encadre deux pétales latéraux (ailes), qui eux resserrent deux pétales ventraux soudés (carène) ;
- Un calice avec cinq sépales soudés ;
- Un androcée diadelphé (étamines assemblées en deux groupes) ;
- Un gynécée composé d'un carpelle, ou ne fécondation cléistogame (autofécondation avant même que la fleur ne s'ouvre) ;
- Des fruits sous forme de gousses (ou légumes) bosselées et velues, déhiscentes, de longueur et couleur variables en fonction des variétés, contenant deux à quatre graines riches en protéines.



**Figure 05:** Description de la graine de soja (Hubert et *al.*, 2006).

### 1.1.3. Racines à nodosités

Le système racinaire s'organise autour d'une racine pivot qui se ramifie en radicelles. Elles absorbent l'eau et les sels minéraux du sol, indispensables à la survie de la plante (Chatenet, 2007). En plus de l'utilisation de l'azote minéral du sol pour la synthèse d'acides aminés et de protéines, les légumineuses telles que le soja, la lentille, la luzerne ont développé un moyen supplémentaire pour fixer l'azote de l'air. Elles vivent en symbiose avec certaines bactéries du sol (*Rhizobium*) via la formation des nodosités.

## 1.2. Présentation de l'espèce

Le soja [*Glycine max* (L.) Merrill] appartient à la famille des Fabacées, sous-famille des *Faboideae*, tribu des *Phaseoleae*, genre *Glycine*.

Les feuilles de soja sont de quatre types: deux cotylédonaires, deux feuilles simples, les feuilles trifoliolées et les bractéales. Pendant la floraison, toutes les feuilles contribuent à l'approvisionnement en éléments nutritifs de l'ensemble de la plante ; lors du grossissement du grain, chaque feuille alimente préférentiellement les gousses situées au même étage (Li *et al.*, 2005). Les feuilles participent également à l'amélioration de la teneur en protéines de la graine de soja par la photosynthèse (Planchon, 1980).

Les racines du soja jouent un rôle important pour le ravitaillement en azote de la plante. Elles assurent les deux voies d'alimentation azotée : l'absorption des nitrates du sol et la fixation de l'azote atmosphérique par les bactéries. L'inoculation du soja par la bactérie *Rhizobium*

*japonicum* permet à la culture de couvrir les trois quarts de ses besoins en azote grâce à la symbiose (CETIOM, 2005). Le système racinaire pivotant et ligneux du soja lui permet de puiser l'eau en profondeur et de bien fissurer le sol ce qui améliore sa porosité et sa structure.

La graine de soja tient une grande place dans l'alimentation humaine et animale. Introduit aux États-Unis au début du 19<sup>ème</sup> siècle, le soja s'y est fortement développé au cours des 50 dernières années pour atteindre, aujourd'hui, 50% de la production mondiale (de Toledo *et al.*, 2006). Les conditions environnementales telles que la température et l'irrigation sont des facteurs importants pour la production et leurs effets se répercutent directement sur le rendement (CETIOM, 2005).

Dans le domaine de la santé, de nombreuses études ont montré que les asiatiques qui consomment régulièrement des produits à base de soja présentent moins de risques de développer des maladies cardiovasculaire ou certains cancers hormono-dépendants (Setchell et Cassidy, 1999).

### 1.2.1. Classification

Le *G. max* (L.) Merr., ou soja cultivé, appartient à la famille des *Légumineuses*, à la sous-famille des *Papilionacées*, à la tribu des *Phaséolées*, au genre *Glycine* Willd. et au sous-genre *Soja*.

#### Classification

Règne	<i>Plantae</i>		
Sous-règne	<i>Tracheobionta</i>	Sous-famille	<i>Faboideae</i>
Division	<i>Magnoliophyta</i>	Tribu	<i>Phaseoleae</i>
Classe	<i>Magnoliopsida</i>	Sous-tribu	<i>Glycininae</i>
Sous-classe	<i>Rosidae</i>	Genre	<i>Glycine</i>
Ordre	<i>Fabales</i>	Sous-genre	<i>Soja</i>
Famille	<i>Fabaceae</i>	Espèce	<i>Glycine max</i> (L.) Merr.

Les premières feuilles sont simples, opposées et ovées, tandis que les suivantes sont trifoliolées et alternes; la plante possède en outre des feuilles présentant plus de trois folioles. Le

système racinaire à nodosités est formé d'une racine pivotante où prend naissance un système de racines latérales.

Il constitue une des principales sources d'huile végétale comestible et de protéines destinées à l'alimentation animale. Le soja entre également dans la composition d'une variété de produits alimentaires, comme le tofu, la sauce soja, les succédanés du lait et de la viande. Le tourteau de soja sert de supplément alimentaire pour le bétail. Dans le secteur industriel, les usages du soja sont divers, allant de la production de levures et d'anticorps à la fabrication de savons et de désinfectants (Conseil canadien des Semences, 1995).

Le soja est souvent considéré comme une des plus anciennes plantes cultivées. Il est originaire du nord et du centre de la Chine (Hymowitz, 1970). Certains indices historiques et géographiques permettent de supposer que la plante a été mise en culture pour la première fois en Chine, entre les XVIIe et XIe siècles av. J.-C. (Hymowitz, 1970). Le soja a été introduit en 1765 aux États-Unis (Hymowitz et Harlan, 1983).

### **1.2 Préférences pédo-climatiques et fertilisation**

#### **1.2.1 Production mondiale de soja en chiffres**

De nos jours, 95 % de la production mondiale de soja, dont plus de la moitié est génétiquement modifiée, est destinée à l'alimentation des animaux d'élevage. Les principaux producteurs sont sur le continent américain : le Brésil, les États-Unis et l'Argentine.

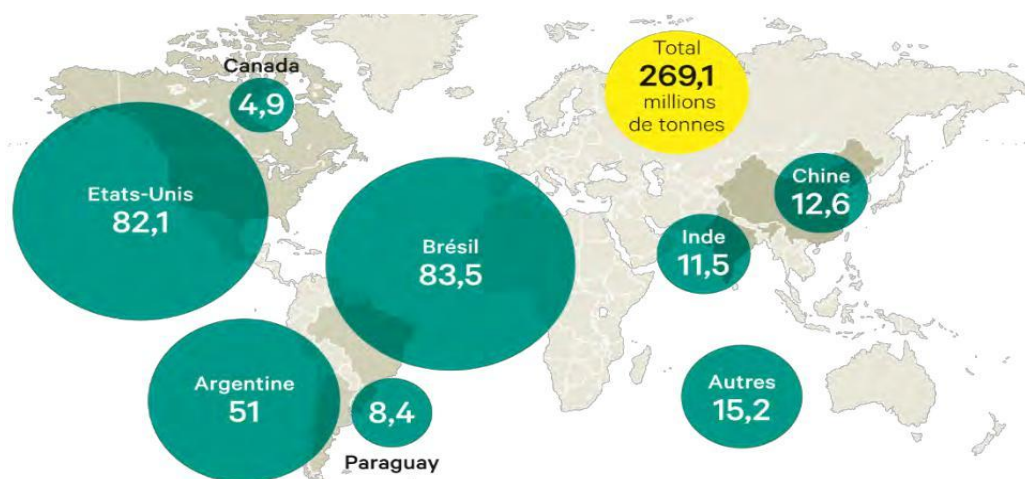


Figure 07: Principaux pays producteurs de soja (en millions de tonnes) en 2012-2013  
(Département Américain de l'agriculture, 2013).

Cependant depuis l'après seconde guerre mondiale, une succession de décisions politiques est à l'origine du déficit protéique européen. La famine en Europe après la seconde guerre mondiale, conduit à l'importation de denrées venues des Etats-Unis notamment celle du soja où il est en plein essor. De plus en 1961, les Etats-Unis réussissent à imposer l'exonération des droits de douane sur les importations de soja américain en Europe. Suite à cette décision, le développement de la filière soja par l'Europe est abandonné au profit de l'importation de soja des États-Unis et du développement des cultures céréalières notamment avec le maïs et le tournesol. Cette mesure a aussi engendré un essor de l'élevage intensif en Europe qui est alors devenue plus dépendante en protéines végétales. De plus, l'interdiction d'utilisation des farines carnées animales en 2000, a encore accru la dépendance aux tourteaux de soja d'importation de l'Union Européenne. Ces différentes décisions ont rendu la France et l'Europe aujourd'hui nettement dépendantes des principaux pays exportateurs de soja, notamment du Brésil pour l'alimentation animale. Ainsi, sur les 140000 tonnes de soja produits en France en 2011, un tiers a servi à fabriquer les produits dérivés du soja destinés à l'Homme, majoritairement issus de l'agriculture biologique et les deux tiers restants ont servi à l'alimentation animale, quantités dérisoires par rapport aux besoins de la France. En effet on

---

estime aujourd'hui que la France importe pratiquement 30 fois la quantité de soja qu'elle produit par an soit 3,4 millions de tonnes de tourteaux de soja importés à 70 % du Brésil (Bennetau-Pelissero, 2012).

### 1.2.2 Ecologie du soja

La période de croissance peut s'étaler sur une période de 75 jours suivant la variété (De Staercke, 1990)

- ❖ **Le climat** : Le soja est généralement qualifié de la plante de jour court, bien que des cultivars insensibles à la longueur du jour aient été développés récemment au Brésil. Aux Etats-Unis, les cultivars sont classés en 12 groupes de maturité d'après leur réaction à la longueur du jour.
- ❖ **Le sol** : Le soja pousse sur une grande variété de sols, allant de sable limoneux aux limons argileux, à condition qu'ils soient profonds et bien drainés (Javaheri et Baudoin, 2001)

Les sols argileux et les sols qui ont tendance à se compacter peuvent poser des problèmes lors de la germination.

Le pH du sol doit être maintenu environ à 5.0 - 5.2 pour une utilisation optimale des engrais et l'amélioration des sols.

Par rapport aux autres légumineuses, le soja tolère relativement bien une saturation temporaire en eau. Les sols acides doivent être chaulés pour produire des rendements élevés.

Bien que les cultivars de soja réagissent de manière déficiente du point de vue de la tolérance à l'acidité et à la toxicité d'aluminium, ils ns donneront jamais autant sur un sol acide que sur un sol sans contraintes d'acidité (Javaheri et Baudoin, 2001).

L'approvisionnement en azote exige des soins particuliers. En tant que plante légumineuse, le soja a la capacité de vivre en symbiose avec les bactéries qui fixent l'azote atmosphérique et le transforme en azote assimilable par la plante (Gerard et *al.*, 1990).

### ➤ Culture

#### A. Préparation du terrain :

Plusieurs cas peuvent se présenter :

- Plantation intercalée avec une autre culture (maïs, riz pluvial, sorgo,...) : dans ce cas le labour ne sera pas nécessaire et on serra directement en poquet entre les lignes.
- Culture à l'échelle du jardin potager : dans ce cas on préparera des planches de terre travaillées en profondeur dans lesquelles on aura préférablement incorporé du compost végétal ou du fumier.
- Culture en champ : pour ce faire on labourera profondément (15 à 20cm)

Si l'on dispose de traction animale, après le labour on brisera les mottes à la houe afin d'avoir un sol à peu près uniforme (De Staercke, 1990)

Signalons que les céréales en cultivés en rotation avec le soja bénéficient de l'azote fixé par le légumineuse. Ces rotations réduisent également l'incidence des ravageurs et des maladies, et améliorent l'état physique et chimique du sol (Javaheri et Baudion, 2001)

#### A. Semis :

En générale, le soja a les mêmes exigences climatique que le maïs et l'arachide ; on le plantera aux mêmes périodes. On évitera les excès d'humidité et on veillera à un bon drainage du terrain.

Il faut autant que possible, faire coïncider le moment de la récolte avec une période de temps sec. Plus un semis est dense (plante rapprochées), plus le rendement sera élevé mais si le sol est pauvre, il ne pourra supporter beaucoup des plantes.

De même si la saison est très humide, une plantation trop dense (d'autant plus s'il s'agit d'un soja buissonnant) risque de subir l'attaque de différentes maladies par manque de ventilation. Les

---

distances entre les plantes varient de 5 à 20 cm sur la ligne et 25 à 90 cm entre les lignes. Sur des sols pauvres, on recommande de semer le soja en rangée distantes de 40 cm en laissant 20 cm entre les plants sur la ligne (De Staercke, 1990).

### **B. Fertilisation :**

Le soja étant une légumineuse, ne réclame pas de fumure azoté. Par contre, des apports d'acide phosphorique sont toujours nécessaires, complétés éventuellement par de la potasse lorsqu'il y a carence en cet élément.

### **1.3. Le développement**

#### **1.3.1. Développement et croissance de la graine**

Il existe deux phases pour le développement de la graine.

- La première phase est appelée "lag-phase". Pendant cette phase, les divisions cellulaires ont lieu. Cette phase coïncide avec l'allongement de la gousse.
- La deuxième phase consiste en l'accumulation de matière sèche dans la graine.

Ces deux phases sont bien distinctes dans le temps (Egli *et al.*, 1981).

#### **❖ Croissance – Développement – Précocité**

Pendant leur vie, les plantes montrent des changements progressifs et importants de taille et d'aspect dont le rythme et l'amplitude sont très variables selon les espèces, les variétés et même les individus. La croissance au sens strict du terme, correspond à l'augmentation de taille, de masse et de volume. Pour suivre cette croissance on peut réaliser des mesures à différents moments de la vie de la plante. Chez le soja, la croissance peut être déterminée selon la forme de l'extrémité de la tige principale. Hartung *et al.*, (1981) ont classifié le soja en 3 types de croissance : type déterminé, indéterminé et semi-déterminé. Ce caractère aurait un déterminisme génétique fondé sur deux gènes majeurs épistatiques interagissant avec des gènes modificateurs à effets quantitatifs (Daydé, 1989).

Le développement détermine l'ensemble des modifications d'un organe ou tissu ou de la plante toute entière durant sa vie. Le développement des plantes est un processus cyclique. Il s'agit de commencer par la germination de la graine jusqu'à la floraison et la sénescence en passant par la croissance végétative et la maturation. Les graines se développent dans l'ovaire de la fleur.

### **1.3.2. L'exploitation industrielle du soja**

La richesse du soja en protéine en fait un produit de choix pour l'industrie agroalimentaire ; en effet les protéines représentent la plus grande part de la graine soit 34% du poids total ou 40 % du poids sec (Lecerf, 1995). Les matières protéiques végétales issues du soja sont utilisées pour améliorer l'apport protéique de certains aliments mais surtout pour leurs propriétés fonctionnelles.

#### **A- Les matières protéiques végétales :**

L'industrie agroalimentaire utilise trois matières protéiques végétales (MPV) issues du soja qui contiennent au moins 45 % de protéines: les farines, les concentrés protéiques et les isolats protéiques (Colot and Louis, 2012).

##### ***1 -Propriétés fonctionnelles des MPV :***

Les propriétés fonctionnelles des MPV sont aussi, voire plus importantes que leurs propriétés nutritionnelles pour l'industrie agroalimentaire. En effet elle privilégie de plus en plus les MPV issus du soja en raison de leur faible coût par rapport aux ingrédients d'origine animale qui d'ailleurs sont plus caloriques (Bau *et al.*, 2001).

Les MPV ont des propriétés hydratantes (capacité d'absorption-rétention d'eau), viscosifiantes, gélifiantes, émulsifiantes et texturantes (Colot and Louis, 2012). Parmi les produits renfermant des MPV du soja, les préparations carnées représentent 65%, la boulangerie représente 13,4 % et les produits diététiques représentent 11,3 % (Goemans, 1999). La plus utilisée des MPV du soja par l'industrie agroalimentaire est la farine.

### ❖ Farines :

Après avoir été nettoyées et décortiquées puis fragmentées, les graines de soja sont grillées puis délipidées à l'aide d'un solvant, l'hexane, jusqu'à contenir moins de 1 % de lipides, puis sont finement broyées. La farine obtenue est très utilisée en boulangerie, mélangée à d'autres farines pour la fabrication de pains, de biscuits apéritifs, de biscuits gâteaux, de pâtisseries et autres produits de boulangerie principalement pour son rôle dans le blanchiment des pâtes (Colot and Louis, 2012). La farine de soja qui contient de 45 à 65 % de protéines sert aussi de base pour l'obtention de concentrés et d'isolats protéiques (Hubert, et al., 2006).

### ❖ Concentrés et isolats protéiques :

L'industrie agroalimentaire fabrique des concentrés et des isolats dans le but d'améliorer les caractères organoleptiques des farines déshuilées mais surtout d'améliorer la proportion en protéines. Les concentrés sont obtenus par séparation des fractions non protéiques aux protéines, sans pour autant dénaturer la nature de ces dernières (Colot and Louis, 2012). Ces concentrés et isolats sont utilisés en agroalimentaire particulièrement pour leurs propriétés fonctionnelles. Ils peuvent être incorporés dans des sauces, produits à base de viande, produits de charcuterie, viande dans laquelle ils peuvent représenter jusqu'à 30 % du produit fini. Ils servent également à la fabrication d'analogues végétariens de viande comme les « pâtés » végétaux et autres « viandes » de soja (Colot and Louis, 2012 ; Fredot, 2009).

### ***2-Les produits de la trituration du soja :***

Ces produits représentent à eux-seuls 91 % de la production mondiale de soja en 2009. La trituration des graines de soja est l'opération consistant à extraire l'huile des graines. Elle permet l'extraction d'huile et la production de tourteaux (Solanet et al, 2011).

### ❖ Huile :

La trituration consiste à trier, décortiquer, nettoyer, broyer, cuire les graines de soja et délipider les fragments d'amande à l'aide de l'hexane comme solvant. Ce solvant volatil sera séparé de l'huile brute qui elle sera récupérée (Colot and Louis, 2012).

C'est une huile très digeste de grande qualité qui possède de la vitamine E, des phytostérols mais c'est surtout une huile alpha-linolénique qui contient une majorité d'acides gras essentiels polyinsaturés dont le pourcentage en acide alpha-linolénique est significatif (Cahuzac-Picaud, 2010).

Elle entre surtout dans la composition de nombreux produits issus de l'industrie agroalimentaire comme les margarines, vinaigrettes, mayonnaises et pâtes à tartiner (Roussel, 2005). Hormis l'utilisation agroalimentaire, l'huile de soja est devenue la principale matière première pour la production de biodiesel particulièrement utilisé au Brésil (80 % du biocarburant brésilien) (Solanet *et al*, 2011).

### ❖ Lécithine de soja :

La lécithine de soja est particulièrement utilisée par l'industrie agroalimentaire par exemple dans les pâtisseries, les confiseries, le chocolat, la margarine, les sauces ou dans le chewing-gum sous le code de « E322 » pour ses propriétés viscosifiantes et émulsifiantes (Palm *et al.*, 1999).

# Chapitre III

## Le stress oxydatif

## 1 Introduction

D'une manière générale, dans une large gamme de stress métallique provoqué par des xénobiotiques sur des cibles variées, les organismes photosynthétiques subissent souvent un important stress oxydatif lié à une surproduction des espèces réactives oxygénées (ROS).

### 1.1 Définition

Le terme « stress oxydatif » désigne un état physiologique où la perte d'électrons (oxydation) dépasse le gain d'électrons (réduction) induisant une fuite électronique avec formation des ROS et/ou RNS (Nemmiche, 2017). Le stress oxydatif est donc associé à un déséquilibre redox sévère, considéré comme un facteur de stress semblable à la salinité, à la sécheresse et à d'autres facteurs qui peuvent endommager les cellules et/ou déclencher des réactions de signalisation et de défense.

#### 1.1.1 Les formes réactives d'oxygène (ROS)

Le terme ROS englobe les substances contenant un ou plusieurs atomes activés d'oxygène soit sous forme d'espèces radicalaires ou non radicalaires. Ils sont produits de façon endogène par plusieurs organites et compartiments végétaux, en particulier ceux dont le taux de transport des électrons est élevé comme les chloroplastes, les mitochondries et les peroxysomes. A l'état normal, ils agissent comme messagers cellulaires et régulateurs redox de plusieurs processus biologiques végétaux (Rajaa et *al.*, 2017).

#### 1.2 Les espèces azotées réactives (RNS)

Les espèces azotées réactives (RNS) sont produites dans des conditions stressantes qui conduisent à la contrainte nitrosative. Les RNS sont des dérivés du NO, un composant de signalisation clé dans diverses contraintes et mécanismes de tolérance, et certains d'entre eux sont également impliqués dans le cycle d'azote (Saddhe et *al.*, 2019). Les principaux RNS chez les plantes sont indiqués dans le tableau 1.

## 2 Les sources d'espèces réactives

### 2.1 Les sources des ROS

Les sources de ROS sont à la fois extracellulaires (polluants, xénobiotiques, médicaments, et la radiothérapie) et intracellulaire (Tableau 2). La source principale des ROS (généralement plus de 90%) dans les organismes vivants est la chaîne de transport d'électrons mitochondriale, du réticulum endoplasmique, membranes plasmiques et nucléaires, et le système photosynthétique (Nemmiche, 2017) (Figure 8).

Tableau 01. Les principales formes réactives de nitrogène (Saddhe et *al.*, 2019)

<b>Les espèces réactives de l'azote</b>
NO Monoxyde d'azote
NO <sub>2</sub> Dioxyde d'azote
S-nitrosothiols non radicaux
ONOO Peroxynitrite
NO <sup>-</sup> Anion nitroxyde
NO <sub>3</sub> Nitrate
NO <sup>+</sup> Cation nitrosonium
N <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Trioxyde de dinitrogène
N <sub>2</sub> O <sub>4</sub> Dinitrogène tétoxure
NO <sub>2</sub> Cl Chlorure de nitryle
HNO <sub>2</sub> Acide nitreux

## 2.2 Les sources des RNS

Chez les plantes, le NO est connu comme une molécule bioactive multifonctionnelle. La synthèse de NO endogène (Figure 4) peut se produire dans des organes ou des cellules stressées, et le NO se diffuse à l'intérieur et à l'extérieur des cellules. Certaines études ont indiqué que la synthèse de NO peut se produire en réponse à un stress biotique et abiotique causé par la salinité, la sécheresse, le froid et les métaux lourds. Le NO est bio synthétisé par l'activité de l'enzyme NO synthase (NOS) (Nabi et *al.*, 2019)

Tableau 02. Les sources des espèces réactives d’oxygène (Tandon et al. (2005) rapporté par Gupta et al., 2019)

Métabolisme cellulaire	Environnementale
<ul style="list-style-type: none"> <li>o Transport d'électrons mitochondriaux</li> <li>o Oxydation du réticule endoplasmique</li> <li>o Activité enzymatique, y compris :  diamine oxydase, glycolate oxydase, L-gluconolactone oxydase, L-aminoxydase, monoamineoxydase, NADPH oxydase, tyrosine hydroxylase, xanthine oxydase</li> <li>o Synthèse de la prostaglandine</li> <li>o Auto-oxydation de l'adrénaline, acide ascorbique, thiol</li> <li>o Réduction du FMNH<sub>2</sub>, du FADH, de la Riboflavine</li> <li>o Oxyde nitrique synthase</li> <li>o Neutrophiles stimulés</li> <li>o Les cellules phagocytaires activées</li> <li>o Lésions de reperfusion</li> <li>o Cytochrome P450</li> </ul>	<p>Drogues Halothène, paracétamol,  bleomycineDoxorubicine,  métronidazole, éthanol CCl<sub>4</sub></p> <p>Pesticides</p> <p>Métaux de transition (Cu, Fe)</p> <p>Fumé, le tabac</p> <p>Alcool Radiations Radiations Haute température</p>

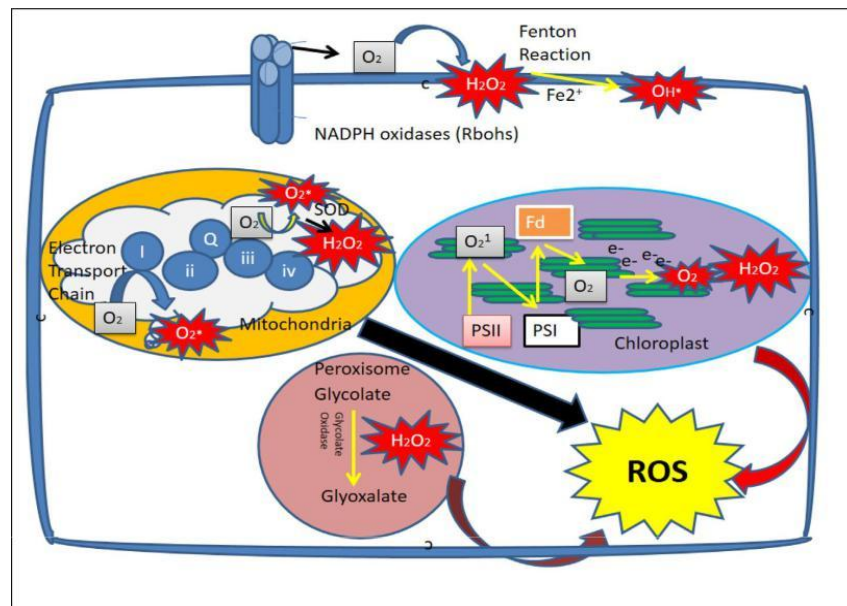


Figure 08. Sites de production des ROS chez les plantes (Rajaa et al., 2017)

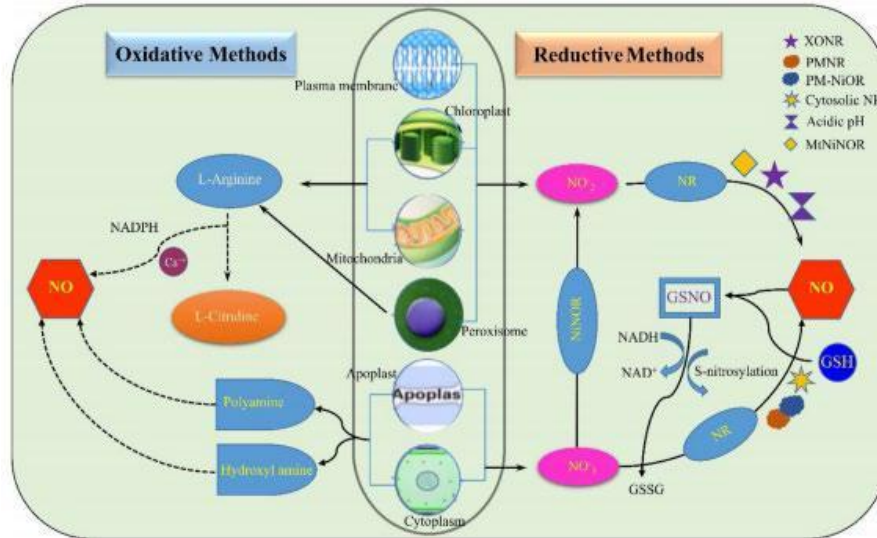


Figure 09. Schéma montrant les principales sources et les différents mécanismes impliqués dans la synthèse du NO (Sahay and Gupta (2017) rapportée par Nabi *et al.*, 2019).

### 3 La production d'espèces réactives de l'oxygène (ERO)

Il existe plusieurs formes de ROS (Figure 5 ; Tableau 3), forme radicalaire comme le radical superoxyde,  $\text{OH}\cdot$  (radical hydroxyle) et forme non-radicalaire (moléculaire) tel  $\text{H}_2\text{O}_2$  (peroxyde d'hydrogène) et  $^1\text{O}_2$  (oxygène singulet).

Les ROS sont des sous-produits inévitables du métabolisme aérobie produit dans divers compartiments cellulaires, y compris les chloroplastes, les mitochondries, les peroxyosomes, la membrane plasmatique et l'apoplastie. Les superoxydes et le peroxyde d'hydrogène, les plus abondants, ont des rôles métaboliques et de signalisation importants (Gupta and Igamberdiev, 2015).

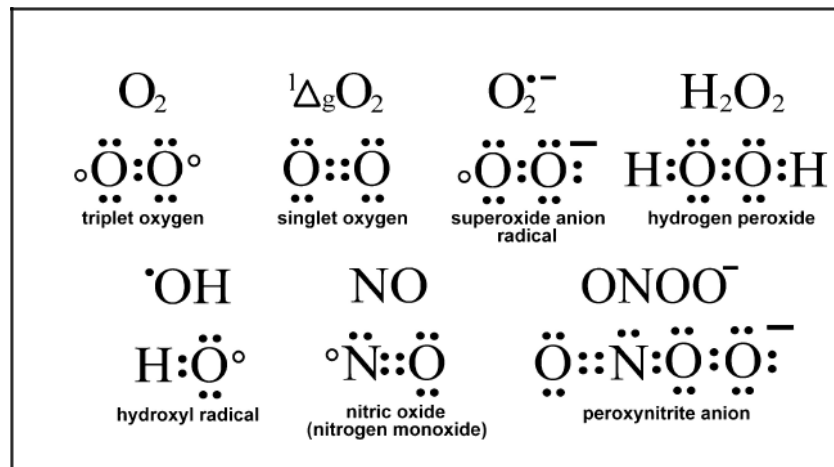


Figure 10. Les structures de Lewis des principales espèces réactives d'oxygène/azote.

(Demidchik, 2015)

Tableau 03. Les propriétés et réactivités des ROS (Mittler, 2016)

ROS	$t_{1/2}$	Distance de migration	Mode d'action	Site de production	Système scavenging
Superoxyde ( $O^{\cdot-2}$ )	1-4 $\mu$ s	30 nm	Réagit avec les protéines Fe-S Dismutases à $H_2O_2$	Apoplaste (RBOH), chloroplastes, mitochondries, peroxyosomes, chaînes de transfert d'électrons	SOD, flavonoïdes, ascorbate..
Radical hydroxyle ( $OH\cdot$ )	1 ns	1 nm	Extrêmement réactive avec toutes les biomolécules, y compris l'ADN, l'ARN, les lipides et les protéines	Fer et $H_2O_2$ (réaction de Fenton)	Flavonoïdes Proline Glucides ascorbate,
Peroxyde d'hydrogène ( $H_2O_2$ )	>1 $\mu$ s	> 1 $\mu$ m	Réagit avec les protéines en attaquant les résidus de cystéine et de méthionine. Réagit avec les protéines d'hème.	Peroxyosomes, chloroplastes, mitochondries, cytosol, apoplaste	APX, CAT, GPX, PER, PRX, ascorbate, glutathione
L'oxygène Singulet	1-4 $\mu$ s	30 nm	Réagit avec l'ADN. Oxyde les lipides, les protéines (résidus de Trp, His, Tyr, Met et Cys) et les résidus de G de l'ADN	Membranes, chloroplastes, Noyaux	Caroténoïdes et Tocopherols

#### 4. Importance des formes réactives de l'oxygène dans la vie d'une plante

Les ROS sont depuis longtemps reconnues pour leur importance dans la réponse des plantes aux contraintes environnementales. Certains symptômes observés en situation de stress d'origine biotique ou abiotique (par exemple, blanchiment des feuilles, nécroses) sont la conséquence d'une forte accumulation de radicaux libres oxygénés et d'une altération de l'homéostasie cellulaire.

Ces symptômes traduisent à la fois une oxydation de la chlorophylle au niveau des feuilles, mais aussi la mort par nécrose des cellules isolées ou de groupements de cellules dans les différents tissus végétaux. Ainsi, même si les ROS sont formées au cours du métabolisme normal de la plante, l'augmentation de leur concentration intracellulaire est souvent synonyme de stress (Figure 6).



Figure 11. Feuilles de Soja montrant les symptômes d'oxydation de la chlorophylle

(Tadjouri, 2019)

De nombreuses études ont montré que les ROS peuvent aussi intervenir dans :

- Les cascades de signalisation responsables de l'induction et de la régulation de nombreux gènes de défenses (protéines chaperonnes, *Heat Shock Proteins*, enzymes antioxydantes, ascorbate peroxydase (APX), glutathione-S-transferase (GST), et gènes liés à la pathogenèse).
- Les ROS sont désormais aussi considérées comme agents régulateurs de la mort cellulaire programmée (PCD : *Programmed Cell Death*) chez les plantes.

# Partie II

## Matériel et Méthodes

**1. Matériels****1.1 Objectifs de l'étude :**

Cette étude vise à déterminer la réponse des plantules de soja (*Glycine max*) stressées au cadmium. Le travail a été réalisé au laboratoire de chimie SEAMM de la faculté des Sciences Exactes de l'Université de Mostaganem au cours de la période du 17 février au 12 mars 2020.

**1.2 Matériel végétal :**

Le matériel végétal ayant fait l'objet de la présente étude concerne la plante de soja (*Glycine max* cv. Merr). Il a été choisi en raison de la facilité à être cultivé.

**1.3 Matériel sol****1.3.1 Préparation du substrat**

Le substrat utilisé est constitué d'un mélange de sable et de terreau (9:1 v/v), dans différents pots cylindriques de 50 cm de hauteur et 20 cm de diamètre. La capacité de chaque cylindre est de 10kg. Avant d'utiliser le sable, on passe par plusieurs opérations de préparation, en commençant par le tamisage pour éliminer les débris végétaux, animaux et toutes les pierres, ensuite, on a utilisé l'esprit de sel mélangé avec de l'eau pour le lavage, dans le but d'éliminer le sel, et bien sûr on termine par le rinçage avec de l'eau distillée. A la fin, on le sèche à l'air libre.

**1.4 Préparation des graines****1.4.1 Germination des graines :**

L'essai a été réalisé dans une serre en verre au sein de l'atelier agricole de l'Université de Mostaganem situé dans la commune de Mazagran (wilaya de Mostaganem). Les graines de soja ont été triées et stérilisées en surface avec de l'hypochlorite de sodium (5 %) pendant 5 minutes, puis rincées plusieurs fois à l'eau distillée pour éliminer toute trace de chlore et aussi pour lessiver les produits de conservation ayant adhéré à la graine.

Les graines stérilisées ont été ensuite semées dans un mélange de sable et de terreau (9:1, v/v) dans différents pots cylindriques de 50 cm de hauteur et 20 cm de diamètre. La culture du soja a été réalisée dans des conditions contrôlées (température  $24 \pm 2$  °C, humidité relative 60-70 % et une photopériode de 14h/10 h (jour/nuit) à l'intérieur de la serre (Figure 15).



**Figure 15:** Germination des graines de soja (Tadjouri, 2019).

### 1.5 Repiquage :

Après un mois de germination, des plants de 15 à 20 mm de long ont été transplantés dans des cylindres et cultivés pendant 90 jours dans les mêmes conditions que pour la germination.



**Figure 16:** Plantes de Soja après un mois de germination, repiquées dans des cylindres (Tadjouri, 2019).

### 1.6 Capacité de rétention de l'eau

La capacité de rétention est déterminé par la différence entre la quantité d'eau apportées avant l'arrosage et celle récupéré après 24h de décantation. La capacité de rétention est de 1596 ml.

### 1.7 L'arrosage :

L'arrosage est effectué trois fois par semaine par l'eau distillée ; substituée une fois sur trois par une solution nutritive de Hoagland.

Solution mère	(g/l)
<b>Macroéléments</b>	
KNO <sub>3</sub>	191.90
(NO <sub>3</sub> )Ca, 4H <sub>2</sub> O	129.80
NO <sub>3</sub> NH <sub>4</sub>	210.00
SO <sub>4</sub> Mg, 7H <sub>2</sub> O	61.50
PO <sub>4</sub> H <sub>2</sub> K	54.40
PO <sub>4</sub> K <sub>2</sub> H, 3H <sub>2</sub> O	34.23
<b>Oligo-éléments</b>	
Cl <sub>2</sub> Mn, 4H <sub>2</sub> O	1.80
CuSO <sub>4</sub> , 5H <sub>2</sub> O	0.176
ZnSO <sub>4</sub> , 7H <sub>2</sub> O	0.219
BO <sub>3</sub> H <sub>3</sub>	2.861
MO <sub>7</sub> O <sub>24</sub> (NH <sub>4</sub> ), 7H <sub>2</sub> O	0.285
CioHi <sub>2</sub> FeNaOs	0.05

**Tableau 04 :** Composition de la solution nutritive de Hoagland.

### 1.8 Traitement métallique

Les plantules de soja âgées de 3 mois ont été traitées et arrosées par le cadmium ajouté dans la solution nutritive sous forme de CdCl<sub>2</sub>, à différentes doses : 0, 50, 150 et 300 ppm. Pour chaque traitement, 3 répétitions ont été réalisés.

### 1.9 Récolte des plantules

Lors de la récolte, les plantules ont été fractionnées en deux parties : racines et parties aériennes. Afin d'éliminer le cadmium non absorbé par la plante, les racines ont été rincées trois fois successifs avec de l'eau distillée puis séchées entre deux couches de papier filtre.

**2. Méthodes d'analyses :****2.1 Paramètres morphologiques :****2.1.1 Croissance en longueur des tiges et racines de la plante :**

La croissance en longueur de la partie aérienne et racinaire de la plante a été mesurée après l'application du stress métallique. La hauteur des tiges et la longueur racinaire est mesurée en centimètres (cm).

**2.1.2 Croissance pondérale de la partie aérienne et racinaire :****2.1.2.1 Biomasse des parties aériennes et racinaires :**

La biomasse des parties aériennes et racinaires exprimée en gramme a été effectuée par pesée de la matière sèche après étuvage à 80°C de la matière fraîche pendant 48h.

**2.1.3 Quantification de la teneur des chlorophylles et caroténoïdes :**

La chlorophylle est le principal pigment contenu dans les plantes. Elle se trouve dans les chloroplastes des cellules végétales sous forme de couleur verte. Elle est indispensable pour l'activité photosynthétique de la plante pour produire de l'énergie chimique (ATP) à partir de l'énergie lumineuse du soleil. En effet la lumière du soleil est captée par la chlorophylle. On distingue plusieurs formes de chlorophylles (a, b, c, d et f) qui n'ont pas la même structure chimique. Les plus courantes sont les chlorophylles a et b que l'on retrouve chez les plantes supérieures et chez les algues.

L'extraction de la chlorophylle a et b est réalisée selon la méthode de Lichtenthaler (2001). Environ 100 mg de feuilles sont broyées et mis dans 5 ml d'acétone 80 %. L'extraction s'effectue dans l'obscurité pour éviter l'oxydation de la chlorophylle par la lumière, 48 h plus tard, on procède à la lecture des densités optiques des solutions avec un spectrophotomètre à trois longueurs d'ondes, 662 nm pour la chlorophylle a, 645 nm pour la chlorophylle b et 470 nm pour les caroténoïdes. La détermination des teneurs est réalisée selon les formules suivantes :

$$C_a (\mu\text{g/ml}) = 12.25 A_{663.2} - 2.79 A_{645.8}$$

$$C_b (\mu\text{g/ml}) = 12.25 A_{645.8} - 2.79 A_{663.2}$$

$$C_{(x+c)} (\mu\text{g/ml}) = (1000 A_{470} - 1.82 C_a - 85.02 C_b) / 198$$

**2.2 Paramètres physiologiques****2.2.1 Dosage du cadmium dans les organes de la plante (feuilles, tiges et racines)**

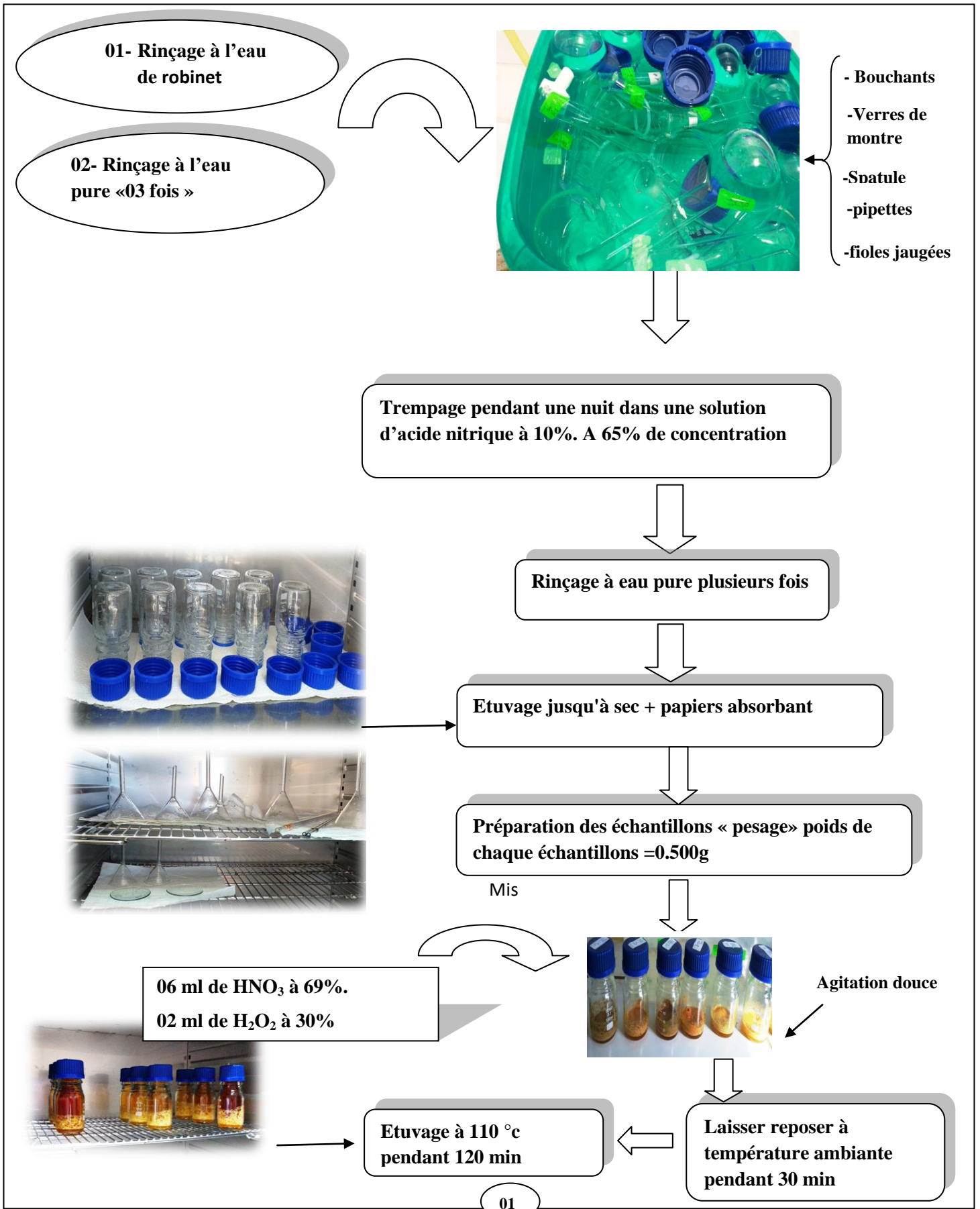
Ce procédé fournit la digestion acide des poudres de plantes dans un dispositif de récipient fermé chauffé sous une température contrôlée dans une étuve, pour la détermination du cadmium par spectrophotométrie d'absorption atomique SAA (VARIAN AA 240 FS). La minéralisation de la poudre végétale a porté sur 36 échantillons, dans des flacons stérilisés en verre.

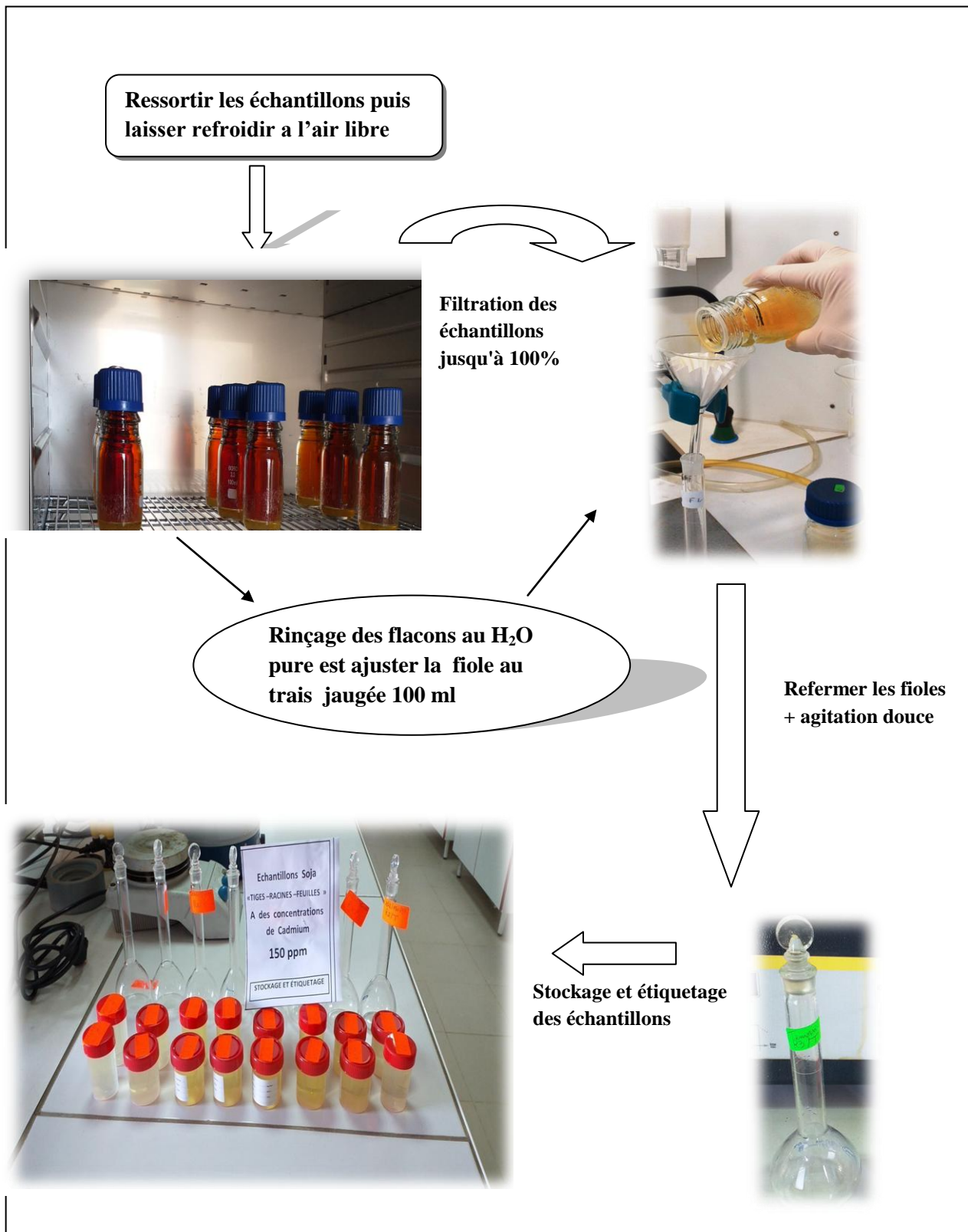
**2.2.2 Protocole expérimentale de la digestion :****2.2.2.1 Instrumentation :**

- Une étuve.
- Des flacons en verre fermés hermétiquement.
- Balance analytique.

**2.2.2.2 Réactifs utilisés :**

- 06 ml de  $\text{HNO}_3$  à 69%.
- 02 ml de  $\text{H}_2\text{O}_2$  à 30%





**Figure17:** Schéma montrant la technique Miliston « SAA » pour préparer les échantillons de soja

### 2.2.2.3 Minéralisation de la poudre végétale

La minéralisation a lieu sous une hotte aspirante dans des flacons en verre fermés hermétiquement, une masse de 0.5g de chaque échantillon ont été pesées dans des flacons, puis des volumes de 6 ml d'acide nitrique ( $\text{HNO}_3$ ) concentré à 69% et de 2 ml d'eau oxygénée ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) à 30 % ont été ajoutés. Les flacons sont fermés hermétiquement et laisser à la température ambiante pendant une heure, par la suite les flacons ont été placés dans une étuve réglée à une température de  $110^\circ\text{C}$  pendant 120 min.

Après refroidissement, les échantillons ont été filtrés dans des fioles jaugées de 100 ml, préparées au préalable, et compléter ensuite au trait de jauge par l'eau bidistillée.

### 2.2.2.4 Stockage des échantillons minéralisés et le blanc

Les fioles sont ensuite conservées dans un réfrigérateur à  $4^\circ\text{C}$  pour éviter toute perte et contamination jusqu'au moment d'analyse par spectrophotométrie d'absorption atomique.



**Figure 18:** Stockage et étiquetage des échantillons.

## 2.3 Anatomie

### 2.3.1 Etude anatomique des tiges et des racines

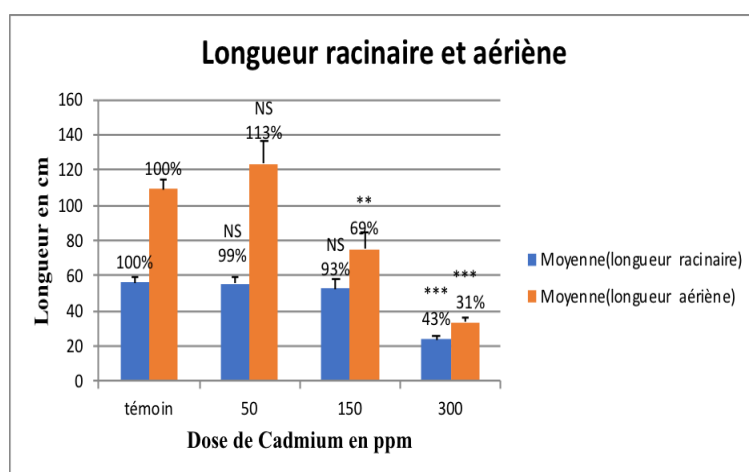
Les organes (tiges et racines) sont soigneusement séparés au moyen d'une lame de rasoir puis sectionnés en pièces de 1 à 2 cm de long. Seuls les échantillons des parties médianes sont pris en considération. Des coupes transversales sont effectuées à « mains levée » sur des tiges et des racines au moyen d'une lame de rasoir. Des coupes fines de  $20\ \mu\text{m}$  d'épaisseur sont colorées par la technique de double coloration (vert de méthyle/rouge Congo). Les coupes sont d'abord traitées à l'hypochlorite de sodium à 8% pendant 15 mn. Après un rinçage à l'eau distillée, elles sont mordancées par l'acide acétique à 70% dilué, pendant 2 mn, puis colorées au vert de méthyle à 1% pendant 5 mn. Ce dernier colore en vert les parois lignifiées. Les pièces sont ensuite lavées à l'eau distillée et colorées au rouge Congo

à 2% pendant 15 mn. Ce colorant met en évidence la cellulose qui apparaît en rose ou en rouge. Les coupes sont ensuite lavées à l'eau distillée et montées dans une goutte d'eau entre lame et lamelle avant d'être observées par microscope muni d'un dispositif permettant une bonne prise de vue et la prise de photos.

# Résultats et Discussion

### 1. Effet du stress induit par le cadmium (Cd) sur la croissance de la plante :

La longueur racinaire et aérienne diminue significativement en fonction des concentrations appliquées du Cd avec une forte corrélation négative ( $r = -0,815$ ) pour la longueur racinaire et ( $r = -0,870$ ) pour la longueur aérienne. Le stress appliqué a provoqué une diminution en longueur racinaire de 64,4% des échantillons par rapport au témoin et de 75,7% pour la longueur aérienne (Figure 19). La comparaison des moyennes par le test de Tukey révèle une différence significative de la moyenne de la longueur racinaire à la concentration 300 ppm par rapport au témoin ; et pour la longueur aérienne une comparaison significative était constatée que pour les concentrations 150 et 300 ppm.



**Figure 19.** L'effet du Cd sur la longueur des parties aériennes et racinaires.

La longueur des tiges et racines de la plante diminue proportionnellement avec l'augmentation de la concentration du Cd. Plusieurs auteurs ont en effet noté qu'une stimulation de la croissance pourrait être observée en réponse à l'application d'une très faible concentration de Cd dans le milieu chez plusieurs espèces telles que *Betula pendula*, *Miscanthus sinensis* et *Arabis paniculata* (Gussarsson, 1996; Arduini et al., 2004; Tang et al., 2009), et chez *Brassica juncea* (Irfan et al., 2014).

L'effet toxique du Cd sur la croissance de la plante se manifeste par une réduction du développement des différentes parties de la plante. Selon Ahmad et al. (2011) et Hediji et al. (2015), ces effets pourraient être expliqués par une diminution de l'absorption et la distribution d'éléments essentiels chez les plantes. Rascio et al. (2008) ont rapporté que le traitement des plantes de riz par le Cd conduit à l'inhibition de la croissance des racines et des altérations de leur morphogénèse. Chez les plantes de pois, le stress cadmique a causé des troubles à l'allongement des

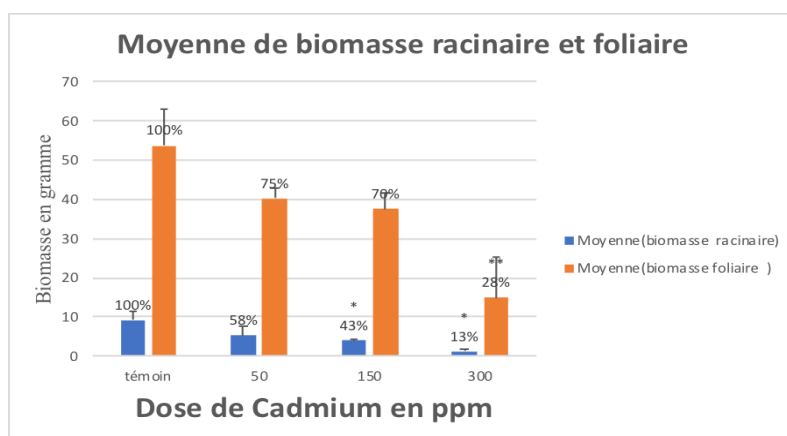
## Résultats et Discussion

racines et au processus mitotique et également des aberrations chromosomiques des bouts de racine (Fusconi *et al.*, 2007).

L'accumulation racinaire des métaux est favorable à l'apparition de s phénomènes de rhizo-toxicité qui se traduisent par une coloration brunâtre et un épaissement des racines de la plante, une diminution de l'élongation racinaire ainsi qu'une augmentation de la ramification (Kopittke et Menzies, 2006 ; Kopittke *et al.*, 2007). Ces symptômes sont principalement attribués à la rigidification des parois cellulaires par l'adsorption massive des métaux qui prennent la place du Ca dans l'apoplasme, en particulier au niveau de la zone d'élongation. Cette rigidité de l'apoplasme freine l'élongation racinaire et peut provoquer des ruptures au niveau des cellules du rhizoderme et du cortex externe (Kopittke *et al.*, 2008).

### 2. Effet sur la biomasse des parties racinaire et aériennes

Les résultats expérimentaux ont montré que la biomasse de la partie aérienne et racinaire ont diminué chez la plante comparativement à la plante non stressée. La biomasse racinaire et foliaire décroît significativement au fur et à mesure que la concentration du cadmium augmente, avec une forte corrélation négative ( $r = -0,891$ ) pour la biomasse racinaire et ( $r = -0,840$ ) pour la biomasse foliaire. Le stress appliqué a provoqué une diminution totale de la masse racinaire de 79,4% des échantillons par rapport au témoin et de 70,6% pour la masse foliaire. La comparaison des moyennes par le test de Tukey montre une différence significative de la moyenne de biomasse racinaire aux concentrations 150 ppm et 300 ppm par rapport au témoin ; par contre pour la biomasse foliaire ce même résultat était constaté que pour la concentration de 300 ppm (Fig. 20).



**Figure 20.** L'effet du Cd sur la biomasse des parties racinaire et aériennes.

La détermination des poids de la masse racinaire et foliaire de la plante étudiée montre que la biomasse décroît significativement au fur et à mesure que la concentration du cadmium augmente

## Résultats et Discussion

---

dans le milieu. Plusieurs études ont montré que la présence du Cd dans le milieu de culture peut se traduire, au-delà d'une certaine limite, par l'apparition de symptômes d'intoxication, accompagnés d'une inhibition de la croissance pondérale des plantes (Zorrig, 2010).

L'inhibition de la croissance des plantes et de la biomasse induite par le cadmium a déjà été signalé chez de nombreuses espèces de plantes telles que le blé (Rehman et al., 2015), le riz (Nahakpam et Shah, 2011), le maïs (Vaculik et al., 2015), *Brassica napus* (Ali et al., 2014 ; Ehsan et al., 2014), la tomate (Hediji et al., 2015), les plants d'haricots (Saidi et al., 2013), le radis et le blé (Anuradha et Rao, 2007).

La diminution de la croissance pondérale de la partie aérienne et racinaire de la plante peut être due à la toxicité de cadmium sur les appareils photosynthétiques (Saidi et al., 2013), ou des altérations chez les plantes (Ali et al., 2014), ainsi qu'aux dommages oxydatifs et à la réduction des activités enzymatiques antioxydants (Saidi et al., 2013).

La diminution de la croissance pondérale des plantes peut également être due à la perturbation de l'équilibre de certaines hormones de croissance, notamment l'auxine (Hasenstein et al., 1988), et à la perturbation de l'homéostasie des éléments minéraux essentiels (Nemmiche, 2017). De même, Ekmekci et al. (2008) rapportent que l'augmentation de la concentration du cadmium dans le milieu réduit significativement la quantité de la matière sèche des racines et des feuilles chez *Zea mays*. Il est important de noter que le Cd n'affecte pas la croissance de toutes les plantes avec la même sévérité. En effet, sur des sites très contaminés en métaux lourds, et en particulier en cadmium, certaines espèces végétales telles que *Arabidopsis halleri* et *Thlaspi caerulescens* sont capables de croître, se développer, et se reproduire (Wojcik et al., 2005). Ruegsegger et Brunold (1992) ont démontré que les biomasses des parties aériennes et racinaires sont réduites d'un même facteur en présence du Cd chez le maïs.

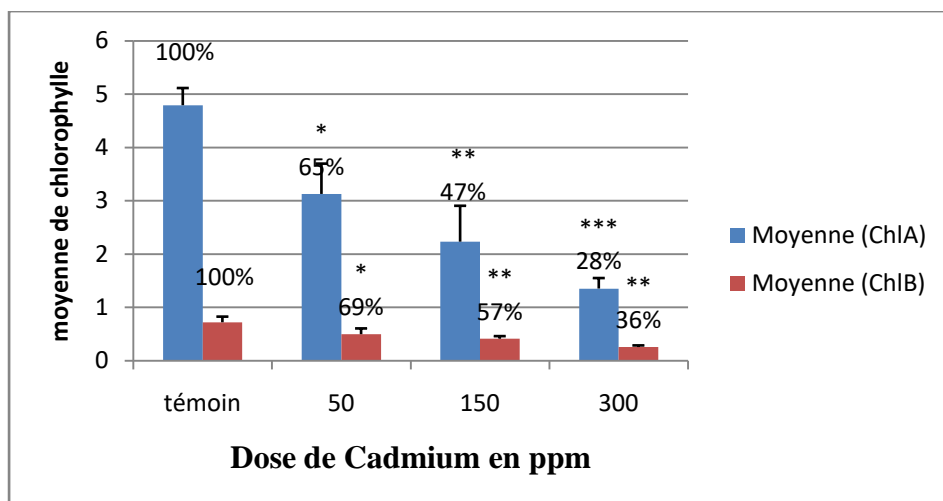
### 3-Estimation des pigments

#### 3-1. Quantification de la teneur en chlorophylles et caroténoïdes

Nous avons noté une réduction hautement significative de la chlorophylle a et b en fonction des concentrations appliquées du Cd avec une forte corrélation négative ( $r = -0,942$ ) pour la chlorophylle a et ( $r = -0,916$ ) pour la chlorophylle b. Le stress appliqué a provoqué une diminution en teneur des pigments photorécepteurs soit 88,8 % pour la chlorophylle a et de 82,2 % pour la chlorophylle b.

## Résultats et Discussion

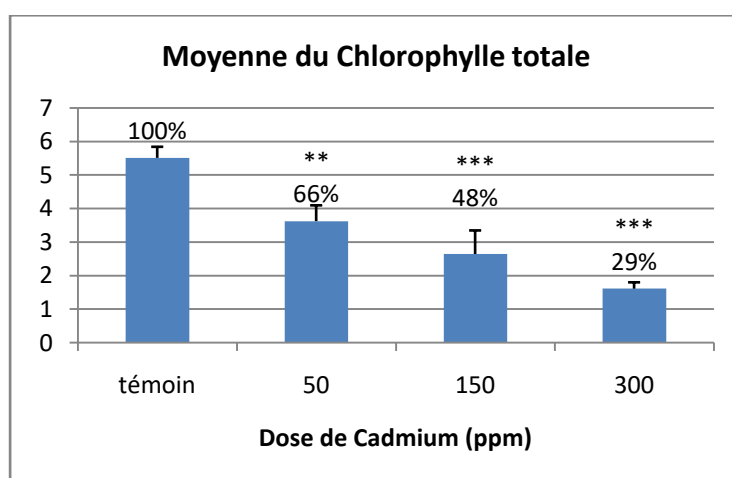
La comparaison des moyennes par le test de Tukey montre une différence significative de la moyenne de la chlorophylle a et b à différentes concentrations de Cd par rapport au témoin.



**Figure 21.** Variation des teneurs en chlorophylles (a, b) dans les feuilles du soja sous l'effet du stress induit par le Cd.

Nous avons noté aussi une réduction hautement significative de la chlorophylle totale en fonction des concentrations appliquées du Cd avec une forte corrélation négative ( $r = - 0,954$ ). Le stress appliqué a provoqué une diminution en teneur de la chlorophylle totale soit 90,9 %.

La comparaison des moyennes par le test de Tukey montre une différence hautement significative de la moyenne de la chlorophylle totale à différentes concentrations du Cd par rapport au témoin.



**Figure 22.** Variation des teneurs en chlorophylle totale dans les feuilles du soja sous l'effet du stress induit par Cd.

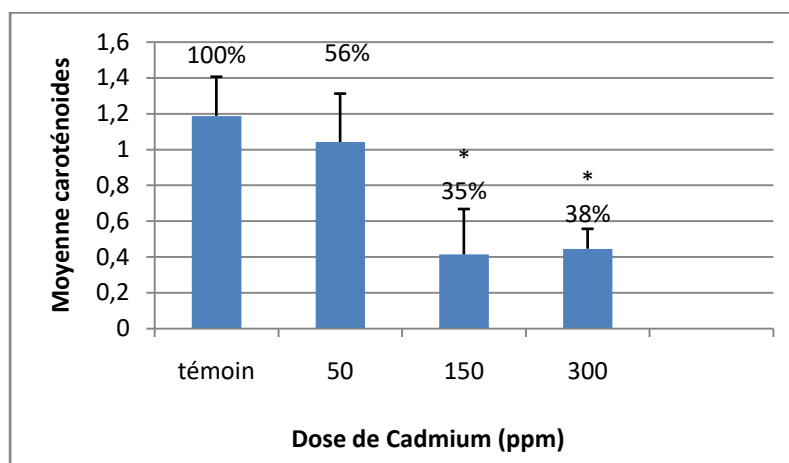
Dans d'autres études, la diminution de la photosynthèse chez les plantes est liée à la diminution du nombre de stomates mis en jeu et leur degré d'ouverture. Il semble que l'augmentation de la résistance stomatique soit surtout le fait d'une réduction du nombre de stomates (Debez et *al.*, 2006). La chlorophylle a, b et totale diminue progressivement avec des doses croissantes de cadmium chez le soja. Ces résultats concordent avec ceux de Bouzid (2009), qui a démontré qu'il y a une diminution des teneurs en chlorophylles a et b chez *A. halimussub sp* soumise au stress par le cadmium. Selon Bhardwaj et Singhal (1981), la réduction de la teneur en chlorophylles est liée à la diminution de la teneur des protéines thylacoïdales, qui associées aux chlorophylles a et b.

La réduction enregistrée de la Chl a et Chl b a été probablement causée par la dégradation des enzymes impliquées dans la biosynthèse de la chlorophylle comme l'acide  $\delta$ -aminolévulinique déshydratase et l'acide  $\delta$ -aminolévulinique synthase (Wang et *al.*, 2014). De même, la diminution des teneurs en chlorophylles peut être aussi due à une diminution de l'azote au niveau des pigments chlorophylliens (Zid et Boukhris, 1977). Ainsi, La diminution de la photosynthèse peut être due à une inhibition de la synthèse des chlorophylles par un blocage des ions Mg, Mn et Fe (Gopal et Rizvi, 2008), ou par l'augmentation de l'activité de la chlorophyllase (Liu et *al.*, 2008), ou encore la destruction des chloroplastes (Sharma et Dubey, 2005).

L'accumulation des métaux lourds entraîne une réduction de la synthèse des pigments chlorophylliens en modifiant les intermédiaires biosynthétiques de la chlorophylle, et donc le fonctionnement du complexe de protéines pigmentaires (Ahanger et *al.*, 2016).

### 3-2 Caroténoïdes

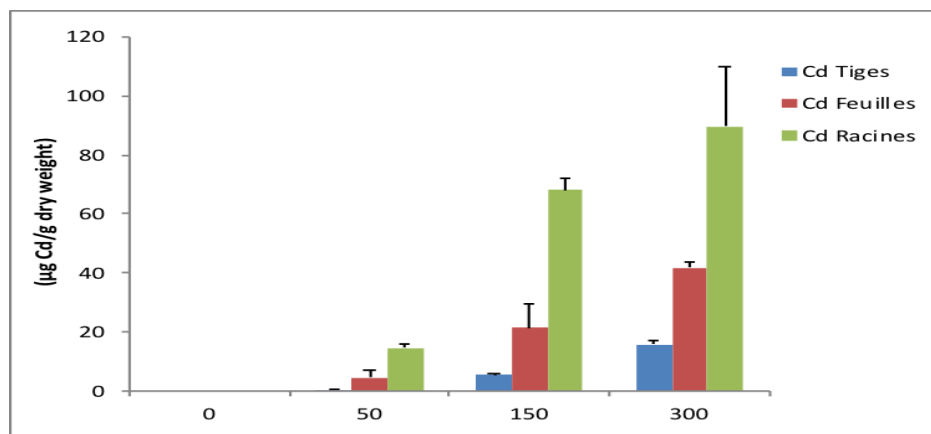
Nous avons noté une réduction significative du caroténoïde en fonction des concentrations appliquées du Cd avec une forte corrélation négative ( $r = - 0,816$ ). Le stress appliqué a provoqué une diminution en teneur du caroténoïde soit 66,5 %. La comparaison des moyennes par le test de Tukey montre une différence significative de la moyenne du caroténoïde aux concentrations 150 et 300 ppm Cd par rapport au témoin.



**Figure 23.** Variation des teneurs en chlorophylles caroténoïdes dans les feuilles de soja sous l'effet du stress induit par le Cd

#### 4. Quantification de la teneur en Cd dans les racines, tiges et feuilles du Soja.

Une augmentation significative de la concentration de Cd dans tous les organes végétaux obtenue selon l'ordre suivant racines > feuilles > tiges avec un facteur de transfert estimé à 0.39, 0.63 et 0.49 pour les doses de 50, 150 et 300 ppm respectivement. Les racines constituent le site principal de l'accumulation du Cd.



**Figure 24.** Variation des teneurs du Cd dans les racines, tiges et feuilles de soja sous l'effet du stress induit par le Cd.

L'accumulation du métal lourd dans la plante utilisée varie selon la mobilité, la biodisponibilité et la concentration du cadmium dans le sol. Son accumulation dans les feuilles et racines des plantes augmente progressivement avec ses doses croissantes. Ce constat corrobore les

## Résultats et Discussion

---

résultats trouvés par Baker et *al.* (1994), qui rapportent que la concentration des métaux dans les plantes dépend hautement de leurs concentrations dans le sol.

En effet, la disponibilité des métaux dans le système sol-plante dépend du pH du sol, de la concentration en matière organique et du stade de développement de la plante (Myung et Thornton, 1997). La migration et l'accumulation des métaux lourds dans les organes, les tissus, les cellules de la plante dépendent essentiellement du métal considéré. Mais sauf quelques exceptions (Richter et Hlusek, 1986 ; Mench et *al.*, 1988), la plupart des espèces végétales paraissent opérer une forte rétention des métaux lourds dans les racines, à un degré moindre dans les feuilles (Peterson, 1986). Les résultats de notre étude ont révélé que le Cd présente le taux le plus élevé dans la partie racinaire de la plante.

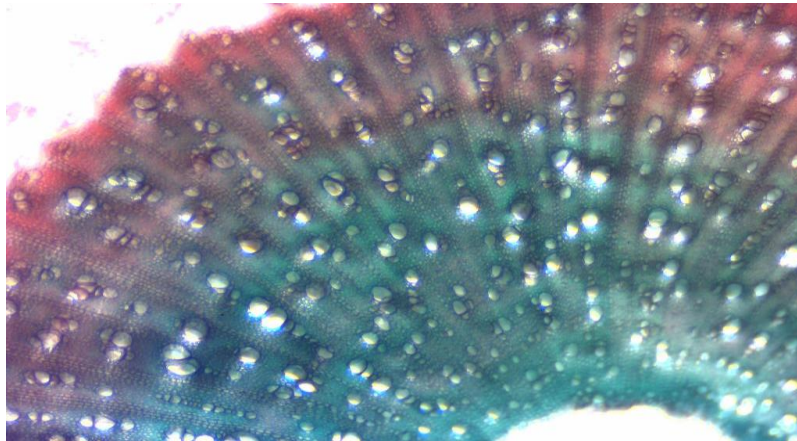
Les résultats obtenus sont similaires à ceux de Sivasankar et *al.* (2012) qui ont signalé que les métaux lourds sont stockés souvent dans les racines de la plante. La compartimentation et l'accumulation d'un métal lourd s'effectue dans les vacuoles des cellules racinaires alors limitant son transport vers la partie aérienne.

Selon Moreno-Jiménez et *al.* (2009), la translocation des éléments métalliques vers les parties aériennes de la plante dépend des différents facteurs (espèce végétale, caractéristiques physicochimiques des sols, espèces métalliques présentes).

La facilité de transfert du Cd est liée entre autre à sa grande mobilité dans le sol par rapport aux autres métaux (Hooda et Alloway, 1994). Sa biodisponibilité et sa mobilité sont liées à sa solubilité et à sa forme géochimique (Ma et Rao, 1997). Il a été clairement démontré que la capacité d'accumulation du cadmium était dépendante de la famille végétale (Kuboi et *al.*, 1986) et de l'espèce (Coullery, 1997). Selon Kuboi et *al.* (1986), Les plantes cultivées les plus accumulatrices de cadmium sont les Chenopodiacées (épinard, betterave), les Brassicacées (chou, navet, radis) et les Astéracées (laitue). Cependant, des résultats contradictoires montrent que pour la plupart des plantes, la concentration de cadmium dans les racines est au moins trois fois plus importante que celle des parties aériennes (Sameni et *al.*, 1987). Par exemple chez *Azolla filiculoides*, les niveaux d'accumulation du Cd sont au moins deux fois plus élevés dans les racines que dans les parties aériennes (Sela et *al.*, 1989), le riz (Ros et *al.*, 1992), et la laitue (Costa et Morel, 1994). Ce qui rejoint encore nos résultats, à la dose 300 ppm l'accumulation de cadmium se fait préférentiellement au niveau de la partie souterraine de la plante.

### 5- Caractérisation anatomique des racines et tiges de soja (*Glycine max*)

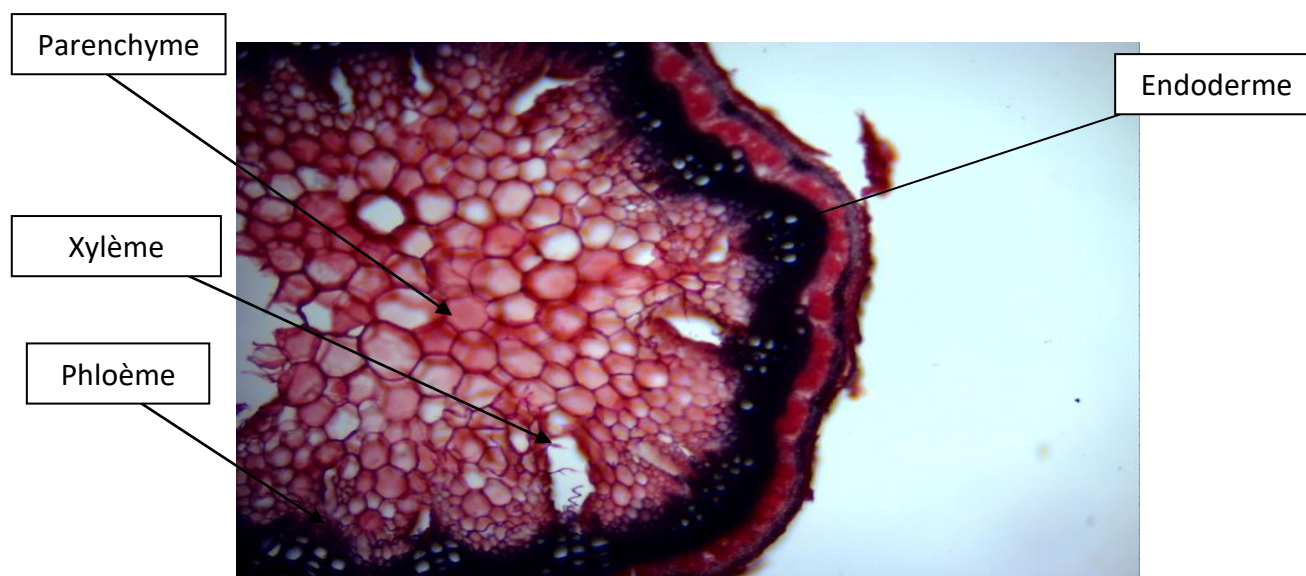
Les coupes obtenues du matériel expérimental et observées sous microscope ont permis de procéder aux mensurations des cellules de vaisseaux conducteurs, spécifiquement le xylème racinaire et caulinaire. Ces mensurations ont concerné les mesures du diamètre des vaisseaux à l'aide d'un micromètre adapté au microscope.



**Figure 25.** Coupe transversale d'une racine de soja (X10)

Sur une coupe transversale de la racine, on distingue deux zones :

- L'écorce, distincte de ce que l'on appelle également l'écorce, cette partie est constituée du rhizoderme (l'épiderme de la racine) qui porte les poils absorbants puis une assise subéreuse, lorsque la racine vieillit, et du parenchyme cortical qui assure le transport des éléments absorbés jusqu'au centre de la racine pour leur transport à travers toute la plante. La dernière couche de cellules du parenchyme est épaissie et forme une sorte de barrière de contrôle des molécules circulant dans la racine, c'est l'endoderme.
- Le cylindre central où se trouvent les tissus de transport de la sève et qui est composé du péricycle, une couche de cellules à partir de laquelle vont se former les ramifications de la racine. Viennent ensuite les deux types de tissus conducteurs, le xylème qui conduit la sève brute vers les feuilles et le phloème qui redistribue la sève élaborée dans toute la plante. Enfin, au centre le parenchyme médullaire qui, s'il n'a pas un rôle de stockage a seulement une fonction de remplissage.



**Figure 26.** Coupe transversale de la tige de soja (X10).

En coupe anatomique, la tige se distingue par deux parties : l'écorce (parenchyme cortical) et le cylindre central. Dans une tige de dicotylédone, les tissus conducteurs de sève sont disposés sur un seul cercle regroupant des structures élémentaires appelées faisceaux cribro-vasculaires ou libéroligneux. Ces derniers regroupent le phloème primaire et le xylème primaire séparés par le cambium, couche de cellules non différenciées ou embryonnaires dont le fonctionnement est bloqué. Elles ne reprendront leur activité que durant l'élaboration des structures secondaires.

A la lumière de l'ensemble des résultats obtenus, il serait intéressant d'utiliser l'approche « anatomique » en particulier, l'interprétation des données en photos des racines et des tiges stressées pour éclaircir la variation du diamètre du xylème racinaire et caulinaire ( $\mu\text{m}$ ) des plantes stressées au cadmium et surtout voir la réponse du xylème racinaire. Travaux non réalisés à cause de la pandémie du COVID-19.

Conclusion

## Conclusion générale

---

Le Cadmium (Cd) est considéré comme un des métaux lourds les plus polluants. Il est très toxiques aux organismes vivants et de nombreuses espèces végétales. En raison de sa grande solubilité dans l'eau, le Cd est facilement absorbé par les racines et peut être chargé dans le xylème pour son transport dans les organes aériens. Au-delà d'un certain niveau de Cd dans le sol, le rendement des cultures diminue et la qualité des produits de terrain se dégrade.

L'étude expérimentale sur une culture de soja a permis de voir l'effet du stress cadmique sur cette culture. A la lumière de l'ensemble des résultats obtenus, l'effet toxique du Cd sur le métabolisme des plantes est significatif. De plus, des changements morphologiques et anatomiques ont été observés à différentes concentrations du Cd.

Et à cause de la pandémie du COVID-19 beaucoup de travaux n'ont pu être réalisés pour comprendre l'effet mécanistique du stress cadmique sur la plante de Soja.



# Références

# Bibliographiques



- **Ahanger MA, Moad-Talab N, Abd-Allah EF, Ahmad P, Hajiboland R, 2016.** Plant growth under drought stress: significance of mineral nutrients. In: Water stress and crop plants: a sustainable approach.-Ed. Ahmad P. Wiley Blackwell. pp. 649–668
- **Ahmad P, Nabi G, Ashraf M. 2011.** Cadmium-induced oxidative damage in mustard [*Brassica juncea* (L.) Czern. & Coss.] plants can be alleviated by salicylic acid. South African Journal of Botany 77, 36-44
- **Ali B, Qian P, Jin R, Ali S, Khan M, Aziz R, Tian T, Zhou W. 2014.** Physiological and ultra-structural changes in *Brassica napus* seedlings induced by cadmium stress. *Biologia Plantarum*, 58, 131-138.
- **Anuradha S, Rao SSR. 2007.** The effect of brassinosteroids on radish (*Raphanus sativus* L.) seedlings growing under cadmium stress. *Plant Soil and Environment* 5, 465–472.
- **Arduini, I., Masoni, A., Mariotti, M., Ercoli, L. 2004.** Low cadmium application increase miscanthus growth and cadmium translocation. *Environ. Exp. Bot.* 52: 153–164. URL :<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2004.01.001>
- **Baker AJM, Reeves RD, Hajar ASM. 1994.** Heavy metal accumulation and tolerance in British populations of the metallophyte *Thlaspi caerulescens* (Brassicaceae). *New Phytologist* 127, 61-68.
- **Bau, H.-M., Villaume, C., Giannangeli, F., Nicolas, J.-P., Mejean, L. 2001.** Optimisation du chauffage et valeurs nutritionnelle et fonctionnelle des protéines de soja. *Cahiers de nutrition et de diététique*, 36(2), pp. 96-102.
- **Bhardwaj R, Singhal GS, 1981.** Effect of water stress on photochemical activity of chloroplasts during greening of etiolated barley seedlings. *Plant and Cell Physiology*. 22(2), 155-162.
- **Bounab Sarah, Sahli Imen N.R, 2014.** Etude de l'activité de la peroxydase (POD) et de la catalase (CAT) chez *Lensculinaris* contaminée par le cadmium. Mémoire de Master. Université de Constantine 1.



- **Bouزيد Nedjimia, Youcef D. 2009.** Cadmium accumulation in *Atriplex halimus* subsp. *Schwein furthii* and its influence on growth, proline, root hydraulic conductivity and nutrient uptake. *Flora*, 204,316-324.
- **CETIOM, 2005.** Soja, éd CETIOM. pp 21.
- **Chatenet, C. 2007.** Le soja, une plante étonnante, un aliment incontournable. *Actualités pharmaceutiques* (469), p. 37.
- **Colot, C., & Louis, H. 2012.** Les protéines de soja et leur utilisation en agroalimentaire. <http://www.univ-rouen.fr/ABISS/L3CAB/soja/index.htm>
- **Costa G, Michaut J, Morel J. 1994.** Influence of cadmium on water relations and gas exchanges, in phosphorus deficient *Lupinus albus* L. *Plant Physiology and Biochemistry* 32,105-114.
- **Coullery P. 1997.** Comportement de métaux lourds en agrosystemestempères a faible taux de pollution métallique . Thèse de Doctorat Ecole Polytechnique de Lausanne , Université de Suisse.
- **DAYDÉ, J. 1989.** Contribution à l'amélioration génétique du soja (*Glycine max* L. Merrill) par la création de variétés semi-déterminées ou déterminées. Thèse - Biologie et technologie Végétale, option Amélioration des Plante. Institut National Polytechnique. Toulouse. pp 134.
- **De Staercke, Ph., 1990.** LE SOJA : *Culture, transformations artisanales et semi-industrielles, Utilisation*, COTA, Bruxelles : 50 pp.
- **DE Toledo, J. F. F. ; De Carvalho, C. G. P. ; Arias, C. A. A. ; De Almeida, L. A. ; Brogin, R. L. ; De Oliveira, M. F. ; Moreira, J. U. V. ; Ribeiro, A. S. ; Hiromoto, D. M. 2006.** Genotype and environment interaction on soybean yield in Mato Grosso State, Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 41: 785-791.
- **Debez A, Saadaoui D, Ramani B, Ouerghi Z, Koyro H, Huchzermeyer B, Abdelly C. 2006.** Leaf H<sup>+</sup>-ATPase activity and photosynthetic capacity of *Cakile maritima* under increasing salinity. *Environmental and Experimental Botany* 57, 285-295.
- **Demidchik Vadim, 2015.** Mechanisms of oxidative stress in plants: From classical chemistry to cell biology. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2014.06.021>
- **EGLI, D. B, FRASER, J, LEGGETT, J. E, PONELEIT, C. G. 1981.** Control of seed growth in soybeans. *Annals of Botany*, 48: 171-176



- **Ehsan, S., Ali, S., Noureen, S., Mahmood, K., Farid, M., Ishaque, W.,... Rizwan, M. 2014.** Phytoremédiation assistée par acide citrique du cadmium par *Brassica napus* L. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 106, 164–172. URL : <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.03.007>
- **Ekmekci Y, Tanyolac D, Ayhan B. 2008.** Effects of cadmium on antioxidant enzyme and photosynthetic activities in leaves of two maize cultivars. *Journal of Plant Physiology* 165, 600-611.
- **Fedda A., 2016.** Evaluation de la biodisponibilité des contaminants dans les sols. Mémoire de Master. Université Abdelhamid Ibn Badis-Mostaganem (Algérie).
- **Fredot, E. 2009.** Connaissances des aliments, bases alimentaires et nutritionnelles de la diététique (Vol. 2). Lavoisier.
- **Fusconi A, Gallo C, Camusso W. 2007.** Effects of cadmium on root apical meristems of *Pisum sativum* L.: cell viability, cell proliferation and microtubule pattern as suitable markers for assessment of stress pollution. *Mutation Research* 632,9-19.
- **Gallego Susana M., Liliana B. Pena, Roberto A. Barcia, Claudia E., Azpilicueta et al, 2012.** Unravelling cadmium toxicity and tolerance in plants: Insight into regulatory mechanisms. *Environmental And Experimental Botany* 83, 33-46.
- **Gerard Lof et al., 1990 :** *Soja*. Agromisa. Wageningen, Pays-Bas :16 pp
- **Goemans, Y. 1999.** Matières protéiques végétales : les aspects réglementaires. (J. L. Eurotext, Éd.) Oléagineux, Corps Gras, Lipides, 6(6), pp. 505-508.
- **Gopal R, Rizvi AH. 2008.** Excess lead alters growth, metabolism and translocation of certain nutrients in radish. *Chemosphere*. 70(9), 1539–1544.
- **Gupta KJ, Igamberdiev AU, 2015.** Compartmentalization of reactive oxygen species and nitric oxide production in plant cells: an overview. In: Gupta KJ, Igamberdiev AU (eds) *Reactive oxygen and nitrogen species signaling and communication in plants*. Springer International Publishing, Switzerland. 2015. doi : 10.1007/978-3-319-10079-1\_1
- **Gupta Neha, Kumar Yadav Krishna, Vinit Kumar, Sandeep Kumar et al, 2019.** Trace elements in soil-vegetables interface: Translocation, bioaccumulation, toxicity and amelioration - A review. *Science of the Total Environment* 651, 2927–2942.4



- **Gussarson M, Asp H, Adalsteinsson S, Jensen P. 1996.** Enhancement of cadmium effects on growth and nutrient composition of birch (*Betula pendula*) by buthionine sulphoximine (BSO). *Journal of Experimental Botany* 47, 211-215.
- **Hasenstein KH, Evans ML, Stinemetz CL, Moore R, Fondren WM, Koon EC, Higby MA, Smucker AJ. 1988.** Comparative effectiveness of metal ions in inducing curvature of primary roots of *Zea mays*. *Plant Physiology*. 86, 885-889.
- **Hediji H, Djebali W, Belkadhi A, Cabasson C, Moing A, Rolin D, Brouquisse R, Gallusci P, Chaïbi W. 2015.** Impact of long-term cadmium exposure on mineral content of *Solanum lycopersicum* plants: Consequences on fruit production. *South African Journal of Botany* 97, 176-181.
- **Hoagland DR, Arnon DI. 1938.** The water-culture method for growing plants without soil. *Calif. Agric. Exp. Sta. Cir. Vol. 347*, 1- 39.
- **Hooda PS, Alloway BJ. 1994.** Sorption of Cd and Pb by selected temperate and semi-arid soils: effects of sludge application and ageing of sludge soils. *Wat., Air, Soil Pollution*. 74(3- 4), 235-250.
- **Hubert, J. Paul, F. ; Dayde, J. ; Berger, M. 2006.** Composition variability in soy-derived dietary supplements designated for menopausal symptom prevention. *Oleagineux, Corps Gras, Lipides* 13 (5): 352-362.
- **Hymowitz, T. 1970.** On the domestication of the soybean. *Econ. Bot.* 24: 408-421.
- **Hymowitz, T. and J. R. Harlan 1983** Introduction of soybeans to North America by Samuel Bowen in 1765. *Econ. Bot.* 37: 371-379.
- **Irfan M, Aqil A, Shamsul H. 2014.** Effect of cadmium on the growth and antioxidant enzymes in two varieties of *Brassica juncea*. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 21, 125- 131.
- **Javaheri, F. et Baudoin, G.J.H., 2001, *Le soja*: 860-882.** In : Raemaekers (Eds) : *Agriculture en Afrique Tropicale*, DGCI, Bruxelles, Belgique : 1634 pp.
- **Kopittke P, Menzies N. 2006.** Effect of Cu Toxicity on Growth of Cowpea (*Vigna unguiculata*). *Plant and Soil* 279, 287-296.



- **Kopittke PM, Asher CJ, Kopittke RA, Menzies N W 2007.** Toxic effects of Pb<sup>2+</sup> on growth of cowpea (*Vigna unguiculata*). *Environmental Pollution* 150, 280-287.
- **Kopittke PM, Asher CJ, Kopittke RA, Menzies NW.2008.** Prediction of Pb speciation 190 in concentrated and dilute nutrient solutions. *Environmental Pollution* 153(3), 548-554.
- **Kuboi T, Noguchi A, Yazaki J.1986.** Family-dependent cadmium accumulation characteristics in higher plants. *Plant Soil*. 92:405-415.
- **Lane E.A., M.J. Canty , S.J.More, 2014.** Cadmium and consequence for the health and productivity of farmed exposure ruminants. *Research In Veterinary Science* 101, 132-139.
- **Lecerf, J.-M. 1995.** L'intérêt nutritionnel du soja. *Nutrition clinique et métabolisme*(9), p. 137. doi:10.1016/S0985-0562(05)80091-3
- **Li, X. J., An, P., Eneji, A. E., Hamamura, K., Lux, A., Inanaga, S. 2005.** Growth and yield responses of two soybean cultivars to defoliation and water stress. *Biologia*, 60: 467-472.
- **Liu MQ, Yanai J, Jiang RF, Zhang F, McGrath S P, Zhao FJ. 2008.** Does cadmium play a physiological role in the hyperaccumulator *thlaspicacerulescens*? *Chemosphere*, 71(7), 1276- 1283.
- **Liu Shiliang, Yang Rongjie, Durgesh Kumar Tripathi, Xi Li et al, 2017.** The interplay between reactive oxygen and nitrogen species contributes in the regulatory mechanism of the nitro-oxidative stress induced by cadmium in *Arabidopsis*. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.12.004>
- **Ma LQ, Rao GN. 1997.** Chemical fractionation of cadmium, copper, nickel, and zinc in contaminated soils. *Journal of Environmental Quality* 26(1), 259-264.
- **Mench, M. Morel, j.L. Gucker-t, A. et Gillet B. 1988.** Metal binding with exudates of low molecular weight, *J. Soil Sei.*, 39:521-527
- **Mittler Ron, 2016.** ROS Are Good. *Trends in plant science*. TRPLSC 1461 No. Of
- **Moreno-Jimenez E, Penaloza JM, Manzona R, Carpena-Ruiz RO, Camarra R, Esteban. 2009.** Heavy metals distribution in soil surrounding and abandoned mine in



- NW Madrid (Spain) and their transference to wild flora. *Journal of Hazardous Material*, 162,854-859.
- **Myung CJ, Thornton 1.1997.** Environmental contamination and seasonal variation of metals in soils, plants and waters in the paddy fields around a Pb-Zn mine in Korea. *Science of the Total Environment* 198, 105-21.
  - **Nabi Rizwana Begum Syed, RupeshTayade, AdilHussain, Krishnanand P. Kulkarni, et al, 2019.** Nitric oxide regulates plant responses to drought, salinity, and heavy metal stress. *Environmental and Experimental Botany* <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.02.003>.
  - **Nahakpam S, Shah K. 2011.** Expression of key antioxidant enzymes under combined effect of heat and cadmium toxicity in growing rice seedlings. *Plant Growth Regulation*, 63, 23-35.
  - **Nemmiche S. 2017,** Oxidative Signaling Response to Cadmium Exposure. *Toxicological Sciences* 156, 4–10. Doi: 10.1093/toxsci/kfw222.
  - **Palm, M., Monneret-Vautrin, D., Kanny, G., Denery-Papini, & Fremont, S. 1999.** Food allergy to egg and soy lecithins. *Allergy*, 54(1116).
  - **Peterson AE. 1986.** Essential and toxic heavy metals in soil and plant tissue from municipal sewage sludge applications to cropland. *proc. of 13<sup>th</sup> Congress of Int. Soil. Sei.* 425-427, Hamburg, Germany.
  - **Planchon, C. 1980.** Photosynthèse et sélection. *Le sélectionneur français*, 28: 7-19.
  - **Rajaa Vaseem, Umer Majeeda, Hunseung Kangb, Khursheed Iqbal, Andrabic et al, 2017.** Abiotic stress: Interplay between ROS, hormones and MAPKs. *Environmental and Experimental Botany* 137, 142–157.
  - **Rascio N, Vecchia FD, Rocca NL, Barbato R, Pagliano C, Raviolo M, Gonnelli C, Barbbrielli R. 2008.** Metal accumulation and damage in rice (cv. Vialonenano) seedlings exposed to cadmium. Anatomical variations in roots due to Cd stress. *Environmental and Experimental Botany* 62, 267-278.
  - **Rehman MZ, RizwanM, Ghafoor A, Naeem A, Ali S, Sabir M, Qayyum MF. 2015..** Tolérance et accumulation des métaux lourds par la végétation spontanée des friches



métallurgiques : vers de nouvelles méthodes de bio -dépollution. Thèse de doctorat de l'Université de Jean Monnet, p157.

- **Richter R, Hlusek B. 1986.** The effect of available Zn, Cd and Pb in soil on their concentrations in organs of root vegetables, proc. of 13<sup>th</sup> congress of Int. Soil Sci. Soc. 447- 448, Ham burg, Germany.
- **Rizwan Muhammad, Ali Shafaqat, Adrees Muhammad, Ibrahim Muhammad SCIENCES 156, 4–10. et al, 2017.** A critical review effects, tolerance mechanisms and management of cadmium in vegetables. Chemosphere 182, 90-105.
- **Ros R, Cooke DT, Martinez-Cortina C, Picazo I.1992.** Nickel and cadmium-related changes in growth, plasma membrane lipid composition, ATPase hydrolytic activity and 209oration pumping of rice (*Oryza sativa* L. CV. Bahia) shoots. Journal of Experimental Botany 43,1475-1481
- **Rueggsegger A, Brunold C. 1992.** Effect of cadmium on  $\gamma$ -glutamylcysteine synthesis in maize seedlings. Plant Physiology 99, 428-433.
- **Saddhe Ankush Ashok, Malvankar Manali Ramakant, Karle Suhas Balasaheb et al, 2019.** Reactive nitrogen species: Paradigms of cellular signaling and regulation of salt stress in plants. Environmental and Experimental Botany 161, 86-97. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.11.010>.
- **Saidi I, Ayouni M, Dhieb A, Chtourou Y, Chaïbi W, Djebali W. 2013.** Oxidative damages induced by short-term exposure to cadmium in bean plants: Protective role of salicylic acid. South African Journal of Botany, 85, 32-38.
- **Sameni AM, Maftoun M, Bassiri. 1987.** Reponses of tomato and sweat corn to different cadmium levels in calcareous soil. Journal of Horticultural Science 62, 227-232.
- **Sela M, Garty J, Tel-Or E. 1989.** The accumulation and the effect of heavy metals on the water fern *Azolla filiculoides*. New Phytologist 112, 7-12.
- **Setchell, K. D. R And Cassidy, A. 1999.** Dietary isoflavones: biological effects and relevance to human health. Journal of Nutrition, 129: 758-767.



- **Sharma P, Dubey RS. 2005.** Lead toxicity in plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology* 17, 35-52.
- **Sivasankar R, Kalaikandhan R, Vijayarengan P. 2012.** Phytoremediating capability of four plant species under zinc stress. *International Journal of Research in Environmental Science and technology*, 2 (1), 1-9.
- **Solanet, G., Levard, L., Castellanet, C., Feret, S. 2011.** L'impact des importations européennes de soja sur le développement des pays producteurs du Sud. Paris ; Nogent-sur-Marne: CFSI ; Gret. URL : <https://www.gret.org/wp-content/uploads/09708.pdf>
- **Souguir D., 2009.** Modifications métaboliques, moléculaires et génotoxicité induites par le cadmium chez (*Vicia faba*). Thèse de Doctorat. Université d'Auvergne Clermont Ferrand-II (France), Université de 7 Novembre A Carthage (Tunisie).
- **Tang Y-T, Qiu R-L, Zeng X-W, Ying R-R, Yu F-M, Zhou X-Y. 2009.** Lead, zinc, cadmium accumulation and growth simulation in *Arabis paniculata*. *Franch. Environ Exp Bot* 66:126–134
- **Vaculik M, Pavlovič A, Lux A. 2015.** Silicon alleviates cadmium toxicity by enhanced photosynthetic rate and modified bundle sheath's cell chloroplasts ultrastructure in maize. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 120, 66-73.
- **Wang Y, Jiang X, Li K, Wu M, Zhang R, Zhang L, Chen G. 2014.** Photosynthetic responses of *Oryza sativa* L. seedlings to cadmium stress: physiological, biochemical and ultrastructural analyses. *Biometals* 27, 389-401.
- **Wojcik M, Vangronsveld J, D'Haen J, Tukiendorf A. 2005.** Cadmium tolerance in *Thlaspi caerulescens*. II. Localization of cadmium in *Thlaspi caerulescens*. *Environmental and Experimental Botany* 53,163-171.
- **Zid E, Boukhris M. 1977.** Quelques aspects de tolérance de l' *Atriplex Halimus* L. au chlorure de sodium . Multiplication, croissance, composition minérale. *Oecol Plant* 12, 351- 362.
- **Zorrig W., 2010.** Recherche et caractérisation de déterminants contrôlant l'accumulation de cadmium chez la laitue "*Lactuca sativa*". Thèse de doctorat. Université Montpellier II /SupAgro (France) et Université Tunis El Manar (Tunisie).