

وزارة التعليم العالي والبحث
MINISTER DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE IBN KHALDOUN TIARET
FACULTÉ DE SCIENCE DE LA NATURE ET DE LA VIE



Mémoire de Master

Domaine : Science de la nature et de la vie

Filière: Sciences Biologiques

Spécialité : Génétique moléculaire et amélioration des plantes

Thème

Effet de cuivre sur le pouvoir germinatif de plantes aromatiques et médicinales

Présenté par : Sadjara fatima zohra

Djili Meriem

Bouchouka Roguia

Devant le jury

Président	Mr BOUBAKEUR A	MCA Univ. Tiaret	
Examineur	Mr BOUFARES K	MAa	Univ. Tiaret
Promoteur	Mr BOUMAAZA. B	MCA	Univ. Tiaret
Co-promoteur	Mr BENZOHR. IE	Maître de recherche	CRSTRA

Année universitaire 2019 / 2020

Remerciements

En tout premier lieu nous tenons à remercier notre promoteur **Mr BOUMAAZA B**,
notre Co- promoteur **Mr BENZOHR.A.IE** pour le temps et l'attention qu'ils ont bien
voulu au bon déroulement de ce travail.

Nous tenons à remercier **Monsieur BOUBAKEUR A** de nous avoir fait l'honneur de
présider le jury de notre soutenance

Nous tenons à remercier également **Monsieur BOUFARES K Ad** 'avoir accepté
d'examiner et de juger notre synthèse, qu'ils trouvent ici notre sincère gratitude.

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont grandement contribué à la
réalisation de ce travail

MERCI!



Dedicace

Je dédie ce travail:

A la source de la tendresse, ma mère. A mon père, qui m'a appris que la patience est le secret du succès.

A toute ma famille

A tous mes amis



Résumé

La pollution par les métaux lourds est devenue un véritable problème menaçant notre écosystème, avec des effets nuisible sur la production végétal et sur la biodiversité. L'objectif de notre travail est d'étudier sur plan bibliographique l'influence du cuivre sous différents formes sur la germination et la croissance de la racicule des grains. L'inhibition de ce processus semble dépendre, toutefois, du métal et de sa concentration, de la durée d'exposition des graines, de l'espèce végétale, voire même de la variété et de la graine, notamment la nature de ses téguments. Chez les plantes aromatiques et médicinales, si les métaux sont souvent indispensables au déroulement des processus biologiques (Oligoéléments), nombre d'entre eux peuvent s'avérer contaminants pour diverses formes de vie, lorsque leur concentration dépasse un certain seuil.

Mots clés : Plantes médicinales et aromatiques (PAM), cuivre, pollution, germination

Abstract

Pollution by heavy metals has become a real problem threatening our ecosystems, with harmful effects on plant production and on biodiversity. The objective of Our work is to study the influence of copper in different form on the germination and growth of the radicle of grains from a bibliographic perspective. The inhibition of this procès seems to dépend, however, on the metal and its concentration, on the duration of exposure of the seeds, on the plant species, or even on the variety and the seed, in particularly the nature of its seed coats. In aromatic and medicinal plants, although metals are often essential for the development of biological processes (trace elements), many of them can be contaminants for various form of life, when their concentration excèdes a certain threshold.

Keywords: Aromatic and Medicinal Plants, copper, pollution, germination

الملخص :

أصبح التلوث بالمعادن الثقيلة مشكلة حقيقية تهدد نظامنا البيئي ، مع آثار ضارة على الإنتاج النباتي وعلى التنوع البيولوجي. الهدف من عملنا هو دراسة تأثير النحاس بأشكال مختلفة على إنبات ونمو جذر الحبوب من وجهة نظر بيلوغرافية. يبدو أن تثبيط هذه العملية يعتمد على المعدن وتركيزه ، ومدة تعرض البذور ، والأنواع النباتية ، وحتى الصنف والبذور ، وخاصة طبيعة طبقات البذور. في النباتات العطرية والطبية ، على الرغم من أن المعادن غالبًا ما تكون ضرورية لتطوير العمليات البيولوجية (العناصر الدقيقة) يمكن أن يكون العديد منها ملوثًا لأشكال مختلفة من الحياة ، عندما يتجاوز تركيزها حدًا معينًا.

الكلمات المفتاحية: نباتات طبية وعطرية ، نحاس ، تلوث ، إنبات

Liste des abréviations

% : pourcentage

CHL : Chlorophylle

COPT : Copper Transporter

CUO: oxyde de cuivre

Cu : Cuivre

Al : aluminium

Fe : fer

Zn : zinc

F: fluorine

G.MOI⁻¹ : gramme par mol

G/CM⁻³ :gramme par centimètre cube

JC : Jésus Christ.

MT : Métallothionéines

PC : phytochélatines.

PH : potentiel hydrogène.

PPM : partie par million

ETM : élément traces métallique

V : vanadium

CU₃CO₃ : carbonate de cuivre

CU₂FeS₂ : chalcopyrite

K⁺ : potassium

H₂O₂ : Peroxyde d'hydrogène

PAA1 : Polyamine N-acetyltransférase 1

HMA: Heavy Metal ATPase

PAM : Plantes aromatiques et médicinales

FAO : organisation des nations unie pour l'alimentation et l'agriculture.

Liste des tableaux

Tableaux	Titre	Page
1	Aspect classification périodique	03
2	Classification des principaux ETM selon leur affinité pour les ligands oxygénés. (Classe A), des ligands azotés ou soufrés (Classe B) et pour les deux types de ligands (Classe Intermédiaire)	04
3	Evolution de la production algérienne en plantes aromatiques	21
4	Principales plantes consommées en Algérie	22
5	Les 12 principaux pays importateurs et exportateurs de produits pharmaceutiques au monde, plantes, selon les quantités et valeurs moyennes pour la période 1991-2000.	24

Figure	Titre	Page
1	étude l'effet de (Cu So ₄) sur la longueur racinaire de la plante fève (Vicia faba L.).	40
2	étude comparaison sur l'effet de cuivre sur la longueur de la racine, chez l'Atriplex canescens.	41
3	étude comparaison sur l'effet de cuivre sur la longueur des tiges, chez l'Atriplex canescens.	41
4	Variation des teneurs en chlorophylles a, et totales (mg. G-1) dans les feuilles d'Atriplex canescens stressée au cuivre.	42
5	étude de l'évolution des moyennes de la teneur relative en eau (%) en fonction de la dose du cuivre (ppm).	43

Table des matières

Remerciement	
Dédicace	
Résumé	
Abstract	
الملخص	
Liste des abréviations	
Liste des tableaux	
Table de matières	
Introduction	01
Chapitre I : généralité sur le cuivre et leur effet sur les plantes	
I. Les métaux lourds	04
I.1. Définition	04
I.2. Les sources de métaux lourds	05
I.2.a. Les sources naturelles	05
I.2.b. Les sources anthropiques	06
I.3. Rôle des métaux lourds	06
II. Cas de cuivre	06
II.1. Généralités	06
II.2. Le cuivre dans le sol	07
II.2.a. Les formes du cuivre dans le sol	07
II.2.b. Utilisation du cuivre	08
II.2.c. Origines des pollutions par le cuivre	08
II.3. Le cuivre dans la plante	08
II.3.a. Le rôle physiologique du cuivre	08
II.3.b. La carence en cuivre	09
III. La toxicité et tolérance de cuivre	09
III.1. Phytotoxicité de cuivre	09
III.1.a. Effet du cuivre sur la germination	09
III.1.b. Effet de cuivre sur la croissance et la nutrition minérale	09
III.1.c. Effet de cuivre sur la photosynthèse	10
III.1.d. Effet du cuivre sur statu hydrique	10
III.1.e. Stress oxydatif	10

III.2. Mécanismes de tolérance de cuivre	11
III.2.a. Absorption et le transport	11
III.2.b. Stockage et la séquestration	11
III.2.c. La chélation et la compartimentation cellulaire	11
Chapitre II : Généralités sur les plantes aromatiques et médicinales	
I.Généralités	14
I.1. Rappel historique sur les plantes aromatiques et médicinales	14
I.1.a. Définition des plantes aromatiques et médicinales	15
I.1.b. Réglementation	15
I.2. Domaine d'application du plant aromatique et médicinal	15
I.2.a. En alimentaire	16
I.2.b. En cosmétologie	16
I.2.c. En médecine	16
I.3. Typologie et les critères des plantes aromatiques et médicinales	16
I.3.a. Critères botaniques	17
I.3.b. Critères d'utilisation médicinale	17
I.3.c. Critères d'utilisation humaine / animal	17
I.3.d. Classification selon le mode d'utilisation	17
I.3.e. Classification selon le milieu l'origine de la plante (naturel ou culture)	17
I.3.f. Selon la valeur économique	17
I.3.g. Classification administratif/douanier	17
I.4. Intérêt de l'étude des plantes médicinales	17
I.4.a. Les avantages des plantes médicinales	18
I.4.b. Les inconvénients des plantes médicinales	18
I.4.c. Action des plantes médicinales	19
I.5. Mode d'emploi des plantes médicinales	20
I.5.a. Activités antimicrobienne	20
I.5.b. Activité antifongique	20
I.5.c. Activité antioxydant	20
I.5.d. Activités antiviral	21
I.5.e. Activités neurale	21
I.6. Les formes d'utilisation des plantes médicinales	21
I.7. Les éléments actifs des plantes médicinales	21

II. Les plantes aromatiques et médicinales produites et consommées en Algérie	24
II.1. Les plantes aromatiques et médicinales dans le monde	26
II.2. Le séchage des plantes médicinales	28
II.2.a. Principe de séchage	28
II.2.b. Méthode de séchage des plantes	29
II.2.c. Mode de séchage	29
II.3. Stockage et conservation des plantes médicinales séchées	30
III. Problématiques et perspectives de promotion de la filière de plantes aromatiques et médicinales	31
Chapitre III : synthèse des travaux sur l'effet de cuivre sur les végétaux	
Introduction	
I. Toxicité du cuivre chez la vigne	35
II. Effet de cuivre sur le blé	35
III. Effet de cuivre sur l'Atriplex canescens	36
IV. Effet de cuivre sur le petit pois	36
V. Effet de cuivre sur la lentille cultivée	36
VI. Effet de cuivre sur l'haricot	37
VII. Effet de cuivre sur Agropyrum elongatum	37
VIII. Effet de cuivre sur la fève	37
IX. Effet de cuivre sur les plantes aromatiques et médicinales	38
X. Matériel et méthodes	38
1. Matériel végétal	39
2. au laboratoire	39
3. méthodologie	39
4. Résultats :	39
4.1. Paramètre biométrique	39
4.1.1. Effet du Cuivre (Cu So ₄) La longueur des racines de fève (Vicia faba L.).	39
4.1.2. Effet du Cuivre (Cu So ₄) La longueur des racines de l'Atriplex	40
4.1.3. Effet du Cuivre (Cu So ₄) La longueur de la tige de l'Atriplex canescens.	42
4.2. Paramètre physiologique	41
4.2.1. Effet du cuivre sur la chlorophylle	41
4.2.2. Effet du Cuivre (CuSo ₄) sur la teneur relative en eau (RWC)	42
5. interprétation :	43

Conclusion	45
Références bibliographiques	47

Introduction générale

Les pratiques anthropogéniques, industriels et activités agricoles peuvent être la cause d'une accumulation de métaux lourds dans l'environnement et en particulier dans les sols agricoles. La fourniture de métaux dans les sols est généralement constitué par des répercussions atmosphériques, une application directe sur le sol ou une application indirecte par les engrais et les produits phytosanitaires (**Adriano, 2001**).

La pollution métallique des sols peut avoir deux conséquences importantes. Sur l'une face, il peut faciliter la dispersion des métaux dans l'atmosphère à la surface des eaux par l'érosion, de l'eau souterraine et eaux par lessivage et éventuellement, par des transferts dans la chaîne alimentaire, d'animaux et encore plus de plantes (**Adriano, 2001**). En l'autre part, la pollution du métal dans les sols peut affecter les différentes fonctions du sol, ceux qui contribuent aux services éco-systémiques, et en particulier son rôle de production dans les zones agricoles.

Dans le secteur agricole, le besoin d'une culture correspond à la quantité de l'élément nutritif nécessaire et suffisante pour atteindre un objectif de production défini par le rendement et la qualité recherchée pour cette production (**Yang et al. 2005**).

Le cuivre est un métal de transition, occupe une place spécifique dans le développement des cultures. C'est un oligo-élément indispensable à la vie en faible quantité, phytotoxique lorsqu'il est présent à des concentrations élevées pour les algues et les végétaux (**Hänsch et Mendel, 2009**). Au niveau du métabolisme de la plante, le cuivre joue un rôle important dans de multiples systèmes enzymatiques tels que la photosynthèse, la respiration, l'alimentation, la fertilité ou la détoxification. Par conséquent, un excès de cuivre dans le sol peut s'avérer contaminant, lorsque sa concentration dépasse un seuil, et peut se traduire, par l'apparition de symptômes d'intoxication, accompagnés d'une inhibition de la croissance des plantes, d'une réduction de l'activité photosynthétique et d'une diminution de l'absorption des nutriments.

La germination est un stade critique dans le cycle de vie et du développement de la plupart des plantes. Elle assure la reproduction et, par conséquent, contrôle la dynamique des populations (**Radosovich et al., 1997**). Nombreuses stresses environnementales qui peuvent compromettre l'aptitude des graines à germer; salinité (**Boumaaza, 2020**), stress hydrique (**Aisset et Mehdadi, 2016**), humidité et température inadéquates (**Akman, 2009**).

L'inhibition de la germination semble dépendre, toutefois, de la concentration du cuivre, de la durée d'exposition des graines, de l'espèce végétale, voire même de la variété et de la graine.

Cependant, rares sont les travaux qui ont étudié l'impact des métaux lourds sur la germination des plantes aromatique et médicinales, par rapport aux nombreuses publications abordant les effets des métaux sur les végétaux (**Kranmer & Colville, 2011**).

Le mémoire proposé s'articule autour des trois chapitres. Dans le premier chapitre, nous proposons de présenter une synthèse bibliographique sur le cuivre et leur effet sur les plants et les mécanismes de tolérance, le 2ème chapitre regroupe généralité sur plantes aromatique et médicinales et le dernier chapitre relate les travaux réalisés dans le but d'augmenter nos connaissances sur le cuivre et son effet sur les plantes.

Chapitre I : Généralité sur le cuivre et leur effet sur les plantes

Chapitre I : Généralité sur le cuivre et leur effet sur les plantes

I. Les métaux lourds

Les métaux lourds sont l'une des substances toxiques les plus anciennes connues de l'homme et présentent une menace pour la santé des organismes vivants, si leurs concentrations dépassent certaines petites limites et sont généralement soumises à des règles strictes lorsqu'elles sont introduites dans l'environnement.

I.1. Définition

Le mot métal lourd est inculqué dans la littérature de pollution de l'environnement, mais son utilisation n'est pas entièrement satisfaisante. L'examen du tableau périodique d'éléments révèle que l'on peut appeler environ 84 de ces éléments. Actuellement identifiés les métaux, mais la distinction peut être ne sont pas toujours pointus entre les métaux et les non-métaux (Vouk, 1979). Manipulation courante fait que cette appellation assez floue comportée concept négatif de toxicité, ce qui n'est pas infructueux puis qu'une grande majorité de ces métaux sont toxique à des densités élevée renommé aussi comme un composant métalliques naturels, métaux ou, dans certains cas, métalloïdes (environ 65 éléments avec une densité relative supérieure à 5). (Tableau 1)

Tableau 1 : Aspect Classification périodique (Bensaha, 2010).

Bloc s		<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: #cccccc; margin-right: 5px;"></div> Métaux lourds de densité > 5 </div>										Bloc p					
H																	
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg	Bloc d										Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac	Bloc f														
Lanthanides			Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
Transuraniens			Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Cf	Bk	Es	Fm	Md	No	Lr	

Cependant, il existe plusieurs publications qui traitent de l'aluminium (ce qui est pas lourd) ni même du sélénium (qui n'est pas un métal). Loin de ce débat de chimistes, il est plus approprié pour le biologiste d'utiliser un autre forme de classification (Nieboer et Richardson; 1980) basée sur les propriétés chimiques. Les différentes classes de métaux sont présentées dans le **tableau 2**.

Chapitre 1 : Généralité sur le cuivre et leur effet sur les plantes

Tableau2 : Classification des principaux ETM selon leur affinité pour les ligands oxygénés. (Classe A), des ligands azotés ou soufrés (Classe B) et pour les deux types de ligands (Classe Intermédiaire) (Hopkin, 1989).

Classe A	Classe intermédiaire	Classe B
Calcium	Zinc	Cadmium
Magnésium	Plomb	Cuivre
Manganèse	Fer	Mercure
potassium	Chrome	Argent
sodium	Cobalt	
Strontium	Nichel	
	Arsénié	

Un certains nombre de métaux sont considérés comme des contaminants environnementaux. Par exemple, le cuivre est utilisé dans la réaction photosynthèse et respiration (Hopkins,2003; Yruela, 2009). Un haut niveau de cuivre peut cependant rendre toxique, en particulier par inhibition de la croissance des racines (Marschner, 2012) et la modification de la structure de certaines protéines (Yruela, 2009).

I.2. Les sources de métaux lourds

La difficulté principale avec les métaux lourds comme le plomb, le cadmium, le cuivre, et le mercure est qu'ils ne peuvent pas être biodégradé et donc persistant de longue dure de vie dans le sol. (Huynh, 2009). Des quantités nécessaires de ces métaux lourds faire entrée dans l'environnement par des sources naturelles et anthropique (Benedetto, 1997).

I.2.a. Les sources naturelles

Certains Oligo-éléments peuvent être détectés dans les minéraux primaires présents dans la composition des roches enflammées. Ces derniers sont les roches formées suite à la refroidissement et ultérieur cristallisation de magma (Alloway, 1995). Ainsi, l'altération de ces roches est le principal mécanisme naturel qui permet la libération d'éléments traces dans l'environnement (Kabata-Pendias, 2011).

De nombreux processus, comme le volcanisme, sont des causes naturelles possibles. Il est les différents biogéochimiques et pédogénétiques processus qui opèrent dans les sols qui résultent de la libération des Oligo-éléments (Pollard et al., 2002).

I.2.b. Source anthropique

Selon (Mckenzie et al., 1997), les métaux provenant d'apports anthropiques sont présents sous des formes chimiques assez réactives et entraînent de ce fait des risques très élevées aux métaux d'origine naturelle qui sont le plus souvent immobilisés sous des formes relativement inertes. Les sources anthropogène sont les suivant :

- ✚ Activités pétrochimiques.
- ✚ Utilisation de combustibles fossiles (centrales électriques au charbon, chaudières industrielles, fours à ciment).
- ✚ Transport (véhicules et moteurs routiers et non routiers, embarcations).
- ✚ Incinération de déchets.
- ✚ Produits (interrupteurs électriques, amalgames dentaires, éclairages fluorescents).
- ✚ Déchets urbains (eaux usées, boues d'épuration, ordures ménagères), agricoles.

I.3. Rôle des métaux lourds

Fe, Zn, Si, Cu, Mn, Ni, Co, Se, F, Cr, Mo, Sn, V, Al sont des oligo-éléments inclus dans les catégories métaux lourds (Morrison, 1979). Ces éléments sont faiblement concentrés dans les tissus vivants. Néanmoins, ils jouent un rôle important dans les réactions métaboliques et fonctionnent généralement comme un centre de coordination pour la structure et la stabilité des enzymes et des protéines. (Goudot-perrot, 1983). Chacun de ces éléments peut créer des liaisons métal-protéine et peut altérer la structure tertiaire de la protéine.

Une variété de métaux lourds est impliquée dans défense immunitaire. Ils sont également impliqués dans la lutte contre les radicaux libres de l'oxygène. Les métaux lourds peuvent s'améliorer la force de certains tissus, et aussi sont indispensables pour la nutrition des vivants. Bien que chaque métal lourd ait son propre rôle physiologique (Goudot-Peppet, 1983).

II. Cas de cuivre

II.1. Généralité

C'est un métal probablement connu depuis l'âge de la pierre. Le cuivre est un composant chimique de symbole de Cu et de numéro atomique 29, il appartient au groupe 11 et de période 4. Sa masse atomique est de 63,546g/mole, il est présenté sur notre planète par deux isotopes stables ^{63}Cu (69,17%) et ^{65}Cu (30,83%). Le cuivre est principalement utilisé :

- Pour la fabrication des câbles, des fils et des appareillages électriques, car il possède la meilleure conductivité électrique de tous les métaux industriels.
- On l'utilise pour les toitures, les canalisations d'eau et de gaz en raison de sa résistance à la corrosion.

- Par ailleurs, comme un conducteur de chaleur, le cuivre sert à fabriquer des ustensiles de cuisine, des chaudières et des échangeurs de chaleur.
- Le cuivre entre aussi dans la composition d'engrais et de certains pesticides, sous la forme de sulfate de cuivre.
- De nombreux alliages à base de cuivre (principalement le bronze) sont utilisés pour la fabrication de pièces de monnaie, de médailles, de statues et de cloches, en raison de leur dureté et de leur résistance à la corrosion.

II.2. Cuivre dans le sol

Les premiers artefacts en cuivre datent de plus de six mille ans. Il a été utilisé pour la fabrication d'armes, d'équipement et de bijoux 5000 ans avant JC. Le début de l'extraction du cuivre dans les mines sous forme de minerai (**Emsley, 2003**). Plus tard, on a découvert que l'associé à l'étain il formait un alliage beaucoup moins malléable et qui pourrait être affilé. Dans les temps anciens, le cuivre a commencé à être utilisé pour ses propriétés colorantes et antifongiques.

Les cultures grecques et romaines utilisaient le vert-gris (cuivre acétate) comme un colorant et comme un médicament. Au milieu de l'âge, l'excellente conductivité thermique du cuivre métallique était utilisée dans les casseroles et bouilloires, puis dans l'imprimerie comme plaques de gravures. Plus tard, il a été utilisé pour gagner les coques des bateaux en bois pour empêcher les crustacés d'être attachés (**Emsley, 2003**).

II.2.a. Les formes de cuivre dans les sols

Selon (**Loue, 1993**), dans les roches de l'écorce terrestre le cuivre se trouve principalement sous forme de sulfures, soit sulfures simples soit sulfures complexes comportant d'autres métaux, la forme la plus courante dans le sol est l'ion divalent Cu^{++} , peu mobile car fortement adsorbé sur le complexe argilo-humique, particulièrement par la matière organique. Une analyse approfondie conduirait à distinguer chaque forme, chaque espèce chimique: c'est la spéciation (**Baize, 2000**).

Les formes chimiques du cuivre que l'on peut trouver dans les sols sont les suivantes :

- Complexes : citrates, fulvates, humates, oxalates, etc. CuO (Oxyde de cuivre), Cu_2O (Oxyde de dicuivre), CuCl_2 (Dichlorure de cuivre), $\text{CuCO}_3 + \text{Cu}(\text{OH})_2$ (Carbonate de cuivre).

II.2.b. Utilisation de cuivre

Les propriétés du cuivre haute conductivité électrique, résistance à la corrosion sont très utilisées dans l'électricité, l'électronique, les télécommunications (réseaux câblés, microprocesseurs, batteries), dans la construction (Tuyauterie d'eau, couverture), dans

l'architecture, les transports (composants électromécaniques, refroidisseurs d'huile, réservoirs, hélices), les machines-outils, des produits D'équipement (plateformes pétrolières) et de consommation (ustensiles de cuisine) mais aussi des pièces de monnaie comme l'euro (**Jennifer S pero, et all 2000**). Aussi le sulfate de cuivre est utilisé pour détruire les algues et la vie microbienne dans les réservoirs d'eau et comme fongicide dans les préservatifs du bois (**Nriagu, 1979a**).

II.2.c. Origine de pollution par le cuivre

La pollution atmosphériques est ses abondants rejets urbaines et industrielles est l'origine de ces énormes de la pollution atmosphériques provient en partie des milieux urbaines et des moyens de transport (trafic routier, ferroviaire et aériens). Le cuivre présent dans les aérosols sont ensuite entraînés dans le sol par les eaux de pluie les multiples activités industrielles ainsi que certaines pratiques agricoles (engrais, pesticides, et autre) sont également à l'origine de la pollution par le cuivre (**Jean-Pierre et Yan chimi Jost-Tse, 2018**).

II.3. Le cuivre dans la plante

Les oligo-éléments jouent un rôle important dans la vie des plantes et en particulier, dans la production végétale, leur rôle se différencie globalement de celui des composants majeurs, il s'agit d'une fonction catalytique et non d'un rôle plastique, c'est d'ailleurs ce qui explique leurs hautes efficacités et leurs caractères indispensables bien que les besoins très minimes. Parmi les oligo-éléments essentiels aux plantes nous allons nous intéresser au cuivre.

II.3.a. Le rôle physiologique de cuivre

Le cuivre est reconnu comme élément trace essentiel pour les végétaux (**Alloway, 1995**). Il joue un rôle très important dans divers processus métaboliques, en participant à la constitution de différentes protéines (**Marschner, 1995**).

Le Cu intervient dans de nombreuses fonctions physiologiques et biochimiques. De façon générale, *in vivo*, il est essentiellement lié à des cuproprotéines lui permettant d'exprimer ses fonctions physiologiques dont le principal est sans doute la protéger contre les stress oxydants. Le maintien des fonctions immunitaires et l'implication dans la chaîne respiratoire cellulaire sont également des fonctions physiologiques primordiales du cuivre. (**Jondreville et al., 2003**).

II.3.b. La carence en cuivre

La concentration en Cu dans les plantes est de 4 à 20 mg/kg de matière sèche, mais seulement 5 à 10 mg/kg de matière sèche sont requis pour une croissance normale (**Selon Larcher, 2003**). Une carence en Cu aura un effet négatif sur le métabolisme carbohydrates

(inhibition de la photosynthèse, de la respiration et de la distribution des carbohydrates), le métabolisme de l'azote (fixation de l'azote, dégradation et synthèse de protéines) est lignification, les transferts intercellulaires de l'eau, la production de graine et sur la résistance aux maladies (Bussler, 1981; Schulte et Kelling, 1999). De plus des sols minéraux et organiques contenant 6 mg et 30 mg /kg de sol sont considérés comme déficitaires en Cu (Katyal et Randhawa, 1986). Les carences se traduisent par des nécroses du méristème apical, une distorsion et une chlorose des jeunes feuilles (Marschner, 1995).

III .1. La phytotoxicité de cuivre

Le cuivre, comme l'autre oligo-élément essentiel est un élément potentiellement phytotoxique en trop forte concentration. La toxicité de cuivre se manifeste principalement au travers de la rhizotoxicité et parfois de la mise en place d'une déficience induite en Fe. (Marschner, 1995). Les principaux symptômes observés chez les plantes suite à une exposition métallique sont une inhibition de la croissance, une chlorose foliaire, des lésions nécrotiques conduisant à un jaunissement progressif puis à un repliement ou un dessèchement du feuillage (Toppi et Gabrielli, 1999).

III.1.a. Effet de cuivre sur la germination

La germination est un stade critique dans le cycle de vie et du développement de plusieurs plantes. Elle assure la reproduction et, par conséquent, contrôle la dynamique des populations (Liu et al., 2012).

III.1.b. Les effets de cuivre sur la croissance et nutrition minéral

A l'échelle cellulaire, le cuivre provoque l'inhibition de la division (Eleftheriou et Karataglis, 1989), et de l'élongation cellulaire par augmentation de la rigidité des parois du fait du remplacement des ions Ca^{2+} par les Cu^{2+} dans l'apoplasme (Arduini et al., 1994). La ramification racinaire augmente mais les racines ne se développent pas et restent à l'état de renflement au niveau subapical (Kopittke et al., 2007, Bravin, 2008). De plus, l'excès de cuivre, stocké dans les vacuoles des cellules situées sous l'endoderme des racines pour éviter le transfert du cuivre vers les parties aériennes, peut provoquer des ruptures au niveau des racines qui sont alors coupées en deux (Kopittke et al., 2009).

Ces modifications racinaires provoquent une altération de la perméabilité des membranes plasmiques (Kabata Pendias, 2010) ce qui conduit à une perturbation généralisée de l'alimentation de la plante (Kopittke et Menzies, 2006). L'absorption de Fe, Ca, Mg, Mn, Zn diminue (Toselli et al., 2008) tandis que l'efflux de K et P augmente (Lexmond et Van der Vorm, 1981). La réponse physiologique de la plante à une exposition élevée au cuivre serait

donc une restriction en eau et une diminution de la translocation des éléments minéraux (RomeuMoreno et Mas, 1999) ce qui explique le ralentissement de croissance observé.

III.1.c. Effet de cuivre sur la photosynthèse

La chlorose ferrique induite par un excès de cuivre est un symptôme couramment observé sur les parties aériennes en cas de phytotoxicité cuprique (**Kabata-Pendias, 2010**). Cela s'explique par l'antagonisme fer-cuivre pour les transporteurs utilisés lors de l'absorption racinaire (**Lexmond et Van der Vorm, 1981**) ou lors de la translocation vers les parties aériennes (**Romeu-Moreno et Moreno, 1999 ; Toselli et al., 2008**). Par conséquent, la teneur en fer dans la plante décroît (**Kopittke et Menzies, 2006**), notamment au niveau des chloroplastes, dont le nombre diminue (**Panou-Filothéou et al., 2001**), ce qui perturbe rapidement la synthèse de la chlorophylle.

III.1.d. Effet de cuivre sur le statu hydrique

En effet, les ions toxiques de Cu peuvent affecter l'absorption d'eau à partir du sol et diminuer à son tour la teneur en eau au niveau des racines (**Rucińska-Sobkowiak, 2016**). En effet, cette légère diminution de la teneur en eau qui n'a pas dépassé dans la majorité des cas les 10% pourrait être liée à une grande capacité d'ajustement osmotique. Toutefois, il est important de noter qu'une diminution de la teneur en eau, pourrait affecter plus tard la croissance d'une part et le développement d'autre part, et peut intervenir dans la détermination du rendement en biomasse et en grains (**Radhouane ,2008**).

III.1.e. Stress oxydant

L'excès de Cu dans les cellules est à l'origine d'un stress oxydant (**Boojar et Goodarzi, 2007**). Le Cu va induire la production d'espèces réactives de l'oxygène (ROS) et de radicaux libres (**Hall, 2002**) car il stimule des réactions qui en produisent, comme les réactions d'Haber-Weiss et de Fenton. La réaction d'Haber-Weiss se décompose en deux étapes, une première réaction qui transforme le radical superoxyde en oxygène grâce à un ion métallique et une deuxième réaction qui transforme le peroxyde d'hydrogène en radical hydroxyle (OH) et groupement hydroxyle (OH-), c'est la réaction de Fenton.

III.2. Mécanismes de tolérance de cuivre

Les plantes disposent de plusieurs mécanismes connus et possibles de tolérance aux métaux toxiques. Dans le cas du cuivre les mécanismes sont variables d'une espèce à l'autre.

III.2.a. Absorption et le transport

Dans la cellule le Cu se situe dans le cytosol, dans le réticulum endoplasmique, dans les mitochondries, dans les chloroplastes et dans l'apoplasme (Pilon et al., 2006). Il y a trois

principales catégories de transporteurs impliqués dans l'homéostasie du Cu dans la cellule, les « heavy metal ATPase » (HMA), les Cu transporter family (COPT et CTR) et les chaperonnes du Cu. Les HMA, COPT et CTR sont des transporteurs membranaires qui permettent l'entrée et la sortie du Cu au niveau de la cellule et des organites tandis que les chaperonnes sont impliquées dans l'assignation et l'insertion du Cu en tant que cofacteur au niveau du site actif des protéines cibles (Hall et Williams, 2003).

III.2.b. Stockage et la séquestration

La séquestration consiste à lier le cuivre libre à des phytochélatines ou des métallothionéines pour limiter ses dégâts oxydatifs dans la plante puis à le bloquer dans les cellules en les stockant dans la vacuole ou dans des organes spécialisés (Clemens, 2001). La production de phytochélatines et de métallothionéines augmente en cas d'exposition à une teneur élevée en cuivre.

Au niveau des feuilles, le cuivre s'accumule surtout dans l'épiderme des feuilles afin de protéger le tissu mésophile des feuilles. Mais, il y a également une augmentation de la production de polyamines dans les parties aériennes, et d'acides aminés libres dans les 2 compartiments aériens et racinaires, pour produire des enzymes limitant les dommages oxydatifs (séquestration).

III.2.c. La chélation et la compartimentation cellulaire

✚ La chélation

Parmi les processus de tolérance envers Cu, la chélation de Cu dans le milieu externe via l'exsudation racinaire de ligands organiques susceptibles de complexer les ions Cu^{2+} permet de diminuer sa biodisponibilité. Pour limiter les entrées dans la cellule, les plantes peuvent fixer le Cu au niveau de la paroi cellulaire, où le Cu est lié aux pectines et glycoprotéines de la paroi (Benouis S, 2012).

✚ La compartimentation cellulaire

Une des hypothèses les plus fréquentes pouvant expliquer le phénomène de tolérance serait attribuée à la compartimentation accrue des métaux lourds sous forme ionique dans la vacuole, grâce à plusieurs familles de transporteurs protéiques. Par exemple, un transporteur tonoplastique appartenant à la famille des protéines GTP a été identifié chez un écotype de *Silene vulgaris* tolérant au zinc. Le transport de zinc sous forme ionique dans les vacuoles dépend de la présence de magnésium et de GTP et permet la détoxification du zinc plus rapidement que chez l'écotype sensible (Chardonnens et al., 1999).

Chapitre I : Généralité sur le cuivre et leur effet sur les plantes

Chez *Rauvolfia serpentina*, le cadmium forme, avec les phytochélatines, des complexes de faible masse moléculaire (Low Molecular Weight (LMW)), qui s'agrègent les uns aux autres par des ponts sulfures pour former des complexes de masse moléculaire élevée (High Molecular Weight (HMW)). Les HMW pourraient alors être transportés par un complexe protéique spécifique dans la vacuole. Le pH vacuolaire provoquerait alors la dissociation du complexe, et les ions seraient pris en charge par les acides organiques présents, tels que le malate, le citrate ou encore l'oxalate (Sanita di Toppi et Gabbrielli, 1999).

Chapitre II : Généralité sur les plantes Aromatique et Médicinales

I. Généralité

De nos jours, entre 20.000 et 25.000 plantes sont utilisées dans la pharmacopée humaine. 75% des médicaments ont une origine végétale et 25% d'entre eux contiennent au moins une molécule active d'origine végétale. Les extractions de différents produits se font sous différentes formes dont les plus importantes sont: les tisanes, la gélule de la plante, les suspensions intégrales de plantes fraîches, les teintures mères, les macérât glycélinés et les huiles essentielle (**Rausch et Lotz, 2010**).

Il est difficile de distinguer une plante médicinale d'une plante aromatique: la première est utilisée à des fins médicales, la seconde uniquement en cuisine à des fins de goûts et odeurs, sans tenir compte de ses effets positifs sur la préparation culinaire. Certaines plantes aromatique sont une double fonction utilisée en phytothérapie, leurs produits chimiques agissent sur le corps humain exactement de la même manière que les médicaments, parfois résumée sous l'appellation d'alicament. Les plantes médicinales, également des plantes aromatiques et des champignons, s'utilisent aussi sous des formes d'huile, vinaigre et miel étant issus des plantes, ont de bonnes propriétés à exploiter en alimentation (**Polese, 2006**).

I.1. Rappel Historique sur les plantes aromatique est médicinale

Depuis longtemps, les plantes aromatiques et médicinales ont été utilisées pour la préparation des remèdes thérapeutiques (**Meftah, 2003**). D'après l'organisation mondiale de la santé (**2002**), en Chine, 40% environ de l'ensemble des soins de la santé relèvent de la médecine traditionnelle utilisée pour traiter ou prévenir les maladies chroniques.

Au 5^{ème} siècle, Hippocrate, père de la médecine occidentale, est connu par son utilisation de ces plantes pour les traitements thérapeutiques et l'explicitation de leurs performances multiples. Ses données ont été publiée en 280 avant J.-C. dans le Corpus Hippocrate qui traite d'environ 250 "simples" (**Fouche et al, 2000**).

Au 8^{ème} et 9^{ème} siècle, les arabes avaient aussi leurs spécialistes en médecine et en pharmacie. 'IBN SINA' ou Avicenne fut l'un des grands médecins dans son époque qui a produit la première huile essentielle pure, une huile essentielle de roses. Avicenne écrit le 'Canon de la médecine' et d'autres ouvrages médicaux dans lesquels il fait une large place aux huiles essentielles (**Mohammedi, 2006**).

Les plantes, au 18^{ème} siècle, acquièrent leurs identités telles qu'on les connaît aujourd'hui, à savoir un double nom latin indiquant le genre et l'espèce. A l'époque contemporaine (19^{ème} et 20^{ème} siècle), les plantes sont analysées chimiquement et leurs activités biologiques sont démontrées (**Mohammedi, 2006**).

I.1.a. Définition des plantes aromatiques et médicinales

✚ **Les plantes aromatiques** : sont définies comme étant des espèces ayant une odeur agréable et non toxique. Elles appartiennent à la fois au domaine des plantes médicinales et des matières premières industrielles d'origine végétale, et constituent des sources de substances naturelles complexes, destinées à apporter des caractères organoleptiques particulier aux aliments (Anton et al., 2005).

✚ **Les plantes médicinales** : sont des drogues végétales dont au moins une partie possède des propriétés médicamenteuses (Omar et Mohammed El haykle, 1993). Elles sont impliquées dans différents secteurs sous formes de principes actifs, des huiles, des extraits, des solutions aqueuses ou organiques (Iserin, 1996). Elle contient, au niveau de ses organes, un ou plusieurs principes actifs utilisables à des fines thérapeutiques (Omar et Mohammed El haykle, 1993).

I.1.b. Réglementation

Les plantes médicinales sont soumises à une réglementation et un enregistrement en tant que phytomédicament qui englobe, les matières végétales, les plantes, les préparations et les produits finis à base de plantes. Parmi les exigences utilisées dans les systèmes de réglementation internationaux, on peut citer la description dans une monographie de pharmacopée avec la dénomination internationale, l'état de prescription, la revendication d'un effet thérapeutique, les ingrédients ou les substances prévues ou réglementés et les périodes d'utilisation (Dutertre, 2011).

I.2. Domaine d'application du plantes aromatiques et médicinales

Les grands types des plantes aromatiques et médicinales utiles à l'homme peuvent être définis par leur principal usage. On peut citer:

I.2.a. En alimentaire

Différentes espèces médicinales sont utilisées comme épices pour aromatiser et augmenter la durée de vie des aliments. En effet, ces espèces contiennent des huiles essentielles dotées d'activités antimicrobiennes intéressantes et peuvent servir d'agents de conservation alimentaires (Mohammadi, 2006).

I.2.b. En cosmétologie

Les plantes aromatiques sont utilisées dans la formulation des produits de beauté. Les huiles essentielles de la lavande (*Lavandula officinalis*) sont utilisées dans les préparations pour bains calmants ou relaxants (Bruneton, 1993).

I.2.c. En médecine

Certaines plantes sont utilisées pour le traitement des troubles nerveux et des troubles liés au stress telles que *Angélica archangélica* et *Valérian aofficialis*(**Legrand, 1994**).

Les plantes aromatiques et médicinales ont une valeur thérapeutique importante et l'intérêt de ces plantes ne cesse de grandir. Exemple : *Foeniculum vulgare* est utilisée pour le remède des douleurs abdominales et les graines de cette espèce sont utilisées pour la production d'un médicament pour soigner les troubles digestifs (**Iserin, 1997**).

I.3. Typologie et les critères de classification des plantes aromatiques et médicinales

Plusieurs critères peuvent être utilisés individuellement et/ou combinés pour classer les plantes aromatiques et médicinales. L'adoption d'une classification ou d'une autre dépend de l'objectif recherché. **D'après Yazbek (2013)**, les principaux critères de classification utilisés sont :

I.3.a. Critères botaniques

C'est une classification qui obéit à des critères scientifiques. Chaque plante appartient à une famille bien définie, dotée de caractéristiques spécifiques qui la distinguent de toute autre plante d'une autre famille ou de la même famille.

I.3.b. Critères d'utilisation médicinale

Les plantes aromatiques et médicinales peuvent être classées selon leur usage médical. Dans ce cas une même plante peut prévenir, soulager ou guérir plus qu'une seule maladie.

I.3.c. Critère d'utilisation humaine/animale

Les plantes aromatiques et médicinales peuvent être utilisées soit exclusivement pour l'homme, soit exclusivement pour les animaux. Certaines plantes sont utilisées aussi bien pour l'homme que pour l'animal en tant qu'aliment et/ou à des fins thérapeutiques.

I.3.d. Classification selon le mode d'utilisation

La classification des plantes aromatiques et médicinales peut être faite sur la base des parties utilisées de la plante. Les racines, les tiges, les feuilles et les fleurs peuvent être des critères de distinction entre les différentes plantes aromatiques et médicinales. Les modalités d'utilisation de ces différentes parties de la plante peuvent permettre de spécifier et de classer les plantes aromatiques et médicinales. Ces différentes parties peuvent être utilisées à l'état naturel, séché, broyé, extrait, bouilli en infusion. L'utilisation combinée est également fréquente.

I.3.e. Classification selon le milieu l'origine de la plante (naturel ou culture)

Les plantes aromatiques et médicinales peuvent être spontanées ou cultivées. C'est la classification la plus simple et la plus utilisée bien que certaines espèces spontanées ont été domestiquées à des fins agricoles et sont devenues des espèces cultivées.

I.3.f. Selon la valeur économique

Si on considère les opportunités et la rentabilité économique, on peut classer les plantes aromatiques et médicinales selon leur contribution à l'économie nationale, régionale et locale et selon leur contribution à l'amélioration des indicateurs macro-économiques, particulièrement, l'amélioration de l'équilibre de la balance commerciale.

I.3.g. Classification administrative/douanière

Cette classification facilite les échanges internationaux et permet d'analyser, de façon exhaustive, les plantes aromatiques et médicinales et dérivés qui contribuent à l'équilibre de la balance commerciale. Cette classification est utilisée dans les revues des statistiques officielles.

I.4. Intérêt de l'étude des plantes médicinales

La plupart des espèces végétales contiennent des substances qui peuvent agir, à un niveau ou un autre, sur l'organisme humain et animal. On les utilise aussi bien en médecine classique qu'en phytothérapie. Elles présentent en effet des avantages dont les médicaments sont souvent dépourvus (**Verdrager, 1978**). La raison fondamentale est que les principes actifs végétaux proviennent de processus biotiques répandus dans tout le monde vivant, alors que l'essentiel des médicaments de synthèse sont des xénobiotiques aux effets secondaires très mal maîtrisés

Les plantes médicinales sont donc importantes pour la recherche pharmaceutique et l'élaboration des médicaments, directement comme agents thérapeutiques, mais aussi comme matière première pour la synthèse des médicaments ou comme modèle pour les composés pharmaceutique actifs (**Iserin, 2001**).

La tubocurarine, le relaxant musculaire le plus puissant dérive du curane (**Chondroendron tomentosum**). La morphine, alcaloïde caractéristique des papavers (**Papaver somniferum**) est l'analgésique le plus puissant, utilisé dans la chirurgie lourde et la thérapie anticancéreuse. Il est difficile d'imaginer le monde sans la quinine (dérivée du genre *Cinchona*) qui est un alcaloïde anti malarique, sans la dioxine (du genre *Digitalis*) qui est cardiotonique, ou encore l'éphédrine (du genre *Ephédra*) que l'on retrouve dans de nombreuses prescriptions contre le rhume stimule l'automatisme cardiaque, elle est bronchodilatatrice et stimulante du centre respiratoire bulbaire (**Verdrager, 1978**).

Les plantes aromatiques constituent une catégorie à part, par le fait qu'elles élaborent des substances volatiles, odorantes, caractéristiques appelées huiles essentielles. Ces plantes, connus depuis l'antiquité, sont généralement utilisées en médecine traditionnelle comme agents antibactériens, antifongiques et antioxydant (**Bruneton, 1999**).

I.4.a. Les avantages des plantes médicinales

Généralement, les plantes médicinales d'usage courant ne provoquent que très peu, voire aucun effet indésirable : c'est l'un de leurs principaux avantages. De plus, l'action synergique des divers constituants commence à être mieux comprise et acceptée scientifiquement (**Decaux, 2002**) contrairement à certaines croyances populaires, plusieurs plantes ont des effets pratiquement immédiats sur le métabolisme (**Pinto et al, 2003**).

Par contre, les médicaments de synthèses ont souvent une action plus directe et plus spectaculaire puisqu'ils sont formulés pour être immédiatement assimilés par l'organisme. Il est également plus facile de s'assurer de leur composition exacte, de leurs conditions de conservation (**Simon et Mills, 2001**).

I.4.b. Les inconvénients des plantes médicinales

Certaines plantes sont inoffensives, mais d'autre, comme de nombreuses espèces (digitale, belladone, colchique, etc...), sont toxiques et ne sont utilisées sous des formes bien contrôlées, exclusivement commercialisées en pharmacie. L'emploi inconsidéré de plantes cueillies dans la nature peut aboutir à des intoxications graves et mortelles (**Williamson, 2001**).

I.4.c. Action des plantes médicinales

D'après **Ministère de l'agriculture et du Développement Rural, (2005)**, la plupart désespères végétales qui poussent dans le monde entier possèdent des vertus thérapeutiques, car elles contiennent des principes actifs qui agissent directement sur l'organisme. On les utilise aussi bien en médecine classique qu'en phytothérapie: elles présentent en effet des avantages dont les médicaments sont souvent dépourvus.

Aujourd'hui, les traitements à base de plantes reviennent au premier plan, car l'efficacité des médicaments tels que les antibiotiques (considérés comme la solution quasi universelle aux infections graves) décroît. Les bactéries et les virus se sont peu à peu adaptés aux médicaments et leur résistent de plus en plus.

Malgré les énormes progrès réalisés par la médecine moderne, la phytothérapie offre de multiples avantages. N'oublions pas que de tout temps, à l'exception de ces cent dernières années, les hommes n'ont eu que les plantes pour se soigner, qu'il s'agisse de maladies

bénignes, rhume ou toux, l'ulcère, la migraine, ou plus sérieuses, telles que la tuberculose ou la malaria.

L'action de la phytothérapie sur l'organisme dépend de la composition des plantes. Depuis le 20^{ème} siècle, au cours duquel des savants ont commencé à extraire et à isoler les substances chimiques qu'elles contiennent, on considère les plantes et leurs effets en fonction de leurs principes actifs. La recherche des principes actifs extraits des plantes est d'une importance capitale car elle a permis la mise au point de médicaments essentiels.

Les plantes sont de plus en plus utilisées par l'industrie pharmaceutique. Il est difficile d'imaginer le monde sans la quinine (dérivée du genre *Cinchona*), qui est employée contre la malaria, sans la digoxine (du genre *Digitalis*), qui soigne le cœur, ou encore l'éphédrine (du genre *Ephédra*), que l'on retrouve dans de nombreuses prescriptions contre les rhumes.

Ces trois plantes ainsi que beaucoup d'autres sont largement utilisées par la médecine classique.

I.5. Mode d'emploi des plantes médicinales

Certaines plantes contiennent des principes actifs qui peuvent être extrêmement puissants, d'autres sont toxiques à faible dose. Le fait que l'on n'utilise que des plantes ne signifie pas que cela est sans danger, la culture libre de certaines plantes est interdite dans certains pays, le cas le plus courant étant le pavot dont la culture est réglementée en France et destinée à la seule industrie pharmaceutique.

La pharmacologie reconnaît l'action bénéfique de certaines plantes et s'attache donc à extraire le principe actif de ces plantes. La consommation « brute » de la plante induit la consommation d'autres produits contenus dans la plante que le principe actif, ne permettant ainsi pas de connaître la dose exacte de principe actif ingéré entraînant un risque de sous dosage ou de sur dosage ou de surdosage. Pour certains médecins phytothérapeutes, les autres principes vont atténuer les effets secondaires en entrant en interaction.

La composition d'une plante peut varier d'un spécimen à l'autre, dépendant du terrain, des conditions de croissance, humidité, température, ensoleillement, qui vont déterminer ce que l'on appelle en aromathérapie le hémotype.

De même, il ne faut pas utiliser des plantes d'origine douteuse, puisque les facteurs de pollution, la cueillette et les méthodes de conservation, de stockage... Peuvent altérer les propriétés des plantes.

Les plantes aromatiques et médicinales connues par leurs propriétés biologiques intéressantes sont utilisées dans divers domaines à savoir en médecine, en pharmacie, en cosmétologie et en agriculture.

Les activités biologiques des plantes aromatiques et médicinales sont connues depuis l'antiquité. Toutefois, il aura fallu attendre le début du 20^{ème} siècle pour que les scientifiques commencent à s'y intéresser. Ces propriétés sont dues essentiellement à la fraction d'huile essentielle et aux composés phénoliques contenues dans les plantes.

I.5.a. Activité antimicrobienne: les huiles essentielles possèdent des propriétés antimicrobiennes intéressantes et luttent contre les maladies infectieuses d'origine bactérienne et fongique (**Billerbeck, 2007**).

I.5.b. Activité antifongique: Des huiles essentielles peuvent être dues à la présence des terpènes qui causent la rupture des membranes fongiques et inhibent le développement des champignons. Les huiles essentielles permettent également la protection contre les champignons phytopathogènes et les microorganismes envahissant les denrées alimentaires (**Zambonelli et al. 2004**).

I.5.c. Activité antioxydant: L'activité antioxydant des huiles essentielles est attribuée acertainas alcools, éthers, cétones et aldéhydes monoterpéniques (**Edris, 2003**).

I.5.d. Activité antiviral: Les huiles essentielles riches en phénols ont montré une activité antivirale contre certains virus notamment **l'Herpes simplex** (**Girard, 2010**).

I.5.e. Activité neurale: les huiles essentielles possèdent une action sédative et agissent sur le système nerveux central en stimulant ou en inhibant le système sympathique ou parasympathique. Elles permettent ainsi la régulation de système nerveux périphérique. (**Girard, 2010**).

I.6. Les formes d'utilisation des plantes médicinales

Il existe plusieurs formes d'utilisation des plantes dont les plus connues sont :

- Les tisanes
- Les poudres
- Les extraits (teintures, suspensions intégrales de plantes fraîches...)
- Les gélules
- Les comprimés
- Les pommades

- Les huiles essentielles (substances volatiles obtenues le plus souvent par entraînement à la vapeur d'eau), (Ghabrier, 2010)

I.7. Les éléments actifs des plantes médicinales

Les effets curatifs de certaines plantes sont très connus. Ce n'est que récemment que les éléments actifs à l'origine des actions thérapeutiques des plantes ont été isolés et étudiés. Il est indispensable de connaître la composition des plantes pour comprendre comment elles agissent sur l'organisme. D'après **Encyclopédie des Plantes Médicinales 2009**, les éléments actifs des plantes médicinales

✚ **Le mucilage** : des nombreuses plantes contiennent du mucilage. Cette substance visqueuse se compose de molécules de sucre, les polysaccharides, qui absorbent l'eau, donnant une masse gluante semblable à de la gelée. Le mucilage garnit les muqueuses du tube digestif, les protégeant des irritations, des attaques acides et des inflammations. Cette action protectrice s'étend à d'autres muqueuses, celles de la gorge, des poumons, des reins et des conduits urinaires.

✚ **Les phénols** : dans ce groupe, on trouve l'acide salicylique, précurseur naturel de l'aspirine. Cet acide est présent dans la gaulthérie (**Gaultheria procumbens**) ou le saule blanc (**Salix alba**), mais aussi le thymol, un des principes actifs du thym (**Thymus vulgaris**). Les phénols sont antiseptiques et réduisent les inflammations lorsqu'ils sont ingérés, alors qu'ils produisent, au contraire, un effet irritant lorsqu'on les applique sur la peau.

✚ **Les tanins** : toutes les plantes produisent plus ou moins de tanin. Il donne un goût amer à l'écorce ou aux feuilles et les rend impropres à la consommation pour les insectes ou le bétail. Les tanins contractent les tissus, d'où leur emploi pour «tanner» le cuir. Ils rapprochent les tissus et augmentent la résistance aux infections.

✚ **Les coumarines** : les coumarines sont des substances odorantes présentes dans de nombreuses plantes et aux actions variables. Celle du mélilot (**Melilotus officinalis**) fluidifie le sang et un puissant relaxant musculaire.

✚ **Les flavonoïdes** : les flavonoïdes, présents dans de nombreuses plantes, sont des anti-inflammatoires qui assurent une bonne circulation. La rutine, présente dans plusieurs plantes, dont le et le citron (**Citrus limon**), renforce les parois des vaisseaux capillaires.

✚ **Les anthocyaniques** : ces pigments donnent aux fleurs ou aux fruits une teinte bleutée, rouge ou pourpre et maintiennent en bon état les vaisseaux sanguins.

✚ **Les glucosinolates** : présents uniquement dans les espèces de la famille des moutardes, les glucosinolates provoquent un effet irritant sur la peau (formation d'ampoules). Appliqués comme cataplasme sur les articulations douloureuses, ils augmentent le flux du sang dans les zones irritées, favorisant ainsi l'évacuation des déchets. Les glucosinolates contribuent également à ralentir la thyroïde. Le radis (*Raphanus sativus*) et la moutarde (*Sinapis alba*) sont riches en glucosinolates.

✚ **Les huiles essentielles**: les huiles essentielles extraites des plantes par distillation comptent parmi les plus importants principes actifs des plantes. Ainsi, la plupart ayant des effets antiseptiques. D'autres huiles essentielles contiennent des agents anti-inflammatoires.

✚ **Les saponines** : les saponines se divisent en triterpénoïdes et en stéroïdes. Ces derniers doivent leur nom à leur similarité avec les hormones stéroïdes naturelles de l'homme. C'est pourquoi des plantes contenant des saponines stéroïdales ont une certaine activité hormonale les triterpénoïdes présentes dans les racines de primevère (*Primula veris*) sont de puissants expectorants, mais peuvent également faciliter l'absorption des éléments nutritifs.

✚ **Les glucosides cardiaques**: présents dans de nombreuses plantes médicinales, telles que les digitales pourpre et jaune les glucosides cardiaques comme les digitoxines, la digoxine et la gitoxine ont une action puissante et directe sur le cœur. Ils l'aident à maintenir le rythme cardiaque en cas d'affaiblissement. Ces glucosides sont également diurétiques.

✚ Ils contribuent à transférer les liquides des tissus et du système circulatoire vers les conduits urinaires, réduisant ainsi la pression artérielle.

✚ **Les glucosides cyanogènes**: bien que ces substances soient à base de cyanure, un poison très violent, elles ont, prises en petites doses, un effet sédatif et relaxant sur le cœur et les muscles. L'écorce du cerisier tardif et les feuilles du sureau noir qui en contiennent, permettent de supprimer ou de calmer les toux sèches et irritantes.

✚ **Les vitamines**: certaines plantes sont particulièrement riches en vitamines. La plupart des plantes médicinales contiennent au moins quelques vitamines, qui, quelle que soit leur quantité, assurent la ration quotidienne.

✚ **Les amers**: les amers forment un groupe très diversifié de composants dont le point commun est l'amertume de leur goût. Cette amertume stimule les sécrétions des glandes salivaires et des organes digestifs. Ces sécrétions augmentent l'appétit et améliorent la digestion et l'absorption des éléments nutritifs les plus adaptés, le corps est mieux nourri et entretenu.

✚ **Les alcaloïdes:** formant un groupe très large, les alcaloïdes possèdent presque tous une molécule azotée (NH₂) qui les rend pharmaceutiquement très actifs. Certains sont des médicaments connus qui ont des vertus thérapeutiques avérées qu'on utilise dans certains cancers. D'autres alcaloïdes, comme l'atropine ont une action directe sur le corps, réduisant les spasmes et soulageant la douleur.

✚ **Les minéraux :** certaines plantes sont particulièrement riches en minéraux, il aide le corps à le conserver. Ces plantes agissent comme compléments minéraux, qu'elles soient prises entières ou partiellement.

II. Les plantes aromatiques et médicinales produites et consommées en Algérie

Avec une superficie de 2 381 741 km, l'Algérie est le plus grand pays riverain de la Méditerranée. Il est reconnu par sa diversité variétale en plantes médicinales et aromatiques, ainsi que leurs diverses utilisations populaires dans l'ensemble des terroirs du pays. Ce sont des savoir-faire ancestraux transmis de génération en génération chez les populations, le plus souvent rurales. C'est un héritage familial oral, dominant en particulier chez les femmes âgées et illettrées. (FAO, 2012).

En 2011, environ 33 stères de plantes aromatiques de différentes espèces (romarin, myrte, etc.) ont été extraits en Algérie, alors que la production pour l'année 2010 était de 735.5 stères et pour l'année 2009 de 23 stères (**tableau 3**). Ces chiffres en apparence assez faibles au regard du potentiel de l'Algérie semblent être confirmés par des données concernant les importations et exportations algériennes (FAO, 2012).

Tableau 3 : Evolution de la production algérienne en plantes aromatiques (Source : Ministère de l'Agriculture, 2015).

Période	Quantité en stères
2007	1 000.0
2008	2.0
2009	23.0
2010	735.5
2011	33

Ces plantes sont, le plus souvent, de nature spontanée (sauvages) ce qui rend difficile leur quantification, les plus importantes d'entre elles sont le thym, le romarin, le caroubier, l'origan et les feuilles de laurier, l'armoise, le myrte, la menthe pouliot, etc.

Chapitre II : Généralité sur les plantes Aromatique et Médicinales

Selon **Mokkedem (2004)** les plantes médicinales et aromatiques les plus demandées par l'herboristerie sont représentées dans le **tableau 4**.

Tableau 4 : Principales plantes consommées en Algérie. (Source: Données de l'enquête, 2015).

Espèces	Noms scientifiques	Parties utilisées	Importance
Fenugrec	<i>Trigonella foenum graecum</i> L.	Graines	+++
Verveine	<i>Verbena citriodora</i> HB et K	Feuilles	+++
Réglisse	<i>Glycyrrhiza glabra</i> L.	Racines	++
Romarin	<i>Rosmarinus officinalis</i> L.	Sommités fleuries	++
Thym	<i>Thymus vulgaris</i>	Sommités fleuries	++
Bigaradier	<i>Citrus bigaradia</i> . Duham	Feuilles et fleurs	++
Armoise blanche	<i>Artemisia herba-alba</i> Asso.	Sommités fleuries	+++
Sauge	<i>Salvia officinalis</i> L.	Sommités fleuries	++
Lavande	<i>Lavandula officinalis</i> L.	Fleurs	++
Myrte	<i>Myrtus communis</i> L.	Feuilles et fruits	++
Basilic	<i>Ocimum basilicum</i> L.	Sommités fleuries	+
Menthe verte	<i>Mentha veridis</i> L.	Feuilles	+++
Menthe pouliot	<i>Mentha pulegium</i> L.	Sommités fleuries	++
Thym serpolet	<i>Thymus serpillum</i> L.	Sommités fleuries	++
Pétale de rose	<i>Rosa canina</i> L.	Pétales et fruits	+
Camomille	<i>Matricaria camomilla</i> L.	Fleurs	++
Nigelle	<i>Nigella sativa</i> L.	Graines	+++
Anis vert	<i>Pimpinella anisum</i> L.	Graines	++
Rue	<i>Ruta montana</i> L.	Feuilles	++
Cumin	<i>Cuminum cyminum</i> L.	Graines	+++

Concernant la production nationale en plante aromatiques et médicinales, les seules données statistiques détaillées qui nous ont été délivrées par les deux organismes étatiques les plus influents dans ce secteur (Direction Générale des Forêts et le Ministère de l'Agriculture), font état d'une production ou de superficies de:

- 2 millions d'ha d'Alfa pour une production annuelle de 210 tonnes,
- 3 millions d'ha d'armoise pour un rendement annuel d'1 tonne/ha en 2000 et la quasi - disparition de cette plante en 2010,

- 219 000 ha de genévrier,
- 124 000 ha de thuya,
- 43 235 ha d'eucalyptus,
- 82 100 ha de caroubier pour une production annuelle de 3 136 tonnes en 2012,
- 32 909 ha de cèdre de l'Atlas, utilisé principalement pour obtenir les huiles essentielles.

Néanmoins, ces chiffres doivent être pris avec précaution car l'estimation des superficies des plantes spontanées est délicate et difficile à recenser, d'autant plus que la filière est non structurée et mal organisée. (Hélène et *al.*, 2016).

II.1. Les plantes aromatiques et médicinales dans le monde :

La reconnaissance de la valeur Clinique, pharmaceutique et économique des médicaments à base de plantes continue de croître, bien que celle-ci varie fortement selon les pays. Chaque pays définit de différentes manières les plantes médicinales simples ainsi que les produits qui en sont tirés et aussi il ya des pays qui importer et exporter des produits pharmaceutiques (tableaux !). Ainsi, les pays ont adopté plusieurs approches pour l'octroi de licences, la préparation, la fabrication et la commercialisation en vue d'assurer leur innocuité, leur qualité et leur efficacité.

La croissance de l'industrie pharmaceutique et le développement incessant de nouveaux produits médicaux synthétiques et biologiques plus efficaces n'ont pas réduit l'importance de l'utilisation des plantes médicinales. Au contraire, la croissance démographique dans le monde en développement et l'intérêt croissant manifesté au niveau des nations industrialisées ont considérablement augmenté la demande spécifique aux PAM et à leurs produits dérivés.

Les plantes médicinales et aromatiques sont présentées dans une grande variété d'articles sur le marché. Au moins une plante à fleurs sur quatre a été incluse.

La demande massive pour botaniques produits conduit à un grand international niveau à la locale commerciale niveau. Dans les années 90, les importations annuelles mondiales de plantes pharmaceutiques sont passées à 400 000 en moyenne. Internationale du commerce est contrôlée par seulement un peu les nations. Environ 80 pour cent des importations et des exportations mondiales sont attribués à 12 pays. (Tableau 5)

Chapitre II : Généralité sur les plantes Aromatique et Médicinales

Tableau 5: Les 12 principaux pays importateurs et exportateurs de produits pharmaceutiques au monde, plantes, selon les quantités et valeurs moyennes pour la période 1991-2000. **Source :**(UNCTAD COMTRADE data base, United Nations Statistics Division, New York.)

Pays d'importation	Quantité	Valeur [USD]	Pays d'exportation	Quantité	Valeur [USD]
Hong Kong	67000	291200000	China	147000	281800000
Japan	51350	136000000	Hong kong	63150	228800000
USA	49600	135500000	Indian	33900	56650000
Germany	45350	110200000	Germany	15100	70050000
Rep.korea	32250	52300000	Usa	13500	115500000
France	21350	52000000	Mexico	13000	11250000
China	13650	41600000	Egypt	11750	13850000
Italy	11700	42850000	Chile	11600	28200000
Pakistan	11050	11150000	Belgaria	10050	14500000
Spain	9100	27650000	Singapore	9600	56600000
United kingdom	7650	27000000	marocco	8000	13300000
Singapore	6300	506000000	Pakistan	7800	4950000
Total	326300	978150000	Total	344400	893400000

Avec la prédominance des pays tempérés asiatiques et européens .Bien que le Japon et la République de Corée La Chine et l' Inde sont les principaux pays manufacturiers du monde , avec Hong Kong, les États- Unis et l' Allemagne définissant eux - mêmes comme les principaux commerciaux centres.Jusqu'à présent, la culture des plantes médicinales largement été axé sur la nature de la collection.Cependant, l' utilisation et le commerce des

ressources végétales sauvages ne sont pas dangereux en eux-mêmes, cependant, par exemple, de plus en plus sélection commercial, largement non surveillé le commerce et l' habitat destruction suite à incomparable hausse la pression sur sauvages végétales populations.

Environ 9000 espèces des plantes médicinales sont menacées dans le monde entier. Les principes et les étapes de conservation qui doivent être discutés dans les futures structures d'approvisionnement et de conservation des espèces varient de la gestion des ressources, l'histoire, la transition du changement des pays utilisateurs vers les pays d'origine, la conservation des espèces et les restrictions commerciales ou même les interdictions commerciales.

II.2. Le séchage des plantes médicinales

Le séchage est un procédé qui sépare un liquide d'un solide, d'un semi-solide, voire d'un liquide par évaporation. Cette opération est endothermique et nécessite l'apport d'énergie thermique. Dans le cas de l'eau, il existe d'autres techniques pour la séparation que l'évaporation, telles la déshydratation à l'aide d'anhydres. Le traitement thermique n'est pas toujours possible, notamment lorsque le mélange contient des composés plus volatils que l'eau ou en cas de mélange azéotropique, ou souhaitable comme lorsqu'un des composés est sensible à la chaleur. **(Roquebert, 1997)**.

II.2.a. Principe de séchage

Le séchage implique 2 types de transfert :

- Le transfert d'énergie thermique, de l'environnement vers le liquide à évaporer.
- Le transfert de masse, de l'intérieur du solide vers sa surface et ensuite le passage en phase gazeuse. La vitesse du séchage est directement liée à ces 2 transferts **(Cruz, 1988)**.

Le séchage peut être décomposé en 3 étapes:

- **1^{er} étape:** la vitesse de séchage est constante et le liquide situé en surface du solide est évaporé. Pour cette phase, seules les conditions externes (surface de contact, pression partielle du liquide, température, volatilité du liquide) ont une influence primordiale. Le transfert thermique s'effectue entre la phase gazeuse et la surface liquide et le transfert massique se fait de la même manière, mais dans l'autre sens.
- **2^{ème} étape:** la vitesse diminue avec le temps, car la quantité de liquide a diminué à tel point que des zones sèches apparaissent à la surface du solide. Comme le transfert de masse et thermique ont lieu via la surface de contact gaz-liquide et que cette dernière diminue, la vitesse diminue de manière proportionnelle.

3^{ème} étape: la vitesse de séchage diminue encore avec le temps, car la surface du solide est sèche et le liquide doit migrer de l'intérieur du solide jusqu'à sa surface. La chaleur passe par la surface du solide et est conduite par le solide jusqu'à liquide situé dans les interstices. La force motrice limitant est en générale la conduction thermique par le solide (Roquebert1997).

II.2.b. Méthode de séchage des plantes :

L'eau n'étant répartie de la même façon ni dans les mêmes proportions dans les divers organes de la plante.

- Les racines et les rhizomes, débarrassés de leurs parties abîmées, lavées avec un soin méticuleux, seront épongés, puis coupés en tranches, en lanières ou fendus suivant leur dimension. Ils seront mis à sécher au soleil ou au four.
- Les tiges, les écorces et le bois sécheront au soleil, à l'air libre et sec, ou encore au four doux.
- Les fleurs et les sommités fleuries sont assez difficiles à traiter (il en est de même de certaines feuilles). Il est important de conserve leur couleur, ce qui est assez délicat. Le mieux est de les déposer à l'ombre sur des claies à 20-25°C et en prenant la précaution de les recouvrir de papier gris, afin de préserver leur couleur.
- Les fruits charnus (airelle, baies de genévrier) seront sécher à l'air libre en remuant souvent (Cook et whipps, 1993)

II.2.C. Mode de séchage

Il existe plusieurs méthodes de séchage ou de conservation des végétaux. Certains végétaux se prêtent à un ou plusieurs modes de séchage qu'il convient d'expérimenter selon les moyens et les variétés disponibles.

-  **Séchage à l'air libre :** le séchage à l'air est le procédé le plus courant et le plus facile
-  **Séchage au soleil :** moyen économique, il est pratiqué dans les pays à climat chaud et pour les drogues peu fragiles. Il présente des inconvénients : les UV peuvent exercer un effet photochimique et altérer certains principes actifs. Par ailleurs, cette méthode n'est pas adaptée aux drogues à principes actifs volatils.
-  **Séchage à l'ombre et sous abri :** on étale les plantes sur des claies ou on les suspend en bouquets dans des hangars ou des séchoirs bien ventilés. La méthode, assez longue, reste artisanale.

✚ **Séchage par l'air chaud** : c'est le procédé le plus répandu, car il présente l'avantage d'être rapide, et permet d'opérer dans des conditions bien déterminées, variables selon les drogues. On dispose, le plus souvent, la dessiccation doit être terminée.

Parmi les autres procédés utilisés : on peut citer le séchage sous vide :

- A chaud, il est peu pratiqué
- A froid, c'est la cryodessiccation ou lyophilisation : c'est une dessiccation par sublimation directe de l'eau du végétal préalablement congelé. Intéressante pour les souches d'antibiotiques, elle est coûteuse et donne des résultats irréguliers pour les plantes médicinales.

✚ **Séchage aux micro-ondes** : le moyen le plus rapide de faire sécher les végétaux est le four à micro-ondes. Toutefois, il est bon de faire des essais préalables pour déterminer exactement le temps de séchage.

- Espacer les végétaux sur quatre serviettes en papier dans les micro-ondes.
 - Recouvrir de deux autres serviettes.
 - Passé les végétaux 1 minute à la micro-onde.
 - Vérifier le séchage.
 - Compter 2 à 5 minutes pour les feuilles et 2 à 3 minutes pour les pétales.
- Une fois le procédé mis au point, noter le temps de séchage à titre de référence.

✚ **Séchage au four** : le séchage des végétaux à four chaud fait quasiment appel à la même technique que le séchage aux micro-ondes.

- Disposer les végétaux sur une plaque allant au four.
- Régler le four sur feu doux. Enfourner la plaque et la porte du four entrouverte.
- Surveiller les végétaux régulièrement. La dessiccation peut prendre de quelques minutes à plusieurs heures, selon les végétaux sélectionnés (**Anonyme, 1997**).

II.3. Stockages et conservation des plantes médicinales séchées

Le stockage des plantes doit être réalisé dans un local aéré, sec, obscur à une température optimale entre 15 et 18 °C. Il est souvent nécessaire de désinfecter l'endroit. Les plantes doivent être renouvelées régulièrement sachant que d'une façon, les durées limites de bonne conservation sont les suivantes :

- ✓ Un à deux ans pour les fleurs, feuilles, sommités, parties fragiles de la plante. Environ 4 ans pour les racines, écorces, parties moins fragiles de la plante.

- ✓ Au cours d'un stockage prolongé, les méthodes et les conditions de conservation doivent permettre d'éviter toute modification de la nature des plantes, afin de préserver l'intégrité de leurs propriétés actives. La qualité des plantes aromatiques ou médicinales en dépend. C'est une étape importante dans la garantie des propriétés des plantes médicinales
- ✓ Toutes les drogues doivent être conservées au sec dans l'obscurité, dans des récipients bien fermés, passagèrement dans des boîtes en carton ou des sachets en papier.
- ✓ Eviter les emballages et les sachets en matière plastique à cause du risque de fermentation .
- ✓ La conservation en milieu étanche peut être utile pour les plantes qui s'oxydent rapidement ou qui contiennent des produits volatils (**Samson et Hoekstra, 1988**).

III. Problématiques et perspectives de promotion de la filière de plantes aromatiques et médicinales.

Selon le bureau FAO en Algérie ; la filière des plantes aromatiques et médicinales (PAM) est une filière très diversifiée, aussi bien au niveau de ses productions (plus de 150 espèces végétales et plus de 500 références produits) qu'au niveau des usages des produits : alimentaire, parfumerie (fonctionnelle et alcoolique), cosmétique, pharmaceutique, compléments alimentaires, vétérinaires. Les matières premières produites sont utilisées sous différentes formes: en frais, en sec, en surgelé et sous forme d'extraits (90 % des productions).

C'est une filière en fort développement : passage de 32 000 ha en 2000, à 38 000 ha en 2010 puis à 48 000 ha en 2015. Si plus d'une centaine d'espèces sont cultivées, il faut également prendre en compte les PAM issues de la cueillette qui connaissent aussi un développement exponentiel.

Les PAM représentent une part significative de superficies certifiées en agriculture biologique : 13 % en moyenne, soit 3 fois le taux national de l'agriculture française.

Cette filière a aussi la particularité d'avoir une forte identité territoriale : par exemple, les lavandes/lavandins et herbes de Provence pour le Sud-Est de la France, la gentiane et les plantes de cueillette pour le Massif Central, les plantes médicinales pour les Pays de Loire, le bourgeon de cassis pour la Bourgogne, les fleurs de Grasse. Mais on retrouve les PPAM sur l'ensemble du territoire métropolitain (91 départements). En outre, les PPAM ont un rôle dans

l'équilibre économique des régions de par leurs externalités positives : tourisme, production de miel, etc.

Le secteur des plantes à parfum se différencie assez fortement des secteurs des plantes aromatiques et des plantes médicinales : il représente une forte capacité de production et exporte massivement ses productions à l'échelle mondiale.

A l'inverse, les secteurs des plantes aromatiques et médicinales, même s'ils se développent, ne suffisent pas à approvisionner les marchés. Des importations importantes sont nécessaires pour satisfaire la demande (Alcimed, 2011).



Problématiques :

- Des coûts de production élevés.
- Des importations pour répondre à la demande
- Des moyens limités de protection des cultures, forts besoins en méthodes alternatives.
- Une réglementation (actuelle et à venir) de plus en plus contraignante : résidus de pesticides...



-Renouvellement des exploitants agricoles.

Perspectives :

Les perspectives actuelles des plantes médicinales et aromatiques sont de fournir une vision intellectuelle de la recherche scientifique sur les plantes médicinales et aromatiques pour enrichir les études.

Les perspectives sur les plantes médicinales et aromatiques comprennent :

-  Pratiques agricoles des PAM
-  Aromathérapie, phytothérapie et phytochimie Biodiversité
-  Conservation, gestion et utilisation durables des PAM
-  Législations sur les PAM
-  Commercialisation des PAM et des produits
-  Produits à base de plantes traditionnelles
-  Organisations non gouvernementales et à but non lucratif.

Chapitre III : Synthèse des travaux sur l'effet de cuivre sur les végétaux

Introduction

L'ensemble des résultats rapportés dans ce chapitre nous ont permis de mieux comprendre ce phénomène de pollution. Ainsi, les effets de certains métaux considérés comme oligoéléments (Cuivre) indispensables au bon fonctionnement des cycles vitaux de la plante.

Le cuivre est un des 7 oligo-éléments (Zn, Mn, Fe, B, Mo, Cl), indispensable à faible dose aux plantes. Au niveau du métabolisme de la plante, le cuivre joue un rôle important dans de multiples systèmes enzymatiques tels que la photosynthèse, la respiration, l'alimentation, la fertilité ou la détoxification. Le cuivre s'accumule surtout dans les racines à cause de sa forte affinité pour l'apoplasme racinaire (Marschner, 1995) ce qui explique en grande partie les teneurs élevées des racines en cuivre. Ainsi de 10 à 84 % du cuivre total dans les racines est du cuivre apoplasmique (Michaud *et al.*, 2007).

Le cuivre est un des constituants de protéines impliquées dans la photosynthèse comme les plastocyanine des chloroplastes. Son rôle de cofacteur dans le transport d'électrons du photosystème II est également primordial (Marschner, 1995). Il intervient dans la constitution de protéines engagées dans le processus de la respiration mitochondriale (cytochrome oxydase), des réactions d'oxydation de l'acide ascorbique (ascorbate oxydase) et de la détoxification de radicaux superoxydes (superoxyde dismutase) mais aussi de la synthèse de lignine de la paroi cellulaire (peroxydases et phénols oxydases), (Marschner, 1995). Le cuivre intervient dans le métabolisme et la distribution des hydrates de carbone, des lipides, de la réduction et de la fixation de l'azote (Marschner, 1995). Il intervient dans le contrôle hydrique en influençant la perméabilité à l'eau des vaisseaux xylèmes (Kabata Pendias, 2010). Il est intéressant de noter que le cuivre joue également un rôle dans le processus de coloration en jaune des fleurs (Nakayama *et al.*, 2000) et la production de graines.

Cependant, il devient inhibiteur de la croissance et d'autres processus physiologiques et biochimiques quand il est présent en concentration élevée (Wheeler et Power, 1995). Le seuil de tolérance est variable selon les espèces végétales et les organes cibles.

Dans le sol, un excès de cuivre provoque d'abord une rhizotoxicité qui s'exprime par une coloration brune des racines, une diminution de la formation des poils absorbants, une diminution de l'élongation racinaire (Kopittke et Menzies, 2006), un épaississement des racines (Panou-Filothéou et Bosabalidis, 2004) et la diminution de la biomasse racinaire (Bravin, 2008) avant d'affecter la croissance des parties aériennes (Marschner, 1995). Au niveau des parties aériennes, les symptômes observés sont des atteintes du feuillage telles que

des déformations, des décolorations jaunes internervaires caractéristiques des chloroses ferriques (Michaud *et al.*, 2007) induite par un excès de cuivre, des nécroses et une altération de développement de la vigne (Brun *et al.*, 1998). Dans les cas les plus graves cela peut conduire au nanisme (Marcellin, 1974) ou à la mort des souches.

I. Toxicité du cuivre chez la vigne

Dans le cas des vignes, ce sont surtout les conséquences indirectes d'un excès de cuivre comme la chlorose ferrique, qui sont observées. Les premiers signes de rhizotoxicité tels que le brunissement des racines, le renflement des extrémités des racines et une baisse du cheveu racinaire sont observables pour une contamination du substrat à 10 μM alors que la diminution de la biomasse des racines n'est significative qu'à partir d'une exposition au cuivre de 25 μM (Juang *et al.*, 2012). De même, la perturbation de la translocation du cuivre apparaît à partir d'une exposition à 10 μM par une augmentation de la concentration dans les tiges tandis que l'augmentation de la concentration dans les feuilles n'est mesurable qu'à partir d'une exposition à 25 μM lorsque les barrières membranaires ne fonctionnent plus correctement (Juang *et al.* 2012).

Il est intéressant de noter que l'étude réalisée par Laetitia Anatole-Monnier (2014) montre que les premiers symptômes induits par la contamination cuprique ont été observés non pas sur les racines mais sur les feuilles de la vigne. Une diminution significative de la croissance des jeunes feuilles a été observée. Les jeunes organes sont les premiers impactés par cette contamination. Le même auteur établit qu'une perturbation métabolique intervient en amont d'une modification morphologique lors d'une contamination cuprique. La modification de la composition en acides aminés de la sève semble être un des premiers mécanismes de réponse à la contamination cuprique avant la photosynthèse ou l'absorption du fer. Les symptômes de chlorose ferrique couramment observés lors d'une phytotoxicité cuprique n'apparaissent probablement que plus tardivement par rapport au début du stress cuprique subit par la plante.

II. Effets de cuivre sur le blé

Les résultats obtenus Azizi Nadia Nawel (2017) montrent que le pourcentage moyen de germination (PMG) augmente pour toutes les concentrations de trois éléments (Mg, Cu, Ca) alors que le cadmium (Cd) seul diminue le taux de germination de 50% à 48h pour atteindre un taux proche de celui des témoins. Parallèlement, le nombre moyen de racines, semble peu ou pas affecter par les traitements à base de (Cd et Cu). Aussi, la vitesse moyenne des racines mesurée à partir de la longueur moyenne des racines a été calculée, celle-ci semble subir plusieurs variations en fonction des traitements appliqués. En effet, la croissance des plantules de blé dur exposées à ces traitements provoquent des altérations morphologiques qui sont les premières observations indicatrices de stress. En effet, les concentrations de Cu (20 et 50 μM) inhibent la croissance racinaire (Azizi Nadia Nawel 2017). Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par Cuyper, (2000) qui montre que les plantes concentrent d'abord le Cu dans les racines et ce sont les organes qui subissent en premier les impacts du Cu et qui sont les plus atteints (Paschke et Redente 2002). La diminution de la croissance des racines a pour

conséquence celle de la surface de prélèvement de la plante et donc une diminution du prélèvement en eau et nutriments (Chen, et al., 2013).

Dharam et al, (2007) montrent que le % de germination, la longueur des radicules et le nombre de racines latérales diminuent avec l'augmentation de la concentration en cuivre (5, 25, 50 et 100 mg.l⁻¹). Les teneurs totales en chlorophylle, le poids frais, la teneur en humidité, les teneurs totales en protéines, les teneurs en sucre et l'activité de l'amylase ont été diminués au 14^e jour de poids frais avec l'augmentation de la concentration du traitement au cuivre. Cependant, les teneurs en caroténoïdes et l'activité catalase ont augmenté dans différents traitements par rapport au contrôle.

III. Effets de cuivre sur l'*Atriplex canescens*

Dahou (2019) Les analyses morpho physiologiques montrent une inhibition de l'élongation des tiges et des racines, les masses de matière fraîche et sèche de l'*Atriplex canescens*, par contre *Raphanus sativus* semble d'être moins affecté par le stress métallique, vu que la teneur relative en eau et l'élongation des parties aériennes augmentent. Les analyses biochimiques montrent une accumulation importante des sucres solubles, de proline et des antioxydants non enzymatiques (poly phénols totaux et flavonoïdes) en fonction de la concentration croissante des métaux lourds aux niveaux des parties aériennes et racinaires de l'*Atriplex canescens*, par contre l'accumulation des de la proline et des flavonoïdes diminue chez *Raphanus sativus* L. Soumis au stress métallique. Relativement à l'accumulation des métaux lourds dans différentes parties des plantes, les résultats obtenus par Rabhi Fatima(2019) montrent que l'accumulation et la translocation des métaux lourds Plomb, Cuivre et zinc augmente en fonction de l'augmentation de doses métalliques appliquées dans le sol chez l'*Atriplex canescens* et *Raphanus sativus* L.

Les résultats obtenus sont en faveur de l'implication de l'*Atriplex Canescens* et *Raphanus sativus*L.en un projet de phytoremediation pour dépolluer les sols contaminés par les métaux lourds.

IV. Effets de cuivre sur le l'orge

Ayed (2018) a montré que l'essai de la culture hydroponique, portant sur les paramètres morphologiques a permis d'observer l'effet négatif de cuivre sur la croissance des plantules de deux variétés de l'orge. Toutefois, le stress métallique a légèrement affecté le statut hydrique des plantes. Les deux variétés étudiées ont présenté un facteur de bioaccumulation, ce qui indique qu'il y a de grandes chances de contamination de l'orge par le cuivre et un risque de contamination animale ou humaine. La variété Manel a été la variété la plus sensible au cuivre et semble présenter un peu plus de risque pour le consommateur que Rihane.

V. Effets de cuivre sur le petit pois

Asma et al. (2004) ont rapportée que la vulnérabilité de la germination des graines de petit pois au stress par le cuivre ne peut pas être associée à une limitation dans l'approvisionnement en eau des graines, mais serait due, au moins, à un désordre nutritionnel consécutif à une défaillance dans le processus de mobilisation des réserves à partir des

cotylédons. Le cuivre provoque une importante diminution du pouvoir germinatif aussi bien une forte inhibition de l'élongation radriculaire après imbibition avec Cu (Asma et al., 2004).

VI. Effets de cuivre sur la lentille cultivée

D'autres travaux (Muhammad Zafar et al. 2018), indiquent que le taux de germination de *Lens culinaris* qui a montré qu'une augmentation de la concentration du traitement au cuivre à 25 ppm réduisait significativement le pourcentage de germination par rapport au témoin. La longueur des racines, la taille des plantules et le rapport racines / pousses, ont également diminué de manière significative avec le traitement du cuivre à 25 ppm par rapport au témoin. Le poids sec de *Lens culinaris* a progressivement diminué avec une augmentation de la concentration de cuivre. Les indices de tolérance et l'indice de vigueur des semis de *L. culinaris* ont également diminué avec l'augmentation de la concentration à 100 ppm. Un faible pourcentage de réduction des indices de tolérance et de l'indice de vigueur des semis de *Lens culinaris* a été enregistré à 25 ppm de traitement de cuivre par rapport au témoin (Muhammad Zafar et al., 2018).

VII. Effet de cuivre sur l'haricot

Les résultats rapportés par Jay et al, (2011) sur l'haricot, montrent une décroissance significative de la longueur des radicules avec l'augmentation de la concentration de cuivre (solution de sulfate de cuivre à 50, 200, 500 et 1000 μM). Selon cet auteur, l'effet de diverses solutions de sulfate de cuivre a un effet insignifiant sur le pourcentage de germination du haricot tandis que la concentration de protéines dans les parties aériennes et les racines de la plantule a été augmentée avec l'augmentation de la concentration de sulfate de cuivre par rapport au témoin. L'activité POD dans la racine a diminué à des niveaux plus élevés de concentration de cuivre tandis que l'activité POD dans la partie aérienne augmentait avec l'augmentation de la concentration.

IX. Effet de cuivre sur *Agropyrum elongatum*

Les résultats rejoignent ceux de Morteza et al, (2011) ont indiqué qu'il n'y avait pas de différences significatives entre le traitement par le cuivre et la vitesse de germination, mais la longueur des racines, la longueur des pousses et l'indice de vigueur ont été considérablement réduits par l'application de ce traitement. La longueur des racines a été passée de 6,3 cm dans le témoin à 4,1 cm avec une solution à 30 mg.L^{-1} Cu. La longueur des pousses a été réduite de 9,4 cm dans le contrôle à 5,6 cm à 30 mg.L^{-1} de solution de cuivre.

IX. Effet de cuivre sur la fève

Rechidi (2018), avait évoqué la nécessité de la présence à la fois de cuivre et zinc pour la germination des grains de la fève. Selon cet auteur, le taux de germination atteint les 100 % sous différentes concentrations croissantes pour le cuivre et zinc, plus élevé que celui du témoin (93,33%). Cela signifie que ces deux métaux ont un rôle physiologique important durant la phase de germination et que l'apport en doses élevées n'a pas affecté.

Lexmond et Vorm (1981) ont montré que l'application des niveaux élevés du cuivre inhibe la croissance des racines avant d'affecter la production de la biomasse aérienne. Cependant, ça ne signifie pas nécessairement que les racines sont plus sensibles à des concentrations

élevées du cuivre, 34,75 cm pour (100ppm), 22,5 cm pour (300ppm) et 18,78 cm pour (500ppm). Mais probablement, due en réalité que les racines sont dans un environnement où le cuivre est en excès (**Kammoun, 2018**). D'après Pahlsson (1989), le cuivre généralement atteint le développement racinaire par l'inhibition de la croissance.

Chez les plantes non-tolérantes, l'inhibition de l'élongation racinaire et le dommage des membranes cellulaires des racines sont les réponses immédiates vis-à-vis des niveaux élevés du cuivre (**Wainwright et Woolhouse, 1977**). **Lidon et Henriques (1992)** ont reporté que la toxicité du Cu, est exprimée par la taille réduite des racines, apparaît comme le résultat direct de l'accumulation du Cu en excès dans les tissus.

Les résultats obtenus par **Kammoun, (2018)** montrent que l'effet de cuivre diminue la teneur relative en eau dans les plantes stressées aux concentrations (100ppm), (300ppm) et (500ppm). Ces résultats sont conformes à ceux indiqués par (**Benouis, 2012**), il a observé une faible diminution des teneurs relative en eau en fonction de l'augmentation des doses de cuivre chez la fève. Plusieurs études ont mis en évidence une perturbation hydrique des plantes traitées aux métaux lourds. Elles ont principalement relevé une diminution de la transpiration et une diminution de la teneur en eau. En plus ces perturbations du statut hydrique conduisent à la fermeture des stomates qui va limiter les échanges gazeux avec l'atmosphère, et par conséquent les pertes d'eau par transpiration (**Azooz et al., 2011**).

Concernant les paramètres chimiques les résultats moyens obtenus par même auteur montrent que la plante de *Vicia faba* L. accumule des quantités importantes de la proline dans leurs feuilles, et surtout dans des fortes doses en Cuivre (100ppm), (300ppm) et (500ppm). Plusieurs études ont montrés que l'augmentation de la proline est due à une exposition au stress de Cuivre, chez *vicia faba* L. (**Aleksandra et al., 2013**), *Canavalia ensiformis*, et chez *Coffea arabica*, (**Andrade et al., 2010**).

X. Effet de cuivre sur les plantes aromatique et médicinales

De façon générale, les effets de cuivre sur la biologie et la physiologie des plantes médicinales et aromatiques sont encore peu étudiés.

L'effet des métaux lourds (Cd, Cu, Pb, Zn) sur la germination des graines et la croissance des racines chez *Pimpinella anisum* L. (anis), *Carum carvi* L. (carvi) et *Foeniculum vulgare* L. (fenouil) a été étudié. En effet, **Ekaterina et al, (2008)**, remarquent une forte diminution de la germination des graines et la croissance des racines par rapport au témoin dans les trois espèces testées sous l'effet de Cu et Zn. On contrario, le Cd à 6 mg / litre et Pb à 100 mg / litre a stimulé la germination des graines et la croissance des racines du carvi d'environ 20 pour cent par rapport au témoin.

Valtcho et al. (2006) trouvent les mêmes résultats pour menthe poivrée, de basilic et d'aneth. Ces auteurs montrent que le cuivre à 60 à 150 mg.L⁻¹ a réduit les rendements et la hauteur de l'aneth, le Cu à 150 mg.L⁻¹ a entraîné des symptômes de phytotoxicité et un retard de croissance. Les traitements testés ont légèrement modifié la composition chimique des huiles essentielles de basilic et d'aneth, et réduit la teneur en menthol de l'huile de menthe poivrée.

XI. Matériel et méthodes

Afin d'évaluer l'effet de cuivre sur la germination des plantes aromatiques et médicinales, une étude a été conduite au laboratoire dans des conditions contrôlées (température, humidité).

1 : Matériel végétal

Le matériel végétal a été apporté : Les graines de *L'Atriplex canescens* et la fève (*Vicia faba* L.)

2 . au laboratoire

Les différents essais expérimentaux effectués ont nécessité le matériel du laboratoire suivant :

- Balance analytiques
- Boîte de Pétri en verre et en plastique stériles
- L'eau distillée
- Pince
- Cuivre (CuSO_4)
- Flacon
- Papiers filtre

3 .méthodologie

Les graines de *L'Atriplex canescens* et la fève sont prises de façon aléatoire puis sont désinfectées par une solution d'eau oxygénée à 10% (v/v) pendant 15 min, rincées abondamment à l'eau distillée et mises à germer dans des boîtes de Pétri tapissées de papier filtre imbibé d'eau distillée. La germination est réalisée à l'obscurité et à température moyenne de $23 \pm 1^\circ\text{C}$. Les graines sont mises à germer dans des boîtes de Pétri pendant (48,72 et 96h) à une température moyenne de 23°C . Les résultats pour chaque boîte sont exprimés en pourcentage (%). Lors de notre travail, nous avons appliqué un traitement avec des concentrations croissantes de Cuivre à (10, 30 et 60, 80,100) mM. Trois répétitions sont réalisées pour chaque traitement et les résultats obtenus sont exprimés par la moyenne et les variétés non traitées représentent les témoins.

Après avoir retiré les graines des boîtes de Pétri, on mesure la longueur moyenne de chaque racine et tige (cm). Variation des teneurs en chlorophylles dans les feuilles et l'évolution des moyennes de la teneur relative en eau (%) en fonction de la dose de cuivre (ppm).

4. Résultats :

4.1. Paramètre biométrique

4.1.1. Effet du Cuivre (CuSO_4) La longueur des racines de fève (*Vicia faba* L.).

Cette (**figure 01**) compare le résultat obtenu par (**Derakauoui, 2017**) et (**Abdelsadok, 2018**) de la longueur de racine des plants de fève stressés par métaux lourds cuivre à différentes concentrations. Selon on note que longueur racinaire chez les plantes stressées par le traitement CuSO_4 avec les doses 100, 300, 500 ppm enregistre une diminution inversement proportionnelles avec les doses de CuSO_4 dans le milieu. Comparativement aux plantes témoins. En enregistrant comme moyenne 39,37 cm et 39 cm pour le plant témoins et aussi 22,25 cm, 18,78 cm pour (500 ppm) on remarque aussi que la longueur des racines varie d'une plante à une autre elle diminue avec l'augmentation des doses du Cuivre. À travers le traitement Statistique il est constaté qu'il existe une influence hautement significative du Cuivre la longueur des racines.

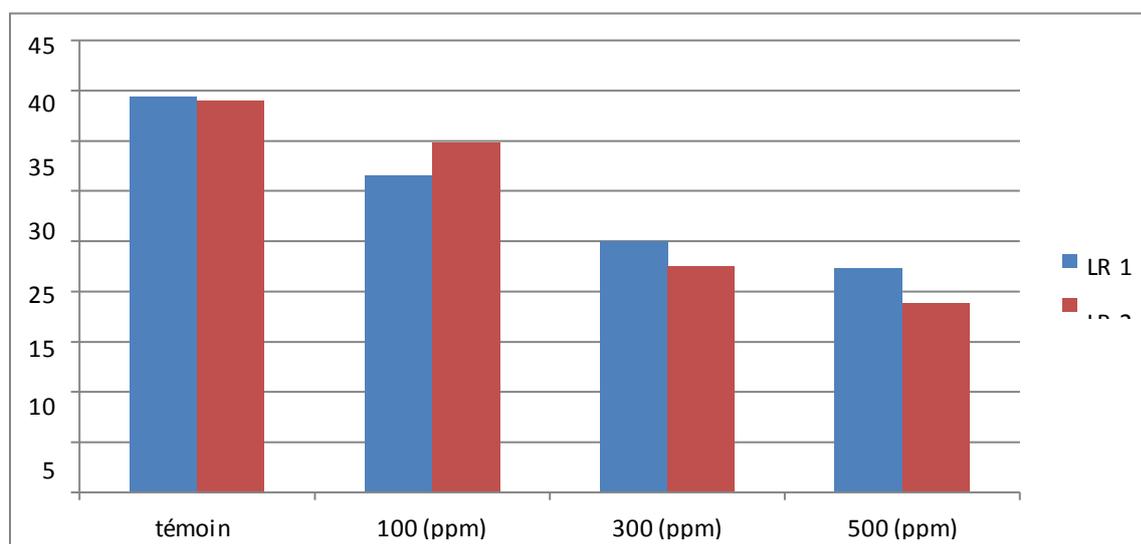


Figure 01 : étude l'effet de (Cu So_4) sur la longueur racinaire de la plante fève (*Vicia faba L.*).

4.1.2. Effet du Cuivre (Cu So_4) La longueur des racines de l'Atriplex

Selon les résultats obtenus (**figure 02**), on a remarqué une diminution de la longueur des racines chez les tiges sous traité avec dose de cuivre par rapport aux témoins.

On note également une diminution de la longueur des racines (1) de 55,12cm à 2000 ppm jusqu' au 58,87cm à 3000ppm (**Nairi, 2017**) et aussi pour longueur des racines (2) 48 cm à 2000ppm jusqu' au 35 cm à 3000ppm. (**RABAHI, 2019**).

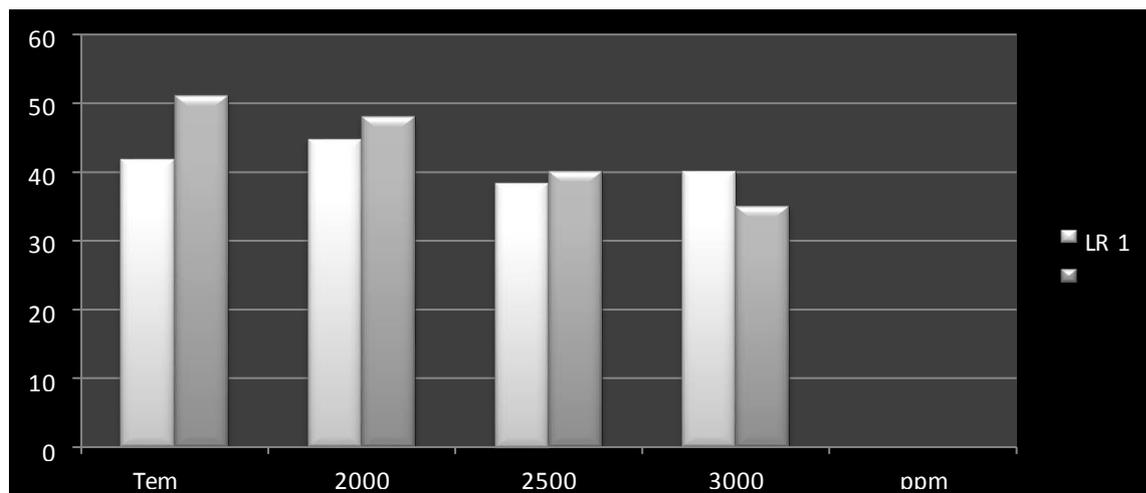


Figure02: étude comparaison sur l'effet de cuivre sur la longueur de la racine, chez l'Atriplex canescens.

4.1.3. Effet du Cuivre (Cu So_4) La longueur de la tige de l'Atriplex canescens.

D'après les résultats obtenus (**figure 3**), on n'observe une différence chez les tiges sous traité avec dose 2000 ppm de cuivre par rapport aux témoins.

On note également une chute de la longueur des tiges (1) (**BEKRALED 2017**) de 72 cm à 2000ppmjusqu' au 73,33cm à 3000ppm et aussi pour longueur des tiges (2) 55,12 cm à 2000ppmjusqu' au 58,87 cm à 3000ppm, (**DAHOU et al 2019**).

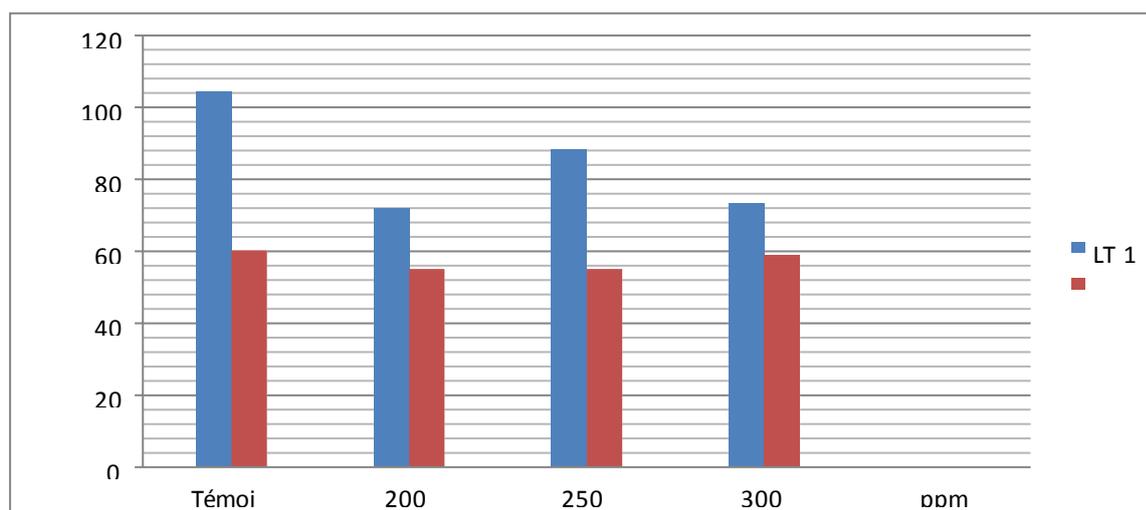


Figure03 : étude comparaison sur l'effet de cuivre sur la longueur des tiges, chez l'Atriplex canescens.

4.2. Paramètre physiologique :

4.2.1. Effet du cuivre sur la chlorophylle

D'après les résultats obtenus (**figure 04**), la chlorophylle A a diminué avec l'augmentation de la concentration des traitements dans les feuilles des plantes stressées par le cuivre,

La présence du cuivre dans le milieu a diminué la teneur en chlorophylle A jusqu'à une valeur moyenne de 1,21 mg. G-1 obtenue par un traitement de 3000 ppm par rapport au témoin (2,33mg.g-1) (**BEKRALED ,2017**) On note également une diminution de la teneur en chlorophylle (a) jusqu'à une valeur moyenne de 0,31mg.g-1 obtenue par un traitement de 3000ppm (**Nairi, 2017**).

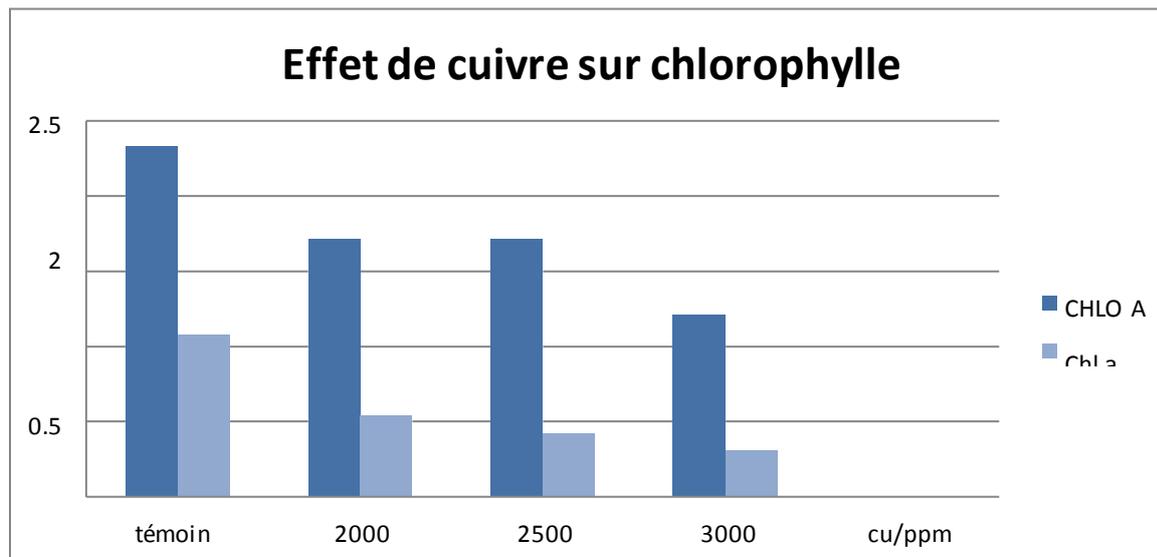


Figure 04 : Variation des teneurs en chlorophylles a, et totales (mg. G-1) dans les feuilles d'Atriplex canescens stressée au cuivre.

4.2.2. Effet du Cuivre (CuSo₄) sur la teneur relative en eau (RWC) :

Selon les résultats mentionnés dans la (**figure 05**), il en résulte que la présence du Cuivre (Cu So₄) dans le milieu de culture des plantes introduit une diminution de la teneur relative en eau, cependant chez les plantes témoins on remarque que la teneur relative en eau est supérieure que celles des plantes stressées cette teneur est arrivé à 77,78% pour RWC 1 et 63,97% pour RWC 2.

Tandis qu'en présence du Cuivre ces valeurs ont baissés en enregistrant comme moyenne 67,44% pour CuSo₄ (100ppm), 58,10% pour Cu So₄ (300ppm) et 43,90% pour Cu So₄ (500ppm) la teneur relative en eau 1 diminue avec l'augmentation des doses du Cuivre (**Kammoun, 2018**), Comparativement a En enregistrant comme moyenne 69,72% pour CuSo₄. (100ppm), 60,72% pour Cu So₄ (300ppm) et 60,35% pour Cu So₄ (500ppm) la teneur relative

en eau 2 diminue avec l'augmentation des doses du Cuivre . (Derkaoui, 2018).

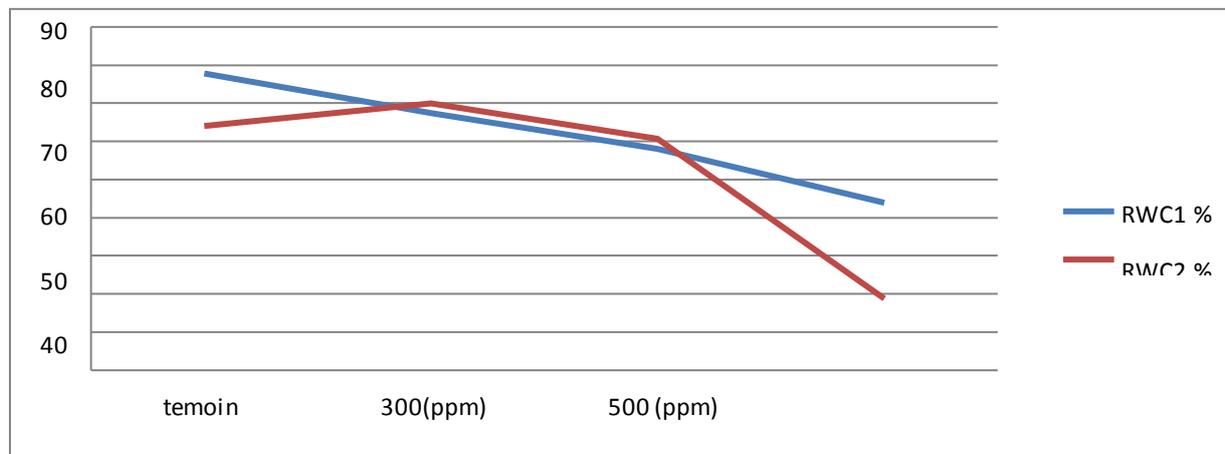


Figure 05 : étude de l'évolution des moyennes de la teneur relative en eau (%) en fonction de la dose du cuivre (ppm).

5. interprétation

Pour les paramètres biométriques Les résultats obtenus par (Dahou., et al 2019). Montrent que La croissance racinaire en longueur est indifférente à la contrainte métallique et elle présente une variation significative vis-à-vis le stress métallique, pour les plantes stressées. Les tiges montrent aussi une dégradation remarquable en longueurs. La réduction du développement des racines et des tiges est due aux effets toxiques des teneurs élevées de stress métallique et au déséquilibre de la disponibilité en nutriment (Datta et al. 2009).

En rapprochant tous les traitements ensemble, les résultats indiquent un effet non significatif sur le rapport LR/LT sauf le plomb qui a un effet hautement significatif. Nos résultats Montrent que *Atriplex canescens* résiste au stress métallique en tolérant une concentration élevée des métaux lourds dans le milieu, Chez *Atriplex* étudiée, la partie aérienne est moins résistante aux métaux lourds que la partie racinaire. Ces résultats sont confirmés par des corrélations positives significatives entre la biomasse sèche racinaire et le rapport de

Biomasse. Ces résultats sont conformes à ceux de (Bekraled., 2017) d'après (Araujo et al. 2006) qui ont étudié l'effet des métaux lourds sur *Atriplex canescens*. Ils ont trouvé que les modifications induites par le stress métallique sur le poids sec sont plus enregistrées pour les feuilles que les racines. Nos résultats montrent que l'appareil racinaire d'*Atriplex canescens* est résistant au stress ; En comparant les résultats obtenus, il apparaît que les paramètres

Mesurés peuvent être sujets à des rapports entre eux et de ce fait constituer des outils de compréhension globale sur la manière dont *Atriplex canescens* réagit au stress grâce à différents mécanismes (Misri et al., 2006) des biomasses totales des matières fraîches et

sèches des parties aérienne et racinaire) a décelé des différences significatives pour les différentes concentrations du stress abiotique (**Benmahioul et al., 2008**) la réduction de croissance semble associée à une forte accumulation des métaux lourds dans la plante (**Ben Ahmed et al. 20**) c'est résultats confirme **Rechidi (2018)**, avait évoqué la nécessité de la présence à la fois de cuivre pour la germination des grains de la fève. Selon cet auteur, le taux de germination atteint les 100 % sous différentes concentrations croissantes pour le cuivre et zinc, plus élevé que celui du témoin. Cela signifie que ces deux métaux ont un rôle physiologique important durant la phase de germination et que l'apport en doses élevé n'a pas affecté. (**Lexmond et Vorm ,1981**) ont montré que 'application des niveaux élevés du cuivre inhibe la croissance des racines avant d'affecter la production de la biomasse aérienne. Cependant, ça ne signifie pas nécessairement que les racines sont plus sensibles à des concentrations élevées du cuivre, 34,75 cm pour (100ppm), 22,5 cm pour (300ppm) et 18,78 cm pour (500ppm). Mais probablement, due en réalité que les racines sont dans un environnement ou le cuivre est en Excès (**Kammoun, 2018**). D'après (Pahlsson 1989), le cuivre généralement atteint le développement racinaire par l'inhibition de la croissance.

(**Mench et Aulen, 2008**) ont montré pour Beaupré. (**Chugh et Sawhney, 1999**), ont été signalés, l'effet de Cu sur la photosynthèse des *Elsholtziasplendens* a été discuté. Il a été suggéré que Cu à basse concentration accrue du contenu de la chlorophylle a, tandis que la hausse concentration de Cu qu'il a diminué. La diminution du taux de chlorophylle chez les plantes exposées aux métaux lourds est un phénomène très courant et supposé comme étant préliminaire à l'inhibition de la photosynthèse (**Prasad, 1999**). La réduction de la chlorophylle a est peut-être liée à la sensibilité d'une des étapes de sa biosynthèse aux métaux lourds ; selon (**Tewari et Singh, 1991**), les métaux lourds affectent moins la voie de biosynthèse de la chlorophylle.

Les résultats obtenus par (**Kammoun, 2018**) montrent que l'effet de cuivre diminue la teneur relative en eau dans les plantes stressées aux concentrations (300ppm), (500ppm) et (800ppm). Ces résultats sont conformes à ceux indiqués par (**Derkaoui, 2018**), il a observé une faible diminution des teneurs relative en eau en fonction de l'augmentation des doses de Cuivre chez la fève (**figure 05**). Plusieurs études ont mis en évidence une perturbation hydrique des plantes traitées aux métaux lourds. Elles ont principalement relevé une diminution de la transpiration et une diminution de la teneur en eau. En plus ces perturbations du statut hydrique conduisent à la fermeture des stomates qui va limiter les échanges gazeux avec l'atmosphère, et par conséquent les pertes d'eau par transpiration (**Azooz et al. 2011**).

Conclusion

En conclusion, nos travaux comparés à ceux documentés nous ont permis de mieux comprendre le phénomène de La phytotoxicité de cuivre vis-à - vis les plantes est un important problème affectant la productivité de la plante des espèces utilisées dans l'agriculture.

Cette étude a été consacrée à la détermination des effets du cuivre sur la germination des plantes médicinales pour prédire l'effet sur les activités de ces plantes. Il a été constaté que le cuivre avait un effet sur la croissance et germination et l'accumulation de minéraux et les changements biochimiques des plantes médicinales et aromatiques. L'exposition au cuivre entraînait un retard de croissance des plantes, ce qui indique une diminution de la sécheresse totale de Plantes, en plus du poids et de la surface et du diamètre de la base, la teneur totale en chlorophylle a été observée, ce qui confirme que les plantes et les plantes aromatiques étaient dans des conditions de stress lorsqu'elles étaient exposées au cuivre l'accumulation de cuivre dans les branches des racines était plus élevée que le taux recommandé, il a été démontré que l'exposition des plantes médicinales et aromatiques réduit La production de phénols, de flavonoïdes totaux et d'antimicrobiens et la réduction de l'activité des plantes médicinales malgré l'activité antioxydante.Par conséquent, l'exposition des plantes médicinales au cuivre affecte l'efficacité des plantes médicinales.

Références Bibliographiques

A

- **Abdel Ghany SE, Muller Moule P, Niyogi KK, Pilon M, Shikanai T.2005.** Two P-type ATPases are required for copper delivery in Arabidopsis thaliana chloroplasts. *Plant Cell* 17: 1233-1251.
- **Adriano DC. 2001.** Copper InTrace elements in terrestrial environment, biogeochemistry, bioavailability, and risks of metal. 2nd Edition, pp. 499–546.
- **AISSET, A, & MEHDADI, Z 2016.**Effect of salinity and water stress on the germination of Medicago arborea L. seeds. *J. Appl. Environ. Bid. Sci.*, 6: 113-121.
- **AKMAN, Z 2009.** Comparison of high temperature tolerance in maize, rice and sorghum seeds by plant growth regulators. *J. Ani. Vet. Adv.*, 8: 358-361.
- **Alloway BJ .1995.** Heavy metals in soils. 2nd Edition, Blackie Academic and Professional, London. P : 11,35, 368.
- **Archambault DJ , Winterhalder K. 1995.** Metal Tolerance in Agrostis-Scabra from the Sudbury, Ontario, Area. *Canadian Journal of Botany-Revue Canadienne De Botanique* 73, 766-775.
- **Ashan N, DG Lee, SH Lee, KY Kang, JJ Lee, PJ Kim, HS Yoon, JS Kim & BH Lee.2007.** Excess copper induced physiological and proteomic changes in germinating rice seeds. *Chemosphere* 67, 1182-1193.
- **Azzouz MM, Youcef MM, Al-Omarair MA.2011.** Comparative evolution of zinc and lead and their synergistic effects of growth and some physiological responses of Hassawi Okra (*Hibiscus esculentus*) seedling american. *journal of plant physiology* 6(6) :269-282.

B

- **B, Chuan-Chou, S, et Ernst, H. 2009.** "Bronze Age volcanic event recorded in Baker A.J.M. et Brooks R. R, 1989. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements- a review of their distribution, ecology and phytochemistry. *Biorecovery.* 1: 81-126.
- **Baker DE, Senft JP, 1995.** Copper in Heavy metals in soils, Ed B J Alloway. p 179-205. Blackie A&P, London.
- **Bensaha S. 2010.** La décontamination des eaux usées sur un support naturel.
- **Bessoule JJ, Mench M. 2002.** Biomarqueurs métaboliques d'effèt et d'exposition des végétaux aux métaux traces : candidats lipidiques. Ademe, Angers.

- **Bravin M. 2008.** Processus rhizosphériques déterminant la biodisponibilité du cuivre pour le blé dur cultivé en sols à antécédent viticole. Centre International d'Etudes Supérieures en Sciences Agronomiques, MontpellierSupAgro, 203 p.
- **Briat J.F, et Lebrun M. 1999.** Plant responses to metal toxicity. Compte rendu de l'Académie des Sciences. série III- Sciences de la vie. 322, 1 : 43-54.
- **Briat JF, Lebruit M. 1999.** Plant responses to metal toxicity. C. R Acad. Sci. Paris, serie III. 322 : 43-54.
- **Brooks R.R, Lee J, Jaffré T. 1974.** Some new Zealand and New Caledonian plant accumulators of Nickel. Journal of ecology 62: 493-499.
- **Brun L.A, Maillet J, Hinsinger P, Pepin M. 2001.** Evaluation of copper availability to plants in copper-contaminated vineyard soils. Environmental Pollution, 111, 293-302.
- **Brun L, Maillet J, Richarte J, Herrmann P, Rémy J.C. 1998.** Relationship between extractable copper, soil properties and copper uptake by wild plants in vineyard soils. Environmental Pollution, 102, 151-161.
- **Brun LA, Le Corff J, Maillet J. 2003.** Effects of elevated soil copper on phenology, growth and reproduction of five ruderal plant species. Environ Pollut. 122: 361-368.

C

- **Chaignon V. 2001.** Biodisponibilité du cuivre dans la rhizosphère de différentes plantes cultivées. Cas de sols viticoles contaminés par des fongicides. Thèse : Ecole doctorale,
- **Chaignon V, Sanchez-Neira I, Herrmann P, Jaillard B, Hinsinger P. 2003.** Copper bioavailability and extractability as related to chemical properties of contaminated soils from a vine-growing area. Environmental pollution, 123, 229-238.
- **Chappuis, P. 1991.** Les oligoéléments en médecine et biologie. Lavoisier Tee & Doc Paris.
- **Chatterjee J, Chatterjee C. 2000.** Phytotoxicity of cobalt, chromium and copper in cauliflower. Environmental Pollution 109, 69-74.
- **Chen B.C, Ho P.C. et Juang K.W. 2013.** Alleviation effects of magnesium on copper toxicity and accumulation in grapevines roots evaluated with biotique ligand model. Ecotoxicology 22: 174- 183.
- **CIC (Centre d'Information du Cuivre). 2004.** Le cuivre dans la construction. Santé et environnement. Livre Blanc. www.cuivre.org.

- **Ciscato M, Valcke R, VanLoven K, Clijsters H, Navari-Izzo F. 1997.** Effects of invivo copper treatment on the photosynthetic apparatus of two *Triticum durum* cultivars with different stress Sensitivity. *Physiologia Plantarum*. 100, 901-908.
- **Clemens S. 2001.** Molecular mechanisms of plant metal tolerance and homeostasis. *Planta* : 212, 475-486.
- **Coïc Y, et Coppenet M. 1989.** Les oligo-éléments en agriculture et élevage. INRA. Paris: 113 p.
- **Cook CM, Kostidou A, Vardaka E, Lanaras T. 1997.** Effets of copper on the growth Photosynthesis and nutrient concentrations of *Phaseolus* plants. *Photosynthetica*. 34: 179-193.
- **COPPENETM .1989 .**les oligoélément en agruculture et en elevage INRA Edition. paris
- **Cox RM & TC Hutchinson. 1980.** Multiple metal tolerances in the grass *Des champisia cespitosa* (L.) Beauv. From the Sudbury smelting area. *New Phytologist* 84, 631-647.
- **Cuypers A. 2000.** Phytotoxic concentrations of copper and zinc induce antioxidative defence in *Phaseolus vulgaris*, cv. Limburgse vroege: a comparative study. Limburgs universitair centrum, Diepenbeek, Belgium. *Sciences de l'Environnement : Systeme Terre, Université d'Aix-Marseille.*

D

- **Dabrio, M., Rodriguez, A. R., Bordin, G., Bebianno, M. J., De Ley, M., Sestakova, I., Vasak, Dahmani-muller, H., Van Oort, F., Gelie, B., Balabane, M. 1999.** Strategies of heavy metal uptake by three plant species growing newar a metal smelter. *Environmental Pollution* 109, 1-8.
- **Delas J. 1967.** Liaisons entre cuivre et matière organique dans un podzol développé sur sable des Landes et accidentellement enrichi en cuivre. *Ann Agron*, 18, 17-29.
- **Demirevska-Kepova KL, Simova-Stoilova Z, Stoyanova R, Holzer U, Feller. 2004.** Biochemical changes in barley plants after excessive supply of copper and manganese. *Environmental and Experimental Botany* 52, 253-266.
- **Dhaou-El-Djabine K. 2005.** Evaluation et comportement des métaux lourds (Cd–Cr–Cu – Ni – Pb – Zn et Mn) dans les sols a vocation agricole et a végétation naturelle soumis à une pollution atmosphérique. Thèse de Magister de l'université de Mentouri de Constantine - Algérie.

- **Dos Santos WD, Ferrarese MDL, Finger A, Teixeira CAN, Ferrarese O. 2004.** Lignification and related enzymes in Glycine max root growth-inhibition by ferulic acid. *Journal of Chemical Ecology* 30, 1203-1212.
- **Drouineau G, Mazoyer R. 1962.** Contribution à l'étude de la toxicité du cuivre dans les sols. *Ann Agron*, 13, 31-53.

E

- **Emsley, J. 2003.** *Nature's building blocks*. Oxford University Press Inc. New York.
- Emsley, J. 2003.** *Nature's building blocks*. Oxford University Press Inc, New York.

F

- **Feng, W, Benz, F. W, Cai, J, Pierce, W. M, and Kang, Y. J. 2006.** Metallothionein
- **Fernandez-Calvino D, Arias-Estevez M, Diaz-Ravina M, Baath E. 2012.** Assessing the effects of Cu and pH on microorganisms in highly acidic vineyard soils. *European Journal of Soil Science*. 63, 571-578.
- **Flemming, C. A, et Trevors, J. T. 1989.** Copper toxicity and chemistry in the environment: a review." *Water, Air, & Soil Pollution*, 44(1), 143-158.
- **Franchin CT, Fossati E, Pasquini G, Lingua S, Castiglione P, Torrigiani S Biondi. 2007.** High concentrations of zinc and copper induce differential polyamine responses in micropropagated white poplar (*Populus alba*). *Physiologia Plantarum* 130, 77-90.
- **Fuentes D, Disante KB, Valdecantos A, Cortina J, Vallejo VR. 2007.** Sensitivity of Mediterranean woody seedlings to copper, nickel and zinc. *Chemosphere* 66, 412-420.

G

- **Goudot-perrot, A. 1983.** Les métaux des mécanismes de la vie. Maloinès. éditeur-Paris.
- **Graham R.D. 1981.** Absorption of copper by plants roots. *Copper in soils and plants*. Ed Loneragan J.F., Robson A.D. and Graham R.D. Academic Press, 141-163.
- **Grill E, Winnacker EL, Zenk MH. 1991.** Phytochelatins. *Methods Enzymol.* 205 : 333-341.
- **Guillet B, Jeanroy E, Rougier RC, Souchier B. 1980.** Le cycle biogéochimique et l'adynamique du comportement des éléments-traces (Cu, Pb, Zn, Ni, Co, Cr) dans les pédogenèses organiques acides. Rapport ATP «Formation et distribution des gisements». Note tech sci centre de pédologie, Nancy, 27, 49.

- **Guo XM, Niu DK, Liu YQ, Du TZ, Xiao SZ, Ye XH.2004.** Vegetation restoration of different types of barren ecosystems in Jiangxi province. Pages 293-301 in S. P. M. Y.M.

H

- **Hall. 2002.** Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance. *Journal of Experimental Botany*, 53, 366, 1-11.
- **Hamer DH. 1986.** Methallothionein. *Annu. Rev. Biochem.* 55 : 913-951.
- **Hänsch R, Mendel R.R. 2009.** Physiological functions of mineral micronutrients (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Mo, B, Cl). *Current Opinion in Plant Biology* 12 : 259-266.
- **Harrison PM, Arosio P. 1996.** The ferritins : molecular properties, iron storage fonctionnant cellular regulation. *Bioch. Biophys. Acta* 1275 : 161-203.
- **Hasegawa I, Terada E, Sunairi M, Waklta H, Shinmachi F, Noguchi A, Nakajima M Yakasi J Fujita K, Mae T» Matsumoto H, Mori S» Sekja J. 1997.** Genetic improvement of heavy metal tolerance in plants by transfer of the yeast metallothionein gene (CUPI). *Plant nutrition for sustainable food production and environment. Planl Soil.* 196 : 277-281.
- **Hodgson JF, Lindsay WL, Trierweiler JF .1966.** Micronutrient cation complexing in soil solution. II. Complexing of Zinc and Copper in displacing solution from calcareous soils. *Soil Sci Soc Am Proc*, 30, 723-726.
- **Hopkin, S.P. 1989.** *Ecophysiology of metals in terrestrial invertebrates.* Elsevier, Applied science, NY, USA, 366 p.
- **Hopkins W.G. 2003.** *Physiologie végétale.* 1st Ed. De Boeck Université 532 p.
- **HUYNH, TD.2009.** *Impect de métaux lourds sur l'interaction plante/ver de terre /microflore tellurique .these de doctorat en écologie microbienne .université paris EST.BENEDETTO, D .méthodes spectrométriques d'analyse et de caractérisation dossier SAM 1997.*

I

- **Inaba S ; Takenaka C. 2005.** Effécts of dissolved organic matter on toxicity and bioavailability of copper for lettuce sprouts. *Environment International* 31, 603-608.
- **Isabey, J. 1933.** "**Cuivre.**" *Traité de chimie minérale Tome VIII Elements des terres rares Cuivre -Argent-Or-Mercure,* P. Pascal et P. Baud, eds. Masson et Compagnie, Paris, 1180pages.

J

- **Jondreville C, Revy P.S, Dourmad J.Y. 2003.** Dietary means to better control the environment impact of copper and zinc by pigs from weaning to slaughter. *Live stock Production Science*, 84, 147-156.
- **Juang K, W, Lee Y.I, Lai H.Y.et Chen B.C. 2012.** Influence of magnesium on copper phytotoxicity to and accumulation and translocation in grapevines. *Ecotoxicol. Environ. Saf* 104: 36-42.

K

- **Kabata Pendias A. 2010.** Trace elements in soils and plants. 3rd Edition, CRC Press, Boca Raton, Florida, 432 p.
- **Kabata Pendias A. 2011.** Trace elements in soils and plants. Fourth Ed. CRC Press 548p.
- **Kabata-Pendias A and Pendias H. 1992.** Copper. In: Trace elements in soils and plants. 2nd Edition, CRC Press, pp. 95–108.
- **Kang, Y, J. 2006.** Metallothionein redox cycle and function. *Experimental biology*
- **Kastori R, Petrovic M, Petrovic N. 1992.** Effect of excess lead, cadmium, copper and zinc on water relations in sunflower. *Journal of Plant Nutrition*. 15, 2427 -2439.
- **Kim YY, Choi H, Segami S, Cho HT, Martinoia E, Maeshima M, Lee Y. 2009.** AtHMA1 contributes to the detoxification of excess Zn(II) in Arabidopsis. *Plant J* 58: 737-753.
- **Klaassen, C. D, and Lehman-McKeeman, L. D. 1989.** Regulation of the isoforms of metallothionein. *Biological trace element research* 21, 119-29.
- **Konno H., Nakato T., Nakashima S., Katoh K.2005.** *Lygodium japonicum* fern.
- **Kopittke P,M. et Menzies N,W. 2006.** Effect of Cu toxicity on growth of cowpea (*Vigna unguiculata*). *Plant and Soil*, 279: 287-296.
- **Kopittke P,M., Asher C.J., Blamey F.P.C. et Menzies N.W. 2009.** Toxic effects of Cu²⁺ on growth, nutrition, root morphology, and distribution of Cu in roots of Sabi grass. *Science of the Total Environment*. 407: 4616-4621.
- **Kumpiene J, S Ore, G Renella, M Mench & C Maurice. 2005.** Remediation of chromium, copper, and arsenic contaminated soil with zerovalent iron. in 8th International conference on the biogeochemistry of trace elements, Adelaide, Australia.

- **Kupper H» Fang Jie Zhao, McGrath SP. 1999.** Cellular compartmentation of zinc in leaves of the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. *Plant Physiol.* 119 : 305-311.

L

- **Leep NW .1979.** Cycling of Copper in woodland ecosystems. In : *Copper in the environment*. Part / (JO Nriagh ed) Wiley, New-York, 289-323.
 - **Lin CC, Chen LM, Liu ZH. 2005.** Rapid effect of copper on lignin biosynthesis in soybean roots. *Plant Science* 168, 855-861.
 - **Linehan W, L. 1984.** Micronutrient cation sorption by roots and uptake by plants. *Journal of Experimental Botany*, 35, 1571-1574 ;
- Loneragan J, F. 1981.** Distribution and movement of copper in plants. *Copper in soils and plants*. Ed Loneragan J.F. Robson A.D. and Graham R.D. Academic Press, 165-187
- **Lou LQ, Shen ZG, Li XD. 2004.** The copper tolerance mechanisms of *Elsholtzia haichowensis*, a plant from copper-enriched soils. *Environmental and Experimental Botany* 51, 111-120.
 - **Loue A .1986.** Les oligo-éléments en agriculture. Agri-Nathan, 339 pp.
 - **Loué A. 1993.** Oligoéléments en agriculture. Editions Nathan, 577 p.
 - **Luna C, M, Gonzalez C, A, Trippi V, S. 1994.** Oxidative damage caused by an excess of copper in oat leaves. *Plant Cell. Physiol.*, 35, 11-15.

M

- **M, and Nordberg, M. 2002.** Recent developments in quantification methods for Magnesium in the alleviation of rhizotoxicity in wheat induced by copper, zinc, aluminium.
 - **Mahmood S, A Hussain, Z Saeed & M Athar. 2005.** Germination and seedling growth of corn (*Zea mays* L) Under varying levels of copper and zinc. *International Journal of Environmental Science and Technologies* 2, 269-274.
 - **Malan ML & JM Farrant. 1998.** Effects of the metal pollutants Cadmium and Nickel on Soybean seed development. *Seed science research* 8, 445-453.
- Marcellin H., 1974.** La vigne dans les sols acides du Roussillon. *Progrès agricole et viticole*, 17: 548-555.
- **Marschner H .1995.** *Mineral Nutrition of Higher Plants*, 2nd edn. London, UK, Academic Press. 889 p.
 - **Marschner H. 2012.** *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*, 3rd Ed London,

- **Martinoia E, Grill E, Tommasini R, Kreuz K, Amrhein N. 1993.** ATP-dependent glutathione S conjugate 'export' pump in the vacuola membrane of plants. *Nature* 364 :247-249.
- **Martins V, Hanana M, Blumwald E, Geros H. 2012.** Copper transport and compartmentation in grape cells. *Plant and cell physiology*, 53,11, 1866-1880.
Mass Spectrometry, 23(6), 801-808.
- **McBride M.B.** 1981. Form and distribution of copper in solid and solution phases of soil. *Copper in soils and plants*. Ed Loneragan J.F., Robson A.D. and Graham R.D., Academic Press, 25-45.
- **Mengel K, Kirkby EA .1982.** Principales of plant nutrition. intern. potash. INST. Bern. 655.
- **Mengel K, Kirkby E, A. 2001** Soil copper. *Principles of plant nutrition*. 5th ed, Kluwer Academic Publishers, 599-611.
- **Menon MM. 2006.** Influence of soil pollution by heavy metals on the water relations of young forest ecosystems. Swiss federal institute of technology.
- **Metallothionein.** *Journal of inorganic biochemistry* 88, 123-34.
- **Michaud A.M, Bravin M.N, Galleguillos M, Hinsinger P. 2007.** Copper uptake and phytotoxicity as assessed in situ for durum wheat (*Triticum turgidum durum L.*) cultivated in Cu-contaminated, former vineyard soils. *Plant Soil*, 298, 99-111.
- **Migeon A, Blaudez D, Wilkins O, Montanini B, Campbell M.M, Richaud P, Thomine S, Chalot M. 2010.** Genome-wide analysis of plant metal transporters, with anaphases on poplar. *Cell. Mol. Life Sci.*, 67, 3763-378.
- **Mihoub A, A Chaoui & EE Ferjani. 2005.** Changements biochimiques induits par le cadmium et le cuivre au cours de la germination des graines de petit pois (*Pisum sativum L.*). *Comptes Rendus Biologies* 328, 33-41.
- **Moreno I, Norambuena L, Maturana D, Toro M, Vergara C, Orellana A, Zurita-Silva A, Ordenes VR. 2008.** AtHMA1 is a thapsigargin-sensitive Ca²⁺/heavy metal pump. *Biol Chem* 283: 9633-9641 .
- **Morrison, G.H.** 1979. Role of Trace Elements Biology. c.R. CCritical Reviews in Analytical Chemistry. (1979) 8.

N

- **Nieboer E, Richardson D,H,S. 1980.** The replacement of the nondescript term «heavy metal » by a biologically & chemically significant classification of metal ions. *Environ.Pollut.* IB: 326.
- **Nielson, K, B, and Winge, D, R. 1983.** Order of metal binding in metallothionein. *The Journal of biological chemistry* 258, 13063-9.

P

- **Pal M, Horvath E, Janda T, Paldi E, Szalai G. 2006.** Physiological changes and defence mechanisms induced by cadmium stress in maize. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science.* 169, 239-246.
- **Panou-Filothéou et Bosabalidis A,M. 2004.** Root structural aspects associâtes with copper toxicity homeostasis in Arabidopsis: response to metal deficiencies, interactions and biotechnological applications. *Plant Cell and Environment*, 30, 271-290.
- **Patsikka E, Kairavuo M, Sersen F, Aro EM, Tyystjarvi E. 2002.** Excess copper disposes photosystem II to photoinhibition in vivo by outcompeting iron and causing decrease in leaf chlorophyll. *Plant Physiology* 129, 1359-1367.
- **Pearson R, G. 1963.** Acids and bases. *Science*, 191: 1721 77.
- **Pollard A,J, Powell KD, Harper FA etSmith JAC.2002.** The genetic Basis of metalhyper accumulation in plants, *Critical Review in Plant Sciences* 21: 539-566.
- **Prasad MN,Ed V. 2004.** Heavy Metal Stress in Plants. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg
- **Puig S, Andres-Colas N, Garcia-Molina A, Penarrubia L. 2007.** Copper and iron.

R

- **Reuser WE.** 1990. Phytochelatins. *Annu. Rev. Biochem.*59 : 61-86.
- **Reuser WE.** 1995. Phytochelatins and related peptides : structure, biosynthesis and function. *Plant Physiol.* 86 : 1141-1149.
- **Robinson J.P, Darzynkiewicz Z, Dean P.N, Orfao A, Rabinovitch P.S, Stewart C.C, Tanke H.J, et Weeless L.L, 1997.** *Current Protocols in Cytometry*, John Wiley and Sons, New York.

- **Robinson NJ, Tommcy AM, Kuske C, Jackson PJ. 1993.** Plant metallothioneins. *Biochem. J.* 295 : 1-10.

S

- **Salemaa M & T Uotila.** 2001. Seed bank composition and seedling survival in forest soil polluted with heavy metals. *Basic and Applied Ecology* 2, 251-263.

- **Salt, D.E, Prince, R.C, Pickering, I.J, Raskin, I. 1995.** Mechanisms of cadmium mobility and accumulation in Indian mustard. *Plant Physiology* 109, 1427-1433.

- **Sanita Di Toppi, L, Gabbrielli, R.** 1999. Response to cadmium in higher plants. *Environmental and Experimental Botany* 41, 105-130.

- **Sauvé S, Murray B, Bridea MC, William H, Hendershoth.** 1997. Spéciation of lead in contaminated soils. *Environmental pollution* : 149-155.

- **Scheffer K, Stach W, Vardakis F. 1979.** Über die verteilung der schwermetalle eisen, manga, kupfer und zink in sommergesternpflanzen, *Landwirtsch. Forsch.*, 2, 326.

- **Schmoger MEV, Ovin M, GriZI E.** 2000. Detoxification of arsenic by phytochelatin implants. *Plant Physiol.* 122 : 793-80

- **Schnitzer M., Skinner SIM .1966.** Organometallic interactions in soils: V. Stability constants of Cu²⁺, Fe²⁺ and Zn²⁺ fulvic acid. *Soil Sci*, 102, 361-366.

- **Seigneurin-Berny D, Gravot A, Auroy P, Mazard C, Kraut A, Finazzi G, Grunwald D, Rappaport F, Vavasseur A, Joyard J, Richaud P, Rolland N.** 2006. HMA1, a new Cu-ATPase of the chloroplast envelope, is essential for growth under adverse light conditions. *J Biol Chem* 281: 2882-2892

- **Shainberg O, Rubin B, Rabinovitch HD, Tel-Or E. 2001.** Loading beans with sublethal levels of copper enhances conditioning to oxidative stress. *Journal of Plant Physiology* 158, 1415-1421.

- **Sodium and low pH.** *Plant and Soil*, 259, 201-208.

- **Sposito G. 1989.** The chemistry of soils. Oxford Univ. Press, 277p.

T

- **Tiller K.G, Merry H.** 1981. Copper pollution of agricultural soils. Copper in soils and plants. Ed. Loneragan J.F., Robson A.D. and Graham R.D., Academic Press, 25-45.

- **Transporteur membranaire Uribe EG, Stark B. 1982.** Inhibition of photosynthetic energy conversion by cupric ion: Evidence for Cu²⁺- coupling factor 1 interaction. *Plant Physiology* 69, 1040-1045.

V

- **Vidic T, N Jogan, D Drobne & B Vihlar. 2006.** Natural revegetation in the vicinity of the former lead smelter in Zerjav, Slovenia. *Environmental Science & Technology* 40, 4119-4125.
- **Vinit-Dunand F, Epron D, Alaoui-Sosse B, Badot PM. 2002.** Effects of copper on growth and on photosynthesis of mature and expanding leaves in cucumber plants. *Plant Science* 163, 53-58.
- **Viragh K & L Gerencser. 1988.** Seed Bank in the Soil and Its Role During Secondary Successions Induced by Some Herbicides in a Perennial Grassland Community. *Acta Botanica Hungarica* 34, 77-121.
- **Vouk, V. 1979.** General chemistry of metals. In: *Handbook on the Toxicology Metals*. (Friberg, L, Nordberg, G. F. and Vouk, V. B., Eds.) pp. 15-31. Elsevier/North Holland Biomedical Press, Amsterdam.
- **Vulkan R, Zhao F.J, Barbosa-Jefferson V, Preston S, Paton G.I, McGrath S.P. 2000.** Copper speciation and impacts on bacterial biosensors in the pore water of copper contaminated soils. *Environmental Science and Technology*, 34, 5115-5121.

W

- **Wainwright SJ and Woolhouse HW. 1977.** Some physiological aspects of copper and zinc tolerance in *Agrostis tenuis* Sithe: Cell elongation and membrane damage. *Journal of Experimental Botany*, v.28, p.1029-1036.
- **Wei L, Luo C, Li X, Shen Z. 2008.** Copper accumulation and tolerance in *Chrysanthemum coronarium* L. and *Sorghum sudanense* L. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, 55, 238-246.
- **Wheeler D.M., Power I.L. 1995.** Comparison of plant uptake and plant toxicity of variations in wheat. *Plant and Soil* 172, 163-173.

Y

- **Yang X, Feng Y, He Z., Stoffella P. J. 2005.** Molecular mechanisms of heavy metal hyperaccumulation and phytoremediation. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology* 18 : 339-353.
- **Yruela I. 2005.** Copper in plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 17: 145-156.
- **Yruela I. 2009.** Copper in plants: acquisition, transport and interactions. *Functional Plant Biology* 36: 409-430.

Z

- **Zenk MH. 1996.** Heavy metal detoxification in higher plants - a review. *Gene* 179 : 21-30.
- **Zorrig W. 2011.** Recherche des déterminants contrôlant l'accumulation du cadmium chez la laitue "Lactuca sativa." Montpellier, SupAgro.