



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



DEPARTEMENT DEBIOLOGIE

N°...../SNV/2017

## MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Présenté par

**Mlle Beldjilali Noura**

**Mlle Zeltissi Kheira**

Pour l'obtention du diplôme de

**MASTER EN BIOLOGIE**

**Spécialité : Phytotechnologie appliquées aux sols polluées**

THÈME

**Effet des métaux lourds (Cu et Zn) sur les paramètres  
morphologiques et physiologiques de la tomate  
*Lycopersicon esculentum Mill***

Soutenue publiquement le 14/ 09/ 2017

DEVANT LE JURY

Président            Me . Belarbi. Ammaria  
Encadreur            Mr. Reguieg Yassad Houcine  
Co-encadreur        Melle .Osmane Badiaa  
Examineur           Mr . MoRhtit Ahmed

2016-2017

## **Remerciements**

*Avant toute chose, je tiens à remercier « Allah » qui nous a donné la force et la volonté pour terminer ce modeste travail.*

*Les travaux présentés dans ce Mémoire ont été effectués au Laboratoires de INPV AU DABDABA, Sous la direction de Melle CO-encadreur **B. OSMANE** et encadreur **Reguiég Yassad Hossine**. Nous tenons à exprimé nos très sincèrement remercier d'avoir proposé le thème et accepté la responsabilité de nous encadré malgré ses nombreuses obligations. Nous tenons vivement à lui exprimer nos profondes reconnaissances et gratitude pour sa disponibilité, sa patience, sa compréhension, ses qualités humaines.*

*Nous tenons à remercier Monsieur le Professeur **Reguiég Yassad Hossine** chef du parcours de la phytotechnologie appliquées aux sols polluées.*

*Je tiens également à témoigner ma gratitude Mr **Mokhtit Ahmed** d'avoir acceptée d'examiné le travail malgré ses multiples tâches.*

*Je tiens également remercie le président **Me Belarbi Amaría**.*

## Liste des abréviations

Cu	:	cuivre
NS	:	non significatif
P	:	probabilité
Pb	:	plomb
PF	:	poids frais après
Pfi	:	Poids frais initial
PH	:	potentiel hydrique
Pi	:	initial
PPM	:	Partie par million
ETM	:	Elément trace métallique
PS	:	pois sec
PT	:	pois turgescente
R.W.L	:	Exprimé par g/cm <sup>2</sup> /mn.
RWC	:	La teneur relative en eau du feuille
SB	:	antimoine
SD	:	écarte type
SE	:	sélénium
SF	:	surface foliaire
STAT BOX	:	logiciel des analyses statistiques
T	:	toxique
Zn	:	zinc
ZnSO <sub>4</sub>	:	sulfate de zinc
CuSO <sub>4</sub>	:	Sulfate de cuivre
HCL	:	Acide chlorhydrique

## Liste des figures

<b>Figure 01</b>	le système racinaire de la tomate.....	04
<b>Figure 02</b>	les feuilles et les tiges de la tomate.....	05
<b>Figure 03</b>	Fleur de la tomate.....	05
<b>Figure 04</b>	Les fruits de la tomate.....	06
<b>Figure 05</b>	Cycle de développement.....	09
<b>Figure 06</b>	Les principaux pays producteurs de tomate dans le monde (1997-2007).....	11
<b>Figure 07</b>	Origine des métaux lourds dans le sol.....	15
<b>Figure 08</b>	Courbe de croissance en réponse au statut nutritionnel de la plante.....	20
<b>Figure 09</b>	Structure de l'endoderme et passage des éléments par la voie symplastique du fait de la présence de cellules subérisées au niveau des bandes de Caspary	21
<b>Figure 10</b>	Facteurs influençant la phytodisponibilité du zinc pour les végétaux.....	25
<b>Figure 11</b>	Les étapes de la préparation du substrat.....	27
<b>Figure 12</b>	Remplissage des cylindres par le substrat.....	27
<b>Figure 13</b>	Dispositif expérimental.....	27
<b>Figure 17</b>	les graines mis à germer dans une boîte Pétri.....	28
<b>Figure 15</b>	Semis dans des plateaux alvéolés.....	29
<b>Figure 16</b>	Plantule de la tomate pour le repiquage.....	29
<b>Figure 17</b>	dispositif expérimental en serre après le repiquage.....	29
<b>Figure 18</b>	Préparation des solutions du stress.....	31
<b>Figure 19</b>	Application du stress métallique.....	31
<b>Figure 20</b>	Les étapes pour déterminer RWC.....	33
<b>Figure 21</b>	Le taux de germination des graines de <i>Lycopersicon esculentum</i> Mill.....	35
<b>Figure 22</b>	L'effet du cuivre sur la longueur des tiges de <i>Lycopersicon esculentum</i> Mill..	36
<b>Figure 23</b>	L'effet du cuivre sur le nombre des feuilles de <i>Lycopersicon esculentum</i> Mill.....	37
<b>Figure 24</b>	L'effet du cuivre sur la surface foliaire de <i>Lycopersicon esculentum</i> Mill.....	38
<b>Figure 25</b>	L'effet du cuivre sur la longueur racinaire de <i>Lycopersicon esculentum</i> Mill...	39
<b>Figure 26</b>	L'effet du cuivre sur la teneur relative en eau (RWC) des feuilles de <i>Lycopersicon esculentum</i> Mill.....	40
<b>Figure 27</b>	L'effet du cuivre sur le taux de déperdition d'eau (R.W.L) des feuilles de <i>Lycopersicon esculentum</i> Mill après 60 min.....	41
<b>Figure 28</b>	La culture de la tomate avant l'application du cuivre.....	42
<b>Figure 29</b>	la culture de la tomate après l'application du cuivre.....	42
<b>Figure 30</b>	L'effet du zinc sur la longueur des tiges de <i>Lycopersicon esculentum</i> Mill.....	43
<b>Figure 31</b>	L'effet du zinc sur le nombre des feuilles de <i>Lycopersicon esculentum</i> Mill...	44
<b>Figure 32</b>	L'effet du zinc sur la surface foliaire de <i>Lycopersicon esculentum</i> Mill.....	45
<b>Figure 33</b>	L'effet du zinc sur la longueur racinaire de <i>Lycopersicon esculentum</i> Mill.....	46
<b>Figure 34</b>	L'effet du zinc sur la teneur relative en eau (RWC) des feuilles de <i>Lycopersicon esculentum</i> Mill.....	48

<b>Figure 35</b>	L'effet du Zinc sur le taux de déperdition d'eau (R.W.L) des feuilles de <i>Lycopersicon esculentum</i> Mill après 60 min.....	49
<b>Figure 36</b>	La culture de la tomate avant l'application du Zinc.....	50
<b>Figure37</b>	La culture de la tomate après l'application du zinc.....	50

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1 :</b>	Classification botanique de la tomate	03
<b>Tableau 2 :</b>	les températures moyennes aux différents stades végétatifs de la tomate	07
<b>Tableau 3 :</b>	Evolution de la production de la tomate en Algérie entre 2005-2009	11
<b>Tableau 4 :</b>	Classification de quelques métaux lourds selon leur densité et leur toxicité	14
<b>Tableau 5 :</b>	Composition de la solution nutritive	30
<b>Tableau 6 :</b>	Les résultats moyens de l'évolution de la longueur des tiges (cm) de <i>Lycopersicon esculentum</i> Mill en fonction des doses de cuivre.	36
<b>Tableau 7 :</b>	Les résultats moyens de l'évolution du nombre des feuilles de <i>Lycopersicon esculentum</i> Mill en fonction des doses de cuivre	37
<b>Tableau 8 :</b>	Les résultats moyens de la surface foliaire de <i>Lycopersicon esculentum</i> Mill en fonction des doses de cuivre.	38
<b>Tableau 9 :</b>	Les résultats moyens de la longueur racinaire de <i>Lycopersicon esculentum</i> Mill en fonction des doses de cuivre.	39
<b>Tableau 10 :</b>	Les résultats moyens de la teneur en eau de <i>Lycopersicon esculentum</i> Mill en fonction des doses de cuivre.	41
<b>Tableau 11 :</b>	Les résultats moyens du taux de déperdition d'eau (R.W.L) de <i>Lycopersicon esculentum</i> Mill en fonction des doses de cuivre.	42
<b>Tableau 12 :</b>	Les résultats moyens de l'évolution de la longueur des tiges (cm) de <i>Lycopersicon esculentum</i> Mill en fonction des doses du zinc.	43
<b>Tableau 13 :</b>	Les résultats moyens de l'évolution du nombre des feuilles de <i>Lycopersicon esculentum</i> Mill en fonction des doses de zinc.	45
<b>Tableau 14 :</b>	Les résultats moyens de la surface foliaire de <i>Lycopersicon esculentum</i> Mill en fonction des doses de zinc.	46

<b>Tableau 15 :</b>	Les résultats moyens de la longueur racinaire de <i>Lycopersicon</i>	47
	<i>esculentum</i> Mill en fonction des doses de zinc	
<b>Tableau 16 :</b>	Les résultats moyens de la teneur en eau de <i>Lycopersicon</i>	48
	<i>esculentum</i> Mill en fonction des doses de Zinc	
<b>Tableau 17 :</b>	Les résultats moyens du taux de déperdition d'eau (R.W.L) de	49
	<i>Lycopersicon</i> <i>esculentum</i> Mill en fonction des doses de zinc	

# Sommaire

Remerciements	
Liste des abréviations	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Résumé	
Introduction.....	1

## REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

### Chapitre I : La tomate (*Lycopersicon esculentum*.Mill)

I.1. Origine et histoire de la tomate .....	2
I.1.1. La tomate en Amérique .....	2
I.1.2. La tomate en Europe .....	2
I.1.3. la tomate en Algérie .....	2
I.2. Classification botanique de la tomate .....	3
I.3. Caractéristiques morphologiques de la tomate .....	4
I.3.1. Le système racinaire .....	4
I.3.2. L'appareil végétatif .....	4
I.3.2.1. La tige .....	4
I.3.2.2. Les feuilles .....	5
I.3.3. L'appareil reproducteur .....	5
I.3.3.1. Les fleurs .....	5
I.3.3.2 Les fruits.....	6
I.4. Exigences de la tomate .....	6
I.4.1. Température .....	6
I.4.2. Humidité relative, (H.R. %) .....	7
I.4.3. Lumière .....	7
I.4.4. Sol .....	7
I.4.4.1. Structure et texture .....	7
I.4.4.2. pH : .....	8
I.4.5. Salinité .....	8
I.4.6. Besoins hydriques .....	8
I.5. Cycle de développement .....	8
I.5.1. Phase de germination .....	8
I.5.2. Phase de croissance .....	8
I.5.3. Phase de floraison .....	9
I.5.4. Phase de fructification et de maturation .....	9
I.6. Les principales maladies ou ravageurs .....	9
I.7. Importance économique et production actuelle .....	10
I.7.1. Importance Mondiale .....	10
I.7.2. Production de la tomate .....	10
I.7.3. Importance en Algérie .....	11
I.7.4. La production de la tomate à Mostaganem .....	12
I.8. Importance nutritionnelle .....	12

## Chapitre II: Les métaux lourds

II.1. Généralités .....	13
II.2. Définition des métaux lourds .....	13
II.3. Origine de la contamination des sols par les métaux lourds .....	14
II.3.1. Origine naturelle .....	14
II.3.2. Origine anthropique .....	14
II.3.2.1. La pollution atmosphérique .....	14
II.3.2.2. La pollution industrielle .....	15
II.3.2.3. La pollution liée aux activités agricoles .....	15
II.3.3. Toxicité .....	15
II.4. Mobilité et biodisponibilité des métaux lourds .....	16
II.4.1. La teneur en argile .....	16
II.4.2. Le pH .....	16
II.4.3. Le potentiel redox (Eh) .....	17
II.4.4. L'activité biologique .....	17
II.4.4.1. Les modes d'action sur la mobilité des polluants métalliques .....	17
II.5. Le cuivre .....	18
II.5.1. Origine .....	18
II.5.2. Le cuivre dans le sol .....	19
II.5.3. Comportement du cuivre dans le sol (spéciation et mobilité) .....	19
II.5.4. Le cuivre dans la plante .....	20
II.5.5. Rôle physiologique du cuivre .....	22
II.5.6. Phytotoxicité .....	22
II.5.7. Toxicité pour l'homme .....	23
II.6. Zinc .....	23
II.6.1. Origine .....	23
II.6.2. Le zinc dans le sol .....	23
II.6.3. Comportement du zinc dans le sol (spéciation et mobilité) .....	23
II.6.4. Le zinc dans la plante .....	24
II.6.5. Rôle physiologique de zinc .....	25
II.6.6. Phytotoxicité .....	25

## Partie expérimental

### Chapitre III: Matériels et méthodes

III.1. Objectifs.....	26
III.2. Matériel végétal.....	26
III.3. Dispositif expérimental.....	26
III.4. Conduite de l'essai.....	28
III.4.1 Germination .....	28
III.4.2 Semis.....	28
III.4.3 Repiquage.....	29
III.4.4 L'arrosage.....	30
III.4.5 Fertilisation minérale.....	30
III.4.6 Application stress métalliques.....	30
III.5. Paramètres étudiés.....	31

III.5.1. Paramètres morphologiques .....	31
III.5.1.1 La surface foliaire.....	32
III.5.1.2 Nombre des feuilles .....	32
III.5.1.3 Hauteur de la tige.....	32
III.5.1.4 Longueur racinaire.....	32
III.5.2 Paramètres physiologiques.....	32
III.5.2.1 Teneur relative en eau des feuilles RWC.....	32
III.5.2.2 Transpiration cuticulaire.....	33
III.6 Analyse statistique .....	34

## **Chapitre VI: Résultats et discussion**

IV.1 Taux de germination .....	35
IV.2 L'effet du cuivre sur les paramètres morphologiques et physiologiques de la tomate .....	35
IV. 2.1 Paramètres morphologiques.....	35
IV. 2.2 Paramètres physiologiques.....	40
IV.3 L'effet du zinc sur les paramètres morphologiques, biométrique et physiologiques de la tomate .....	43
IV. 3.1 Paramètres morphologiques .....	43
IV. 3.2 Paramètres physiologiques .....	48
Discussion.....	51
Conclusion.....	53
Références bibliographiques.	
Annexes.	

# ***INTRODUCTION***

# Introduction

---

Les oligo-éléments ou éléments mineurs sont importants pour les végétaux. Les sols carencés peuvent nuire au développement végétal et réduire ainsi la qualité du produit. Certains éléments mineurs sont des métaux lourds et lorsque les sols sont saturés, la disponibilité pour la plante peut potentiellement créer de la phytotoxicité augmentant le risque de la contamination de l'environnement et de la chaîne alimentaire des humains et des animaux (Estevez, 2006).

Les éléments traces sélectionnés pour ce travail sont parmi les polluants métalliques les plus fréquemment rencontrés dans les sols : le zinc, oligoélément essentiel au développement des végétaux mais qui s'avère toxique à forte dose, le cuivre pour sa phytodisponibilité et sa toxicité.

La région de Mostaganem a connu un développement agricole important, notamment la serreculture, qui a enregistré un départ vertigineux à partir des années 80. La tomate *Lycopersicon esculentum* Mill, qui est une des cultures stratégiques les plus importantes dans le monde, vient en tête des cultures sous serre dans la région de Mostaganem. Mais malheureusement cette dernière est trop traitée par les produits phytosanitaires. Ces derniers sont utilisés pour assurer une bonne nutrition de la plante et pour combattre les maladies et les ravageurs des cultures, ils contiennent des quantités plus ou moins importantes des métaux lourds dont : cuivre et zinc.

Dans ce cadre s'inscrit notre travail qui vise à évaluer l'effet des métaux lourds le cas du cuivre et du zinc sur les paramètres morphologiques, physiologiques de la tomate *Lycopersicon esculentum* Mill.

Ce travail comporte deux grandes parties :

- La première partie concerne la synthèse bibliographique sur les métaux lourds (cuivre et zinc) dans le sol et le végétal, et aussi la tomate *Lycopersicon esculentum* Mill.
- La deuxième partie est consacrée au protocole expérimental adopté pour la réalisation de notre travail.

*Partie*  
*Bibliographiques*

# *Chapitre I*

## I.1 Origine et histoire de la tomate :

### I.1.1 La tomate en Amérique :

La tomate du genre *Lycopersicon* est une plante cultivée dans le monde entier pour son fruit. Elle est originaire des régions Andines côtières du Nord-Ouest de l'Amérique du Sud, dans une zone allant du Sud de la Colombie au Nord du Chili et de la côte Pacifique, aux contreforts des Andes (Equateur, Pérou). C'est en effet seulement dans ces régions, qu'on a retrouvées des plantes spontanées de diverses espèces, de l'ancien genre *Lycopersicon*, notamment *Solanum lycopersicum ceraciforme* (la tomate cerise). Cette dernière est actuellement répandue dans toutes les régions tropicales du globe, mais il s'agit d'introduction récente. (Anonyme 1, 2011).

Chaux et Foury (1994) rappellent que le genre *Lycopersicon* comprend neuf espèces, dont une seule espèce *Lycopersicon esculentum* sous sa forme sauvage ceraciforme pourrait être directement à l'origine de nos variétés, a émigré vers le Sud de l'Amérique du Nord.

C'est au XVI<sup>ème</sup> siècle au Mexique actuel que la tomate à gros fruits a été découverte et domestiquée. Les indigènes l'appelaient « Tomati » ; ce nom provient d'un nom Aztèque « Zitomate », où l'ont trouvé les Conquistadors Espagnols lors de la conquête de Tenochtitlan (Mexico) par Hernan Cortés en 1519 (Anonyme 1, 2011).

### I.1.2 La tomate en Europe :

Elle fut introduite en Europe au XVI<sup>ème</sup> siècle par les Espagnols avant même la pomme de terre et le tabac, où elle fut accueillie par les gens avec un engouement très gaulois, car ils pensaient qu'elle avait un pouvoir aphrodisiaque et l'appelèrent « Pomme d'Amour » (Anonyme, 2010).

Au début, les Européens l'exploitèrent pour un usage purement ornemental et évitèrent sa consommation, à cause des liens de parenté botanique très étroits avec certaines espèces végétales connues comme plantes vénéneuses, exemple : *Hyocinus niger*, *Lycopersicum atropa* (Kolev, 1976). Selon Menard (2009), elle a été longtemps considérée comme une plante toxique, au même titre que sa cousine « la mortelle Belladone ». Ce n'est que vers les années 1920-1930 qu'elle commença à être largement commercialisée.

### I.1.3 la tomate en Algérie :

En Algérie, ce sont les cultivateurs du Sud de l'Espagne (Tomateros), qui l'ont introduite étant donné les conditions qui lui sont propices. Sa consommation a commencée

dans la région d'Oran en 1905 puis, elle s'étendit vers le centre, notamment au littoral Algérois (Latigui, 1984).

**I.2 Classification botanique de la tomate :**

Cronquist (1981), Gausсен *et al.* (1982), rappellent que la tomate appartient à la classification suivante présentée dans le **tableau 1**

**Tableau 1:** Classification botanique de la tomate

<b>Règne</b>	Plantae.
<b>Sous règne</b>	Trachenobionta
<b>Division</b>	Magnoliophyta
<b>Classe</b>	Magnoliopsida
<b>Sous classe</b>	Asteridae
<b>Ordre</b>	Solanales
<b>Famille</b>	Solanaceae
<b>Genre</b>	<i>Solanum</i> ou <i>Lycopersicum</i>
<b>Espèce</b>	<i>Lycopersicum esculentum</i> Mill

## I.3 Caractéristiques morphologiques de la tomate :

### I.3.1 Le système racinaire :

Le système racinaire est puissant, très ramifié à tendance fasciculée. Il est très actif sur les 30 à 40 premiers centimètres. En sol profond, on peut trouver des racines jusqu'à 1 mètre de profondeur (Chaux et Foury, 1994) (Fig 1).



Fig 1 : le système racinaire de la tomate (D.Blancard, 2009)

### I.3.2 L'appareil végétatif :

#### A- La tige :

De la tomate, comme celle des autres solanacées est vigoureuse et ramifiée (Pntta, 1999). Elle est poilue, épaisse aux entre-nœuds. On trouve deux sortes de poiles sur la tige et feuilles : des poiles simples et des poiles glanduleux qui contiennent une huile essentielle, celle-ci donne l'odeur de la tomate et sa coloration verte. On distingue deux grandes catégories de tiges :

- **Les tiges à croissance déterminée** : leur croissance s'arrête après avoir émis un nombre variable de bouquets de fleurs. Elles donnent des pieds qui ont 60 à 80 cm de hauteur (Ex : cultures industrielles).
- **Les tiges à croissance indéterminée** : leur croissance ne s'arrête pas tant que la condition écologique est favorable. De telles variétés demandent à être palissées (Anonyme, 2007).

## B- Les feuilles :

Les feuilles sont composées de 5 à 7 folioles principales, longues de 10 à 25cm et d'un certain nombre de petites folioles intercalaires ovales, un peu dentés sur les bords, grisâtre à la face inférieure. Elles sont souvent repliées en forme de cuillères ou même à bords roulés en dessus. Ces feuilles sont alternées sur la tige (**Raemaekers, 2001**) (**Fig 2**).



**Fig 2** : les feuilles et les tiges de la tomate (**Krid et Messati, 2013**)

## I.3.3 L'appareil reproducteur

### I.3.3.1 Les fleurs

Sont de couleur jaunâtre, regroupées en cyme. La fleur est généralement hermaphrodite, elle se compose :

- D'un calice formé par 5 sépales soudés verts.
- D'une corolle formée par 5 pétales jaunes soudés par leur base.
- De 5 étamines soudées entre elles et aux pétales
- D'un ovaire à deux carpelles soudés (**Raemaekers, 2001**) (**Fig 3**).



**Fig 3** : Fleur de la tomate (**Krid et Messati, 2013**)

### I.3.3.2 Le fruit

Est un une baie charnue à un ovaire élargi et contient plusieurs loges (fruits locaux) qui renferment des graines (ovules fécondés) enveloppées dans un placenta gélatineux. La maturité du fruit peut continuer même après la cueillette, c'est un fruit c (**Pntta, 1999**). En général les fruits sont ronds et réguliers ou côtelés (**Naika et al., 2005**) (**Fig 4**).

Selon **Caux et Foury (1994)**, chaque fruit contient un nombre important de graine qui varie de 80 à 500 graines par fruit. Elles sont recouvertes d'un mucilage qui présente à maturité un albumen et embryon à courbe, à germination épigée. La graine est petite (250 à 350 graines par gramme) et velue. Après le stade cotylédonaire, la plante produit 7 à 14 feuilles composées avant de fleurir (**Dore et Varoqaux, 2006**).



**Fig 4** : Les fruits de la tomate (**Krid et Messati, 2013**)

## I.4 Exigences de la tomate :

### I.4.1 Température :

Le *Lycopersicon esculentum* Mill est sensible au froid, craint beaucoup le gel, les vents chauds et très exigeant en température (**Polese, 2007**).

La tomate exige un climat relativement frais et sec pour fournir une récolte abondante et de qualité. Les températures optimales pour la plupart des variétés se situent entre 21 et 24°C. Les plantes peuvent surmonter un certain intervalle de températures, mais en dessous de 10 °C et au dessus de 38°C les tissus végétaux sont endommagés. L'équilibre et l'écart entre température diurne et nocturne, semblent nécessaire pour obtenir une bonne croissance et une bonne nouaison de la tomate (**Naika, 2005**) (**Tableau 2**).

**Tableau 2:** les températures moyennes aux différents stades végétatifs de la tomate. (Chaux, 1971).

Stade de développement	Température (°C)	
	T °C du sol	T°C de l'air
Germination	25°C	18-20 °C
Croissance	15 à 20 °C	jour 18-20 °C
		nuit 15 °C
Floraison	15 à 18 °C	jour 22-25°C
		nuit 13-17°C
Fructification	20 à 25 °C	jour 25 °C
		nuit 18 C

## I.4.2 Humidité relative, (H.R. %) :

Une humidité relative de 75 % est jugée optimale. Elle permet d'avoir des fruits de bons calibres, avec moins de gerçures et sans défaut de coloration.

Une HR trop élevée, couplée à une température élevée, entraîne une végétation luxuriante avec un allongement des entre-noeuds. Elle favorise aussi le développement des maladies, notamment le *botrytis* et le mildiou. L'aération matinale permet de réduire l'humidité de l'air et élimine les petites gouttelettes de condensation qui se forment sur la paroi du plastique. En cas de temps sec, l'irrigation peut augmenter l'HR. En période de production (Oct- Mai), l'HR diurne reste généralement proche de l'optimum (Pntta, 1999 ).

## I.4.3 Lumière :

La tomate n'est pas sensible au photopériodisme, mais, exigeante en énergie lumineuse. La longueur de l'obscurité est essentielle pour le contrôle de la croissance et le développement de la plante. Un faible rayonnement lumineux réduit le nombre de fleurs par bouquet et affecte la fécondation (Cirad et Gret, 2002). En outre, l'intensité de la lumière affecte la couleur des feuilles, la mise à fruits et la couleur des fruits.

## I.4.4 Sol :

### I.4.4.1 Structure et texture :

En général, la tomate n'a pas d'exigences particulières en matière de sol. Cependant, elle s'adapte bien dans les sols profonds, meubles, bien aérés et bien drainés. Une texture sablonneuse ou sablo-limoneuse est préférable (Pntta, 1999).

## I.4.4.2 pH :

La culture de la tomate tolère une large gamme de pH. Néanmoins sur des sols à Ph basique, certains micro-éléments (Fe, Mn, Zn, Cu) restent peu disponibles pour la plante.

Selon **Chaux et Foury (1994)**, ce taux de pH toléré varie de 4,5 à 8, 5. Le meilleur équilibre nutritionnel est assuré à des pH compris entre 6 et 7.

## I.4.5 Salinité

La tomate est classée parmi les plantes à tolérance modérée vis à vis de la salinité. Lorsque la conductivité électrique (CE) est de 4 mmhos/cm, soit 2,5 g/l de sels totaux, le rendement baisse de 10 %. Cependant, la baisse du rendement peut atteindre 25 % à une salinité de l'ordre de 4 g/l. L'impact de la salinité est plus grave sur le rendement, suite à la réduction du calibre du fruit (**Pntta, 1999**).

## I.4.6 Besoins hydriques :

Les besoins en eau de la tomate se situent entre 6000 et 7000 m<sup>3</sup>/ha (**I.T.D.A.S, 2006**).

La tomate est une plante assez sensible à la fois au déficit hydrique et à l'excès d'eau. Un déficit hydrique même de courte durée peut réduire réellement la production, de même un excès, notamment au stade de faible consommation peut provoquer l'asphyxie des racines et le dépérissement totale des plants (**Pntta, 1999**).

## I.5 Cycle de développement :

Le développement de la plante de tomate s'accomplit en passant par des phases successives caractéristiques (**Fig 5**) qui sont :

### I.5.1 Phase de germination

Les graines germent en 6 à 8 jours après le semis à la température optimale du sol (20 à 25C°) (**Van Der Vossen et al., 2004**). Au-dessus du sol apparaissent la tigelle et deux feuilles cotylédonaire simples et opposées. Dans le sol, la racine possède un manchon de poils absorbants bien visible. (**Mémento de l'agronome, 2003**).

### I.5.2 Phase de croissance

C'est la phase où la plante émet plus de racines et développe sa partie aérienne par l'émission des paires de feuilles.

La racine s'allonge et prend l'aspect d'un filament blanchâtre sur lequel apparaissent des racines secondaires. Les deux premières vraies feuilles apparaissent vers le 11<sup>ème</sup> jour. Elles ne sont bien développées que vers le 20<sup>ème</sup> jour. Au bout de premier mois environ, il y a 3 à 4 paires de feuilles. (**Mémento de l'agronome, 2003**).

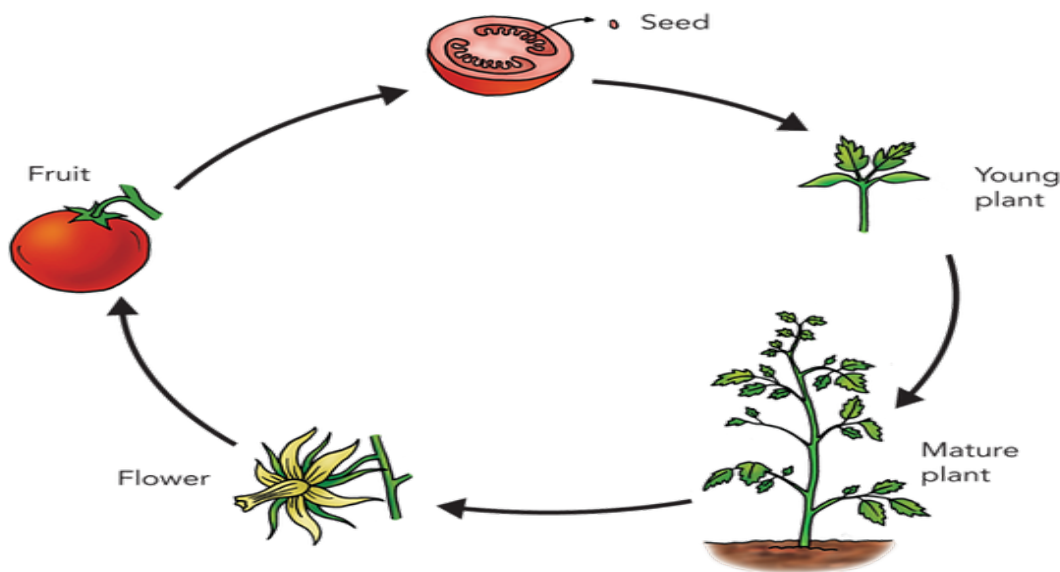
## I.5.3 Phase de floraison :

La première inflorescence, apparaît deux mois et demi environ après le semis. Les autres inflorescences vont apparaître au-dessus de la première, entre deux inflorescences, un nombre variable de feuilles. La floraison s'échelonne donc de bas en haut **(Mémento de l'agronome, 2003)**.

## I.5.4 Phase de fructification et de maturation :

Elle débute durant la phase de floraison. Elle commence par la nouaison des fruits de l'inflorescence de base et se poursuit par les inflorescences supérieures au fur et à mesure de l'apparition des inflorescences et de la fécondation des fleurs. Les fleurs se développent, grossissent et après avoir atteint leur taille définitive, ils commencent par perdre leur coloration verte au profit du jaune puis au rouge de plus en plus accentué.

Cette phase dure environ deux mois, soit de quatre à six mois après le semis. La durée du cycle végétatif complet de la tomate est de 4 à 5 mois environ pour les semis direct en pleine terre et de 5 à 6 mois pour les plants repiqués. En contre saison, le cycle végétatif s'allonge et il peut atteindre 7 mois **(Mémento de l'agronome, 2003)**



**Fig 5 :** Cycle de développement **(Mémento de l'agronome, 2003)**

## I.6 Les principales maladies ou ravageurs :

- Alternariose , mildiou de la tomate , pourriture grise ou Botrytis,..
- Chlorose, cul noir - Nécrose , éclatement de la tomate ,....
- *Tuta absoluta*,..... **(Polese, 2007)**.

## I.7 Importance économique et production actuelle:

### I.7.1 Importance Mondiale :

La tomate est cultivée dans de nombreux pays du monde 170 (FAO, 2009) et sous divers climats, y compris dans des régions relativement froides grâce au développement des cultures sous abri (FAO, 2009). La tomate peut être cultivée soit en plein air soit en serre.

- **La production en serre** : essentiellement en **Amérique du Nord** et en **Europe**, où les systèmes de production sont extrêmement intensifs et peuvent produire des rendements très élevés (jusqu'à **700 tonnes/ha**).
- **La production en plein air** : est beaucoup moins intensive, et c'est le système le plus courant dans les régions tropicales et subtropicales (FAO, 2009) (Fig 6).

### I.7.2 Production de la tomate :

La production de tomates connaît deux grandes filières :

- **Les tomates fraîches** : sont présentes quasiment toute l'année dans le commerce. Les nouvelles techniques de production ainsi la sélection génétique permettent à ce fruit d'être cultivé dans des zones géographiques d'où il était exclu quelques années, mais les progrès réalisés ont surtout visé à améliorer sa productivité ou son aspect (Polese, 2007).
- **Les tomates d'industrie** : destinées à la transformation et la conserve représentent environ la moitié de la production dans l'*Union européenne*, **80 %** aux "*États Unis*" (moyenne 1980-1987) (Chaux et Foury, 1994) et environ **15 %** en "*Chine*" (2008) (Heuvelink, 2009).

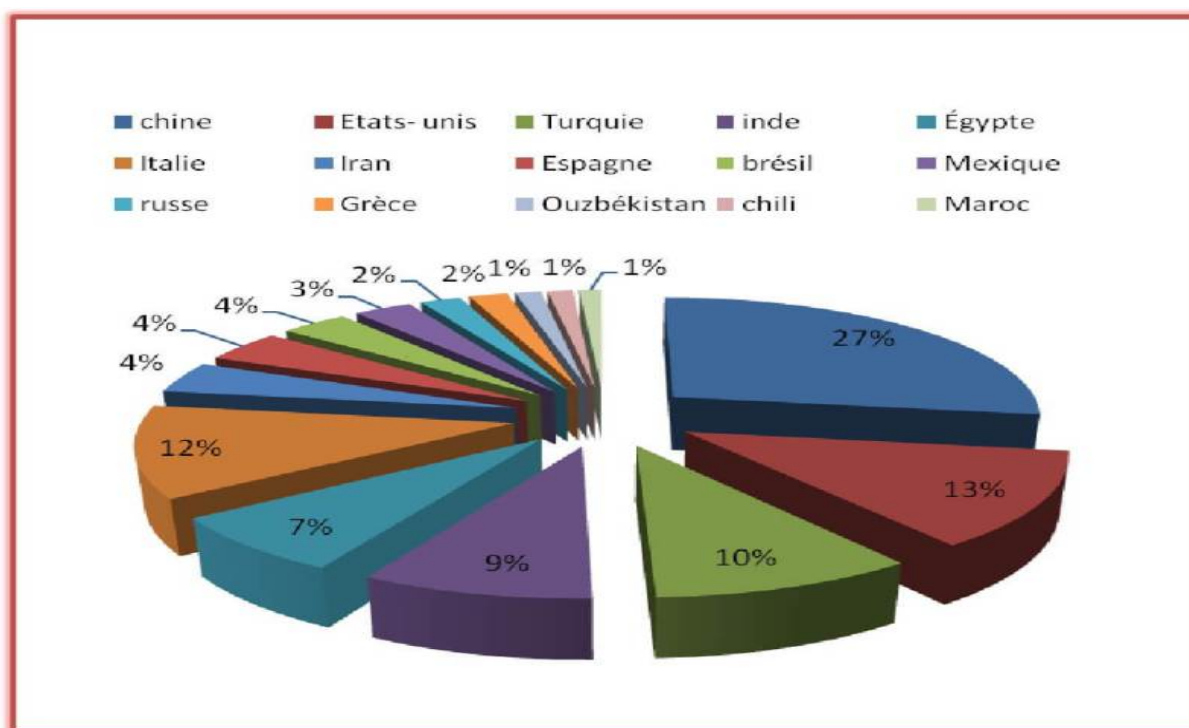


Fig 6:Les principaux pays producteurs de tomate dans le monde (1997-2007) (F.A.O, 2009)

**I.7.3 Importance en Algérie :**

La culture de la tomate occupe une place prépondérante dans l'économie agricole Algérienne. Près de 33 000 ha sont consacrés annuellement à la culture de tomate (Maraichère et industrielle), donnant une production moyenne de 11 millions de quintaux et des rendements moyen d'environ 311 Qx/ha (Madr, 2009). Ces derniers demeurent faibles et assez éloignés de ceux enregistrés dans d'autres pays du bassin méditerranéen (Tunisie, Maroc, Espagne, France, Italie) producteurs de tomate, où les rendements varient entre 350 Qx/ha à 1500Qx/ha (FAO, 2008). (Tableau 3 ).

**Tableau 3 :** Evolution de la production de la tomate en Algérie entre 2005-2009 (Madr, 2009)

Années	2005	2006	2007	2008	2009
Superficies (Ha)	21089	20436	20079	19655	20789
Production (Qx)	5137280.4	5489336	5673134	5592491	6410341
Rendement (Qx/Ha)	243.60	268.60	282.50	284.50	308.40

Les données du tableau n°3 montrent une augmentation de la superficie et de la production due à la consommation élevée de ce fruit notamment à compter de l'année 2005 qui se stabilise aux alentours de 20000 Ha avec une production moyenne de 5.570755 Qx. Cette augmentation de la production n'est pas liée uniquement à l'augmentation des superficies mais aussi aux techniques utilisées dans le calendrier cultural et l'entretien de la culture qui se sont améliorées progressivement (**Madr, 2009**).

**I.7.4 La production de la tomate à Mostaganem :**

Selon **L. Benamor (2015)** l'Algérie a produit l'équivalent de 70.000 tonnes de tomates. Et si les importations en tomate étaient de l'ordre de 35.000 tonnes. Nous envisageons aussi que nos importations de tomates soient nulles (0%) en 2016, avant d'en devenir des exportateurs en 2017 ».

La direction des services agricoles de wilaya (DSA) prévoit d'atteindre une production de 50 400 tonnes de tomate fraîche. Les prévisions tablent sur une hausse de 20% par rapport à l'année dernière. La superficie exploitée avoisine les 1 500 hectares. Le rendement à l'hectare se situe à 260 quintaux en plein champ et avec un climat favorable, le rendement moyen peut atteindre jusqu'à 300 q/ha (**DSA de Mostaganem, 2017**).

**I.8 Importance nutritionnelle :**

La consommation des fruits de la tomate contribue à un régime sain et équilibré (**Shankara et al., 2005**). Le fruit est riche potassium, antioxydants, magnésium, phosphore, vitamines A B-C et E, fibres et sels minéraux. La tomate est un allié de votre minceur car elle a un faible apport calorique (**Morard, 2013**).

# *Chapitre II*

### II.1 Généralités :

Il nous a été donné de constater, dans la bibliographie consultée, que le terme "métaux lourds" possède de nombreux synonymes, tels que : « éléments traces » « éléments rares » ; « oligoéléments » ; « éléments essentiels, non essentiels » ; etc.... (Adriano, 2001).

### II.2 Définition des métaux lourds :

D'un point de vue purement chimique, les éléments de la classification périodique formant des cations en solution sont des métaux.

D'un point de vue physique, le terme « métaux lourds » désigne les éléments métalliques naturels, métaux ou dans certains cas métalloïdes (environ 65 éléments), caractérisés par une forte masse volumique supérieure à 5 g.cm<sup>3</sup> (Adriano, 2001).

D'un point de vue biologique, on en distingue deux types en fonction de leurs effets physiologiques et toxiques : métaux essentiels et métaux toxiques (Tableau 4).

- **Les métaux essentiels** sont des éléments indispensables à l'état de trace pour de nombreux processus cellulaires et qui se trouvent en proportion très faible dans les tissus biologiques (Loué, 1993). Certains peuvent devenir toxiques lorsque la concentration dépasse un certain seuil. C'est le cas du cuivre (Cu), du nickel (Ni), du zinc (Zn), du fer (Fe). Par exemple, le zinc (Zn), à la concentration du millimolaire, est un oligo-élément qui intervient dans de nombreuses réactions enzymatiques (déshydrogénases, protéinase, peptidase) et joue un rôle important dans le métabolisme des protéines, des glucides et des lipides (Kabata-Pendias et Pendias, 2001). D'autre part, le trouble apporté à une action enzymatique par une déficience en oligo-élément se traduit par une altération d'un fonctionnement particulier qui se répercute évidemment sur le fonctionnement général (Coïc et Coppenet, 1989).
- **Les métaux toxiques** ont un caractère polluant avec des effets toxiques pour les organismes vivants même à faible concentration. Ils n'ont aucun effet bénéfique connu pour la cellule. C'est le cas du plomb (Pb), du mercure (Hg), du cadmium (Cd).

Le terme métaux lourds, « heavy metal », implique aussi une notion de toxicité. Le terme « éléments traces métalliques » est aussi utilisé pour décrire ces mêmes éléments, car ils se retrouvent souvent en très faible quantité dans l'environnement (Baker et Walker, 1989).

Dans ce contexte, nous utiliserons le terme « métaux lourds » dans le sens de l'impact toxique sur les humains et les environnements.

**Tableau 4 :** Classification de quelques métaux lourds selon leur densité et leur toxicité (Bliefert et Perraud, 2003)

Métaux	Plantes	Animaux	Densité g/cm <sup>3</sup>
Cd	T	T	8.65
Cr		E	7.20
Cu	ET	ET	8.92
Ni	T	E	8.90
Pb	T	T	11.34
Zn	ET	E	7.14
Mn	ET	E	7.20

T= toxique ; E= Essentiel

### II.3 Origine de la contamination des sols par les métaux lourds :

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

#### II.3.1. Origine naturelle :

Les métaux lourds sont présents naturellement dans les roches, ils sont libérés lors de l'altération de celles-ci pour constituer le fond géochimique (Bourellier et Berthelin, 1998).

La concentration naturelle de ces métaux lourds dans les sols varie selon la nature de la roche, sa localisation et son âge.

#### II.3.2 Origine anthropique :

Cependant, la source majeure de contamination est d'origine anthropique. Au cours des décennies dernières, l'apport de métaux lourds au sol dans le monde s'est étendu ; à l'heure actuelle on l'estime à 22000 tonnes de cadmium, 939000 t de cuivre, 783000 t de plomb, et 1350000 t de zinc (Singh *et al.*, 2003). Les principaux types de pollutions anthropiques responsables de l'augmentation des flux de métaux, sont :

**II.3.2.1 La pollution atmosphérique :** Résulte des activités industrielles (rejets d'usine) et urbaines (gaz d'échappement, etc...). Il faut distinguer les apports diffus aériens d'origine lointaine (les poussières et aérosols provenant des chauffages ainsi que des moteurs d'automobiles) des apports massifs localisés d'origine proche (résultent d'apports anthropiques accidentels liés aux activités industrielles sans protection efficace contre la dispersion dans l'environnement) (Baize, 1997).

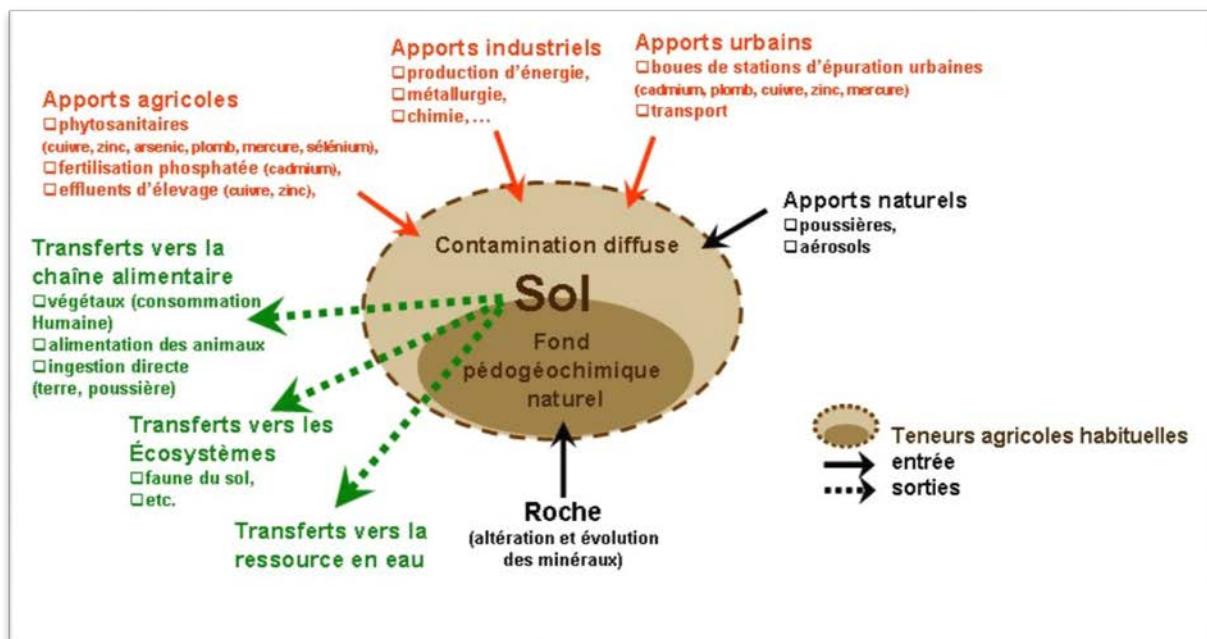
**II.3.2.2 La pollution industrielle :** provenant des usines de production de l'activité humaine tels que les matières organiques et graisses (industries agro-alimentaires), les produits chimiques divers (industries chimiques), les matières radioactives (centrales nucléaires,

traitement des déchets radioactifs) et la métallurgie (Godin *et al.*, 1985). Les déchets miniers et les terrils industriels sont une source particulièrement importante de pollution par le zinc, le plomb et le cadmium.

**II.3.2.3 La pollution liée aux activités agricoles :** est à l'origine de l'introduction de métaux lourds dans le sol. Les produits destinés à améliorer les propriétés physico-chimiques du sol sont souvent plus riches en métaux lourds que le sol lui-même par exemple les engrais, les composts et les boues de station d'épuration (Robert et Juste, 1999).

### II.3.3 Toxicité :

Le rôle des pratiques industrielles et agricoles dans la contamination des sols doit être pris en compte : cela concerne une grande partie du territoire. Leur accumulation et leur transfert constituent donc un risque pour la santé humaine via la contamination de la chaîne alimentaire, mais aussi pour le milieu naturel dans son ensemble (Bourellier et Berthelin, 1998) (Fig 7).



**Fig 7:** Origine des métaux lourds dans le sol (Robert et Juste, 1999)

### II.4 Mobilité et biodisponibilité des métaux lourds :

La toxicité d'un métal dépend de sa spéciation (forme chimique) autant que des facteurs environnementaux (Babich, 1980). Dans le sol, les métaux lourds peuvent exister sous forme d'ion libre ou sous forme liée à des particules de sol. Cependant, un métal n'est

toxique pour les organismes vivants que s'il est sous forme libre ; il est alors biodisponible. Comme tout élément chargé positivement, les cations métalliques peuvent interagir dans le sol avec toute particule organique ou minérale chargée négativement.

L'équilibre entre les formes libres et fixées de l'ion va dépendre sa biodisponibilité, directement liée à sa toxicité. Enfin, la biodisponibilité des métaux lourds varie en fonction de plusieurs facteurs du sol. Parmi lesquels, la capacité d'échange de cation (CEC), le pH, le potentiel redox (Eh), la teneur en phosphate disponible, la teneur en matière organique et les activités biologiques (**Babich, 1980**).

### II.4.1 La teneur en argile :

Les argiles, de par leurs propriétés physico-chimiques, jouent un rôle très important dans la disponibilité des métaux lourds. **Li (2000)** ont montré que les métaux lourds peuvent être absorbés et immobilisés par les minéraux argileux ou également être complexés par la matière organique du sol en formant alors un complexe organométallique (**Lamy, 2002**). En effet, la charge électronégative des argiles les rend aptes à contracter des liaisons électrostatiques avec toute entité chargée positivement, comme les cations métalliques. Ces liaisons sont réversibles et les cations fixés sont échangeables : ils peuvent être remplacés par d'autres cations présents dans la phase aqueuse du sol. Cette capacité d'échange de cations (CEC) exprimée en milliéquivalents pour 100 g est une caractéristique importante de chaque argile qui conditionne grandement la biodisponibilité d'un métal dans le sol.

### II.4.2 Le pH :

Le pH est un autre facteur important influençant la solubilité et la spéciation du métal et donc sa toxicité (**Babich et Stotzky, 1977a et b**). Quand le pH diminue d'une unité, la concentration des cations métalliques libres augmente d'environ un facteur 2 dans la solution de sol et par conséquent améliore la phytoextraction (**Christensen, 1984 ; Sanders, 1983 ; Sanders et al., 1986**). Les organismes et les microorganismes eux-mêmes peuvent influencer la disponibilité des métaux lourds dans leur environnement proche par acidification locale lors d'une réaction métabolique ou par la production de composés complexant les métaux lourds (**Giller et al., 1998**).

### II.4.3 Le potentiel redox (Eh) :

Le potentiel redox (Eh) permet de caractériser les échanges d'électrons entre les espèces chimiques. Ainsi, les faibles valeurs d'Eh favorisent la dissolution des hydroxydes et entraînent une augmentation de la concentration des métaux associés avec des composants

(Chaignon, 2001). De plus, la modification du degré d'oxydation des ligands ou des éléments se liant avec le métal influence indirectement la solubilité des métaux lourds. Par exemple, en conditions réductrices, les sulfates sont réduits en sulfure qui piègent volontiers les éléments métalliques tels que Pb, Cd, Zn (Deneux-Mustin *et al.*, 2003). Bien que l'influence des conditions oxydoréductrices du sol semble très importante au regard de la mobilité des éléments métalliques, il n'en demeure pas moins que ce facteur apparaît souvent comme secondaire par rapport au pH. En effet, pour un sol donné l'Eh varie en fonction inverse du pH, il augmente quand le pH diminue (Deneux-Mustin *et al.*, 2003).

### II.4.4 L'activité biologique :

La compréhension globale des phénomènes biologiques jouant sur la solubilité des métaux lourds dans les sols est rendue difficile par la multiplicité des actions et interactions à tous les niveaux. Nous nous attacherons à développer principalement l'action des microorganismes et des végétaux supérieurs.

Parmi les microorganismes on retrouve de nombreuses populations bactériennes et fongiques dont les activités métaboliques influencent la mobilité des métaux lourds. Cependant, beaucoup de ces phénomènes sont également communs aux plantes (Deneux-Mustin *et al.*, 2003)

#### II.4.4.1 Les modes d'action sur la mobilité des polluants métalliques :

Les principaux modes d'action sur la mobilité des polluants métalliques sont :

**a- La solubilisation :** provient de la production de composés acides tels que les acides carboxyliques, phénoliques, aliphatiques, nitrique et sulfurique.

✚ **Certaines bactéries** chimiolithotrophes (*Thiobacillus*, *Leptospirillum*, *Galionella*) oxydent les formes réduites du fer et du soufre contenues dans les sulfures et produisent de l'acide sulfurique, susceptible de dissoudre les silicates, les phosphates, les oxydes et les sulfures, libérant ainsi les métaux lourds.

✚ **Les champignons** et les racines des plantes excrètent eux aussi des acides afin d'augmenter leur absorption de nutriments, ou tout simplement comme déchets métaboliques (Foy *et al.*, 1978 ; Chaignon, 2001 ; Deneux-Mustin *et al.*, 2003). Cette acidification favorise aussi la mobilité des autres éléments qui ne sont pas indispensables pour le métabolisme végétal.

✚ **D'autre part plusieurs autres molécules organiques**, capables de complexer spécifiquement certains éléments en solution, peuvent être également libérées en cas de carence nutritive. Parmi ces agents complexants, les sidérophores,

composés organiques de faible masse moléculaire, produits par les bactéries et les champignons mais aussi par les plantes. Ces molécules favorisent les déplacements d'éléments métalliques et un transfert diffusif se fait jusqu'aux plantes dans lesquelles ils s'accumulent (**Chaignon, 2001**).

- b- L'insolubilisation** : constitue le phénomène opposé. Bien que le phénomène de détoxification externe des métaux lourds par des exsudats racinaires n'ait jamais été démontré (**Baker et Walker, 1990**), certains acides organiques de faible masse moléculaire, comme les acides oxalique, citrique ou fumarique qui interviennent dans la complexation intracellulaire d'éléments nutritifs, peuvent être sécrétés dans le milieu extérieur. Ils limiteraient ainsi les transferts par des processus de complexation.
- c- La volatilisation** : repose sur l'action directe de certains microorganismes sur le degré d'oxydation de l'espèce métallique. C'est le cas du mercure, de l'arsenic et du sélénium (Se). La biométhylation permet le transfert de groupements méthyl directement aux atomes, Pb, Sn (étain), As, Sb (antimoine) et Se, permettant leur volatilisation dans l'atmosphère (**Baker et Walker, 1990**).

### II.5 Le cuivre :

#### II.5.1 Origine :

Le cuivre est un métal largement répandu dans la nature sa concentration moyenne dans la croûte terrestre serait comprise entre 45 et 70mg/kg selon les auteurs (**Baize, 1997**) ; elle est de l'ordre de 50ppm (**Sittig, 1975 ; in AFEE, 1979**). On peut le trouver dans la nature soit sous forme libre dans la cuprite (88,8%) soit sous forme d'oxyde de sulfure. Il est particulièrement abondant dans les roches mafiques et intermédiaires.

Les teneurs les plus élevées (> 80mg/kg) seraient observées dans les roches magmatiques basiques riches en minéraux ferromagnésiens. Les roches granitiques contiennent en général beaucoup moins de cuivre (**Baize, 1997**). Parmi les roches sédimentaires, argiles et schistes présentent des concentrations plus fortes que les roches détritiques (grés, sable) (**Coïc et Tendille, 1971**). Il est au contraire très peu représenté dans les roches carbonatées.

#### II.5.2 Le cuivre dans le sol :

Les teneurs moyennes en Cu d'un sol non contaminé, sont comprises entre 13 et 24ppm (**Coullery, 1997**). Rousseaux (1988) donne une concentration maximale "normale" de 100ppm et une moyenne dans les sols de 20ppm. Les moyennes les plus élevées sont rencontrées dans les chernozems et les sols châtaîns. Les teneurs les plus basses sont

observées dans les podzols et dans les histosols. Les ferrasols et les fluvisols peuvent également contenir des teneurs élevées en Cu (**Kabata-Pendias and Pendias, 1992**).

Aux teneurs naturelles, les sols se trouvent également enrichis par l'utilisation excessive de fertilisants et de produits agro sanitaires tels que les insecticides, les fongicides, les algicides qui sont à la base de sels de cuivre, notamment les sulfates de cuivre, l'utilisation directe des boues d'épuration sans oublier l'activité industrielle (bains de décapage et bains de plaquage dans l'industrie du cuivre et de ses alliages) ; les eaux de drainage des régions minières ; l'industrie électrique, les activités urbaines (ordures ménagères, brûlage de comestibles, circulation automobiles salage des routes ; etc (**Kabata-Pendias and Pendias, 1992**).

### II.5.3 Comportement du cuivre dans le sol : spéciation et mobilité

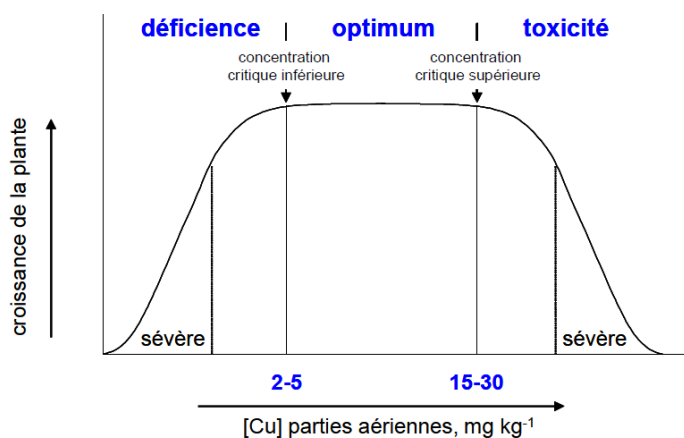
Les nombreuses formes minérales libérées au cours des processus d'altération sont très solubles (**Coullery, 1997**) notamment en milieu acide. Le Cu est donc considéré comme l'élément le plus mobile des métaux lourds, par référence aux processus supergènes. Bien que la formule la plus commune soit, dans les sols,  $\text{Cu}^{++}$  ; de nombreuses espèces chimiques sont également libérées au cours des processus d'altération. Parmi elles :  $\text{Cu}^+$  ;  $\text{CuOH}^+$  ;  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  ;  $\text{CuO}$  ;  $\text{Cu}(\text{OH})_2\text{CO}_3$  ;  $\text{CuCO}_3$  ;  $\text{Cu}(\text{CO}_3)_2^{--}$  ;  $\text{Cu}(\text{OH})_3^-$  ;  $\text{Cu}(\text{OH})_4^{--}$  ;  $\text{CuO}_2^{--}$  . De même quelques formes incluses au sein des minéraux : Cu-O-Fe ; Cu-O-Al ; Cu-O-Mn. Tous les ions cuivre sont fortement liés aux sites d'échange minéraux et organiques.

Selon **Hodgson et al.(1966)**, 98% du Cu soluble dans le sol se trouvent complexés par la matière organique, alors que **Kabata-Pendias et Pendias (1986)** estiment que seulement 80% du cuivre soluble est sous forme chélatée. Le Cu réagit très facilement avec les surfaces sorbantes et les constituants organiques du sol. Il est facilement précipité en présence de différents anions, plus particulièrement les anions sulfures, carbonates, hydroxydes. De sorte que finalement le Cu est très peu mobile dans les sols (**Kabata-Pendias and Pendias, 1992**), sauf dans les conditions extrêmes d'acidité (podzols) ou de gleyfication (**Baize, 1997**). Ceci fait que le principal danger du Cu vient de son accumulation à la surface des sols. Il semble que dans les sols cultivés très pauvres en argile, sable ou limon, les apports massifs opérés en surface (traitement fongicide) soient capables de migrer en profondeur.

### II.5.4 Le cuivre dans la plante

Le cuivre est l'un des sept oligoéléments essentiels à la nutrition des plantes, aux côtés de Zn, Mn, Fe, B, Mo et Cl, dont le caractère essentiel a été fermement établi dans les années 1930 (**Adriano, 2001**). Cet oligoélément n'est requis qu'en très faible quantité et les

teneurs adéquates de Cu dans les parties aériennes s'élèvent à 5-20 mg kg<sup>-1</sup> de matière sèche suivant le stade de développement et l'espèce considérés. Au-delà du seuil de toxicité de 15-30 mg kg<sup>-1</sup> dans les parties aériennes, Cu peut être phytotoxique (**Davis et Beckett, 1978 ; Macnicol et Beckett, 1985 ; Marschner, 1995 ; Reuter et Robinson, 1997**) (Fig 8).



**Fig 8 :** Courbe de croissance en réponse au statut nutritionnel de la plante (d'après **Reuter et Robinson 1997**)

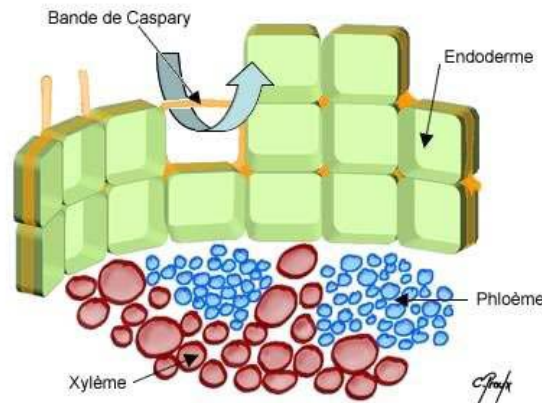
### a. L'absorption :

Les mécanismes qui contrôlent l'accumulation des ETM par les racines ne sont pas encore bien connus (**Hasan et al., 2009**). Les ETM pourraient pénétrer dans la racine par diffusion passive (sans implication d'énergie et de processus métaboliques) ou par voie active (nécessitant une dépense d'énergie et l'implication de transporteurs) (**Kabata et Pendias et Pendias, 2001**). L'absorption des ETM adsorbés aux parois cellulaires semble être contrôlée par le gradient de potentiel électrochimique entre le cytosol et l'apoplaste, lequel a une sélectivité assez faible (**Clemens et al., 2002**).

L'absorption de Cu à l'intérieur des cellules racinaires semble néanmoins dépendre de transporteurs spécifiques de la membrane plasmique présentant une haute affinité pour Cu<sup>+</sup>, les transporteurs COPT (Copper Transporter) (**Puig et al., 2007**). Ces transporteurs appartiennent à la famille CTR (Conserved Copper Transporter) qui est impliquée dans le transport de Cu de l'extérieur vers le cytoplasme de cellules eucaryotes (ex : levures, mammifères).

Des travaux tendent d'ailleurs à mettre en évidence le rôle de COPT1 dans l'absorption racinaire de Cu chez *Arabidopsis* (**Sancenon et al., 2004**). D'autre part, Cu est très fortement lié aux groupes fonctionnels de l'apoplaste dans les racines (**Mengel et Kirkby, 2001**). L'adsorption spécifique de Cu sur les parois cellulaires pourrait être une étape préliminaire importante dans le processus d'absorption, et, à l'instar de Fe apoplasmique, Cu

apoplasmique pourrait être mobilisé sous déficience en Cu (Graham, 1981 ; Von Wirén *et al.*, 1995) ( Fig 9).



**Fig 9** : Structure de l'endoderme et passage des éléments par la voie symplastique du fait de la présence de cellules subérisées au niveau des bandes de Caspary (d'après Bourbonnais, 2007).

### b. Distribution du cuivre dans la plante

La distribution de Cu entre les racines et les parties aériennes varie selon l'espèce, le cultivar et les conditions environnementales (Loneragan, 1981). De nombreux travaux ont mis en évidence une accumulation de Cu dans les racines chez diverses espèces : maïs (*Zea mays L.*) (McBride, 2001 ; Ali *et al.*, 2002), blé tendre (*Triticum aestivum L.*) (Chaignon *et al.*, 2002b), colza (Chaignon *et al.*, 2002a) tomate (Chaignon *et al.*, 2002a ; Cornu *et al.*, 2007), niébé (*Vigna unguiculata L.*) (Kopittke et Menzies, 2006), Chloris gayana Knuth. (Sheldon et Menzies, 2005). Le cuivre racinaire est principalement apoplasmique, donc non absorbé à l'intérieur des cellules (Graham, 1981 ; Marschner, 1995 ; Chaignon *et al.*, 2002b). En effet, les parois cellulaires (ou pectocellulosiques) sont constituées d'un réseau de cellulose, pectines et glycoprotéines poreux et se comportent comme des échangeurs d'ions spécifiques (Allan et Jarrell, 1989).

Le cuivre peut ainsi être adsorbé sous forme cationique par les charges négatives des groupes fonctionnels des parois cellulaires qui sont déprotonés à pH neutre ou alcalin (particulièrement les groupes -COOH). Lors de la translocation vers les parties aériennes, Cu serait principalement transporté dans le xylème complexé par des acides aminés (histidine, voire nicotianamine) (Pich et Scholz, 1996 ; Liao *et al.*, 2000a) et des acides organiques (citrate) (Puig *et al.*, 2007).

Le cuivre présente une mobilité limitée à la fois dans les racines et dans les parties aériennes. Les jeunes organes aériens sont par conséquent souvent les premiers sites à développer des symptômes de déficience en Cu (**Kabata-Pendias et Pendias, 1992**). D'autre part, étant donné les propriétés redox de Cu et ses fortes capacités de complexation, Cu est normalement présent à l'intérieur des cellules, dans le cytoplasme et principalement dans la vacuole, sous forme de complexes avec des chélateurs capables de tamponner la concentration en espèce ionique libre : anions organiques (citrate, malate), acides aminés (histidine, nicotianamine), métallothionéines et phytochélatines (**Marschner, 1995 ; Clemens, 2001 ; Dučić et Polle, 2005**).

### II.5.5 Rôle physiologique du cuivre:

L'application du cuivre dans la chaîne photosynthétique a été démontrée par plusieurs auteurs. En effet, 70% du cuivre disponible dans la plante est localisé dans les chloroplastes. Le cuivre intervient aussi dans la formation de la lignine qui est parmi les éléments qui confèrent à la cellule son élasticité ainsi que sa stabilité.

Par ailleurs, l'implication du cuivre dans le processus de fixation biologique de l'azote et dans la régulation de l'absorption du manganèse. En présence d'une carence en cuivre, l'absorption de manganèse s'accélère conduisant ainsi à la toxicité de la plante. Ce phénomène s'observe surtout dans les sols acides (**Mengel et Kirkby, 2001**).

### II.5.6 Phytotoxicité :

Le maximum "normal", rencontré dans les plantes, selon **Rousseau (1988)**, est de 15ppm MS. Le cuivre représente un danger quand il est présent en concentration élevée dans l'environnement. Par son action sur les racines des plantes, le cuivre altère leur développement et la perméabilité de leur membrane cellulaire causant le lessivage de certains ions ( $K^+$  ;  $PO_4^{---}$ ) (**Kabata-Pendias et Pendias, 1992**). Il en résulte des effets toxiques sur les plantes et des baisses de rendement. D'après **Coïc et Coppenet (1989)**, des teneurs totales en Cu  $\leq 7$ ppm entraînent des carences cupriques et en revanche des toxicités apparaissent au-delà de 180ppm.

### II.5.7 Toxicité pour l'homme :

Chez l'homme, des symptômes de toxicité aiguë se manifestent par des diarrhées, nausées, vomissements, irritations intestinales. 1gramme de  $CuSO_4$  constitue une dose mortelle ; pour plus de 44 mg/l d'eau de boisson, il y a manifestation de gastro-entérites. La toxicité chronique du cuivre n'a pas été démontrée chez l'homme, mais une partie de la population y est sensible : maladie de Wilson. (**Puig et al., 2007**).

### II.6 Zinc :

#### II.6.1 Origine.

La teneur moyenne en Zinc de la croûte terrestre serait comprise entre 70 et 132 mg/kg (**Baize, 1997**). Zn apparaît distribué de manière relativement uniforme au sein des roches magmatiques. Les roches mafiques contiennent toutefois un peu plus de Zn (80 à 120ppm) que les roches acides (40 à 60ppm). Les roches des sédiments argileux et les schistes renferment comme les roches mafiques 80 à 120ppm de Zn. Les roches carbonifères et les grès en sont pauvres de 10 à 30ppm.

#### II.6.2 Le zinc dans le sol :

Dans le sol, Zn est présent le plus souvent sous forme de sulfure (Blende =ZnS) dans les filons hydrothermaux et les gîtes stratiformes imprégnant les roches sédimentaires où il se trouve associé au Pb, Cu et Fe. Il peut également substituer  $Mg^{++}$  au sein du réseau cristallin des silicates. La teneur totale moyenne est de l'ordre de 50ppm (**Lindsay, 1979 ; in Abdul-Rida, 1992**). **Coullery (1997)** donne une moyenne mondiale en Zn de 64ppm. **Rousseau (1988)** trouve un maximum "normal" de 300ppm avec une moyenne de 50ppm. Zn est lié dans le sol aux oxydes de fer hydratés et Aluminium (14 à 38 % de Zn total) et aux argiles (24 à 63 %) (**Kabata-Pendias and Pendias, 1986**).

Le sol peut être également enrichi par les apports anthropogènes : activités minières et industrielles, épandage agricole, activités urbaines et trafic routier. Il y a peu de sols contaminés de façon géogène par le Zn. A peu près toutes les surfaces contenant des quantités importantes de Zn sont les résultats d'activités humaines. Les apports du Zn par voie atmosphérique sont attestés par de nombreux travaux : **Meyer (1991) ; Desaulles et Studer, (1993) ; Navarre et al.(1980)**.

#### II.6.3 Comportement du zinc dans le sol : spéciation et mobilité.

Le  $Zn^{++}$  est considéré comme très mobile (**Alloway, 1995**). Les formes les plus mobiles seraient facilement adsorbées par les constituants organiques et minéraux du sol, de sorte que Zn tendrait à s'accumuler dans les horizons de surface de la plupart des solums (**Juste et al., 1995**).

Les minéraux argileux et les substances humiques sont capables de fixer Zn très fortement de sorte que la solubilité de  $Zn^{++}$  dans les sols apparaît moindre que celle de  $Zn(OH)_2$ ,  $Zn(CO_3)$ ,  $Zn(PO_4)$ . La fraction mobile de Zn représente 1 à 20% et ses complexes avec la matière organique 1.5 à 2.3% (**Kabata-Pendias and Pendias, 1986**).

Selon **Hodgson et al. (1966)** en moyenne 65% de Zn soluble dans les sols se trouvent associés aux amines et aux acides fulviques, tandis que les complexes insolubles sont associés aux acides humiques.

### II.6.4 Le zinc dans la plante :

#### a. L'absorption :

D'anciens travaux indiquaient que le zinc est assimilé de façon majoritaire sous la forme  $Zn^{+2}$ , qui est également la forme sous laquelle il est transporté dans la plante.

**KabataPendias et Pendias (1992)** avaient ainsi rapporté une relation linéaire entre la concentration dans la solution du sol, ou le sol, et la concentration dans la plante. Puis, les travaux de **Von Wiren et al. (1995)** ont proposé deux voies pour l'assimilation du zinc par les graminées : le transport du cation libre ou l'assimilation sous forme chélatée aux phytosidérophores. Plus récemment, les gènes codant pour les transporteurs du zinc, appelés de façon générale ZIP (Zinc-regulated transporters, Iron-regulated transporter-like Protein), ont été identifiés et séquencés. Ces travaux ont été conduits sur des plantes hyperaccumulatrices ou non (*Thlaspi caerulescens* et *Arabidopsis thaliana*) par différentes équipes (**Grotz et al., 1998 ; Lasat et al., 1999 ; Van der Zaal et al., 1999**). Depuis, il a été montré que ces ZIP sont également impliqués dans le transport d'autres métaux (**Guerinot, 2000 ; Wintz et al., 2003**).

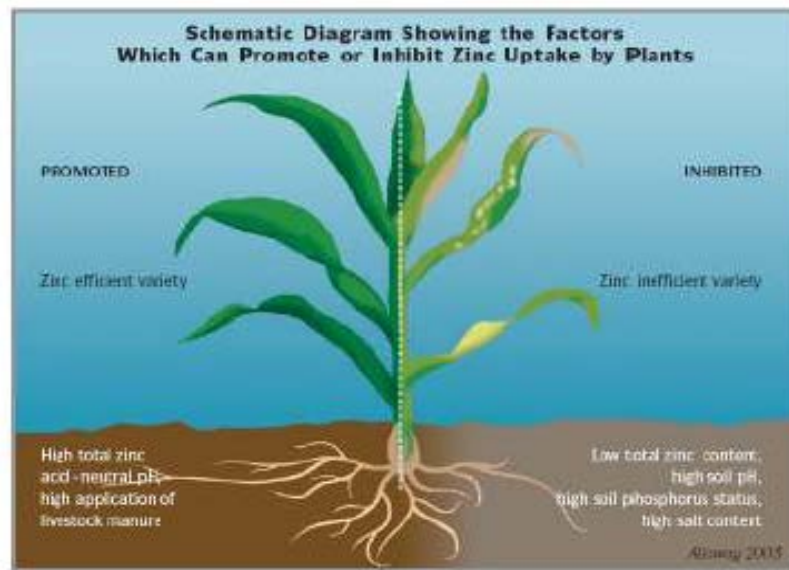
#### b-Distribution :

Le zinc est plus mobile au sein de la plante que le cuivre, cependant, les racines contiennent de plus grandes quantités que les parties aériennes, en particulier lorsque les apports sont importants.

Dans le cas d'une consommation de luxe, le zinc peut être déplacé des racines vers les parties aériennes où ils se concentrent dans les chloroplastes, les vacuoles et les membranes cellulaires. Lors de la translocation, le zinc est chélaté à des acides organiques (**Tremel-Schaub et Feix, 2005**). Mais la mobilité du Zn vers les tissus les plus jeunes est nettement plus faible encore dans les plantes déficientes en Zn.

L'interaction entre le zinc et le phosphore sur la translocation du zinc a été rapportée par différents auteurs. Ainsi, des déficiences en zinc peuvent être induites avec des faibles doses de phosphore du fait d'une inhibition de la translocation du zinc plus qu'une réduction de l'absorption et de la teneur dans les racines. D'autre part, certaines interactions entre éléments peuvent affecter les transports de Zn ; ce sont essentiellement des relations Fe/Zn et

Cu/Zn et, P/Zn. Il est incontestable que les plantes très fortement alimentées en P présentent des troubles dans le transport et le métabolisme de Zn (Loué, 1993) ( Fig 10).



**Fig 10** : Facteurs influençant la phytodisponibilité du zinc pour les végétaux (Alloway, 2004)

### II.6.5 Rôle physiologique de zinc:

Elément indispensable dans le métabolisme de la plante, le zinc est l'activateur de l'enzyme anhydrase carbonique, enzyme essentielle pour l'utilisation de l'acide carbonique .

Le zinc est un activateur de plusieurs autres métallo-enzymes, c'est le cas des déshydrogénases en particulier, la déshydrogénase de l'acide glutamique déshydrogénase de l'acide lactique et la déshydrogénase de l'alcool, ainsi que certains protéases et peptidases.

De même, le zinc contrôle la synthèse de l'acide indolacétique qui est un régulateur de croissance très important pour la plante, et augmente la résistance des plantes aux maladies fongiques. (Tremel-Schaub et Feix, 2005).

### II.6.6 Phytotoxicité :

Les teneurs de Zn dans les plantes varient entre 25-200ppm. D'après Rousseau le maximum "normal" est de 150mg/kg MS. L'excès de Zn peut provoquer une toxicité (coton sur sol acide) (Tremel-Schaub et Feix, 2005).

Chez l'homme on observe une toxicité aiguë par le Zn, mais à très forte concentration, se manifestant par des nausées, des vomissements, une rigidité musculaire et une irritation des muqueuses ; alors qu'il occasionne dans l'eau une très forte astringence dès 5mg/l (Meyer, 1991).

# *Partie Expérimentale*

# *Chapitre III*

# *Matériel et méthodes*

### III.1 Objectif :

L'objectif de ce travail porté sur l'effet toxique des métaux lourds ; le cas du cuivre et du zinc sur les paramètres de la tomate :

- **Les paramètres morphologiques :** Nombre de feuilles, surface foliaire, hauteur de la tige, la longueur des racines.
- **Les paramètres physiologiques :** Teneur relative en eau des feuilles (RWC), taux de déperdition d'eau (R.W.L).

L'ensemble de ce travail a été réalisé au laboratoire de l'institut national de protection des végétaux de la wilaya de Mostaganem.

### III.2 Matériel végétal :

La variété de la tomate (« *Lycopersicum esculentum* Mill » choisie dans notre travail est Saint pierre. Elle est utilisée par les agriculteurs de la région de Mostaganem.

### III.3 Dispositif expérimental:

Le sable récupéré au bord de la plage de la wilaya de Mostaganem est tamisé préalablement par un tamis à maille de 2 mm après il a subit plusieurs traitements successifs. (Avec l'eau de robinet, HCl, Eau distillé.) (**Fig 11**)

Les cylindres utilisés ont 50 cm de hauteur et 20 cm de diamètre. Ils sont tapissés au fond par du gravier pour assurer le drainage suivi par un remplissage d'un substrat constitué d'un mélange de sable et de terreux à raison de 2 V/V respectivement. Les composants du substrat sont bien mélangés afin de les homogénéiser (**Fig 12,13**).



(A): Tamisage du sable



(B): Traitement avec HCL



(C):Rrinçage à l'eau



(D) : Séchage du sable à l'air libre



(E): Le substrat (le sable avec le terreau)

**Fig 11:** Les étapes de la préparation du substrat.



(A): Tapisser le fond du cylindre par le gravier (B) : Remplissage du cylindre par le substrat

**Fig 12 :** Remplissage des cylindres par le substrat.



**Fig 13 :** Dispositif expérimental

## III.4 Conduite de l'essai :

### III.4.1 Germination :

Les graines de la tomate sont désinfectées durant 5 min dans une solution à 50% d'hypochlorite de sodium. Puis elles sont mis à germer dans des boites de pétri tapissés de papier filtre imbibé d'eau distillé (témoin). La germination est réalisée à l'obscurité et à 25C°(Fig 14).

a) **Le taux de germination est le rapport des graines germées sur les graines semées.**

$$\text{Taux de germination} = \frac{\text{Graines germés}}{\text{les graines a semés}} \times 100$$

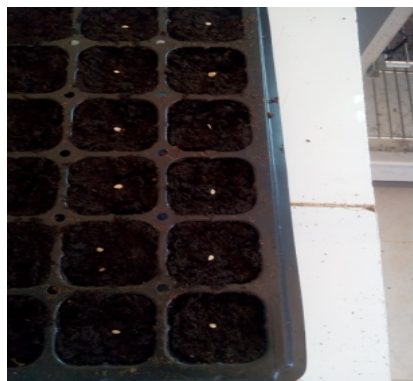


**Fig 14 :** les graines mis à germer dans une boite Pétri.

### III.4.2 Semis :

L'expérimentation a été menée dans une serre non contrôlée (Température, humidité).

Les graines sont semées dans des plateaux alvéolés (**Fig 15**) dans la tourbe à raison 1 plant/alvéole pendant une période de 20 jours à 25C° pour assurer une bonne germination.



**Fig 15 :** Semis dans des plateaux alvéolés

### III.4.3 Le repiquage :

Le repiquage des plantules de tomate dans les cylindres à raison de 1 plant par cylindre a eu lieu le 08 février 2017. Les plantes sont conservées sous serre jusqu'à la fin de la fructification. Durant toute la période de l'expérimentation, une observation visuelle (de la croissance, décoloration, jaunissement, pigmentation, nécroses, flétrissement...)(Fig 16, 17).



**Fig 16 :** Plantule de la tomate pour le repiquage



**Fig 17:** dispositif expérimental en serre après le repiquage.

### III.4.4 L'arrosage :

L'irrigation est effectuée à l'eau distillée, la capacité de rétention qu'est déterminé par la différence entre la quantité d'eau apportées avant l'arrosage et celle récupéré après 24 h de décantation.

L'apport de l'eau est effectuée cycliquement afin d'assurer et de maintenir l'humidité du substrat à la capacité au champ. Pour cela la fréquence d'irrigation a été d'une fois par semaine pour la période froide et deux fois pour les périodes chaudes.

### III.4.5 Fertilisation minérale :

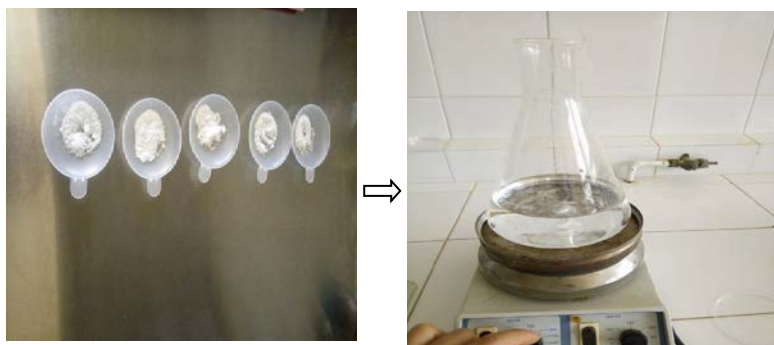
Dés le repiquage jusqu' à l'application du stress métallique. la fertilisation minérale est assuré avec une solution nutritive riche en acide aminé est apportée une fois toutes les deux irrigations par semaine (**Tableau 5**).

**Tableau 5** : Composition de la solution nutritive

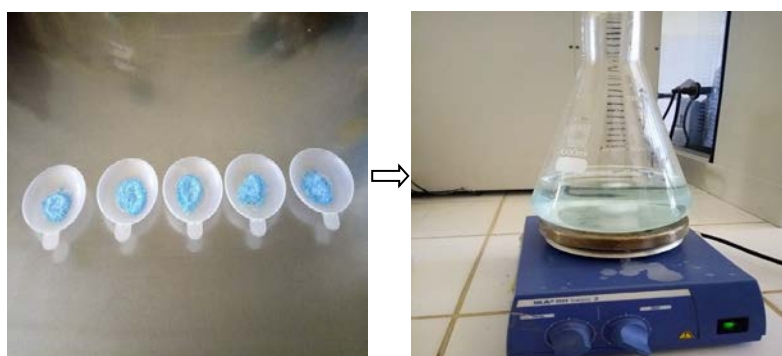
Eléments	Eléments
Azote .....20%	Cuivre.....0.002%
Phosphore.....20%	Zinc .....0.002%
Potassium.....20%	Bore.....0.50%
Magnésium.....0.5%	Molybden.....0.05%
Manganèse.....0.10%	Acides aminés et oligoéléments éléments
Fe.....0.6%	

### III.4.6 Application du stress métallique :

Les solutions de sulfate de cuivre ( $\text{Cu SO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) et de sulfate de zinc ( $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) sont préparées et appliquées deux fois durant l'expérimentation à raison de 100, 200,300, 400,500 ppm (**Fig 18**). Les plantes témoins ne sont pas stressées. Les deux solutions métalliques sont utilisées séparément. La culture est stressée au stade plantule. Chaque dose est répétée cinq fois. L'application du stress a eu lieu le 16 Mars 2017 (**Fig 19**).



(A) : Solution de sulfate de zinc.



(B) : Solution de sulfate de cuivre

**Fig 18** : Préparation des solutions du stress.



**Fig 19**: Application du stress métallique.

### III.5 Paramètres étudiés :

#### III.5.1 Paramètres morphologiques :

Le calcul des paramètres morphologiques a été effectué la dernière semaine du prélèvement des plantes.

### III.5.1.1 La surface foliaire :

La surface foliaire est mesurée à l'aide d'un logiciel ou par la méthode classique elle est exprimée en (Cm<sup>2</sup>).

On a choisi aléatoirement trois feuilles par plants. Ainsi, la surface foliaire (S) est déterminée selon la formule décrite par **Bezzala en 2005**:

$$S = (\pi * a * b) / 4$$

**S** : Surface foliaire

**a** : La longueur de limbe (cm).

**b** : La largeur de limbe en (cm).

**III.5.1.2 Nombre des feuilles** : Le nombre des feuilles est calculé après traitement.

**III.5.1.3 Hauteur de la tige** : La hauteur de la tige est exprimé en centimètres (Cm) ces mesures sont effectuées par règle graduée.

**III.5.1.4 Longueur racinaire** : La longueur des racines est mesurée après traitement et exprimée en Cm.

### III.5.2 Paramètres physiologiques:

#### III.5.2.1 Teneur relative en eau des feuilles RWC (Turgescence cellulaire) :

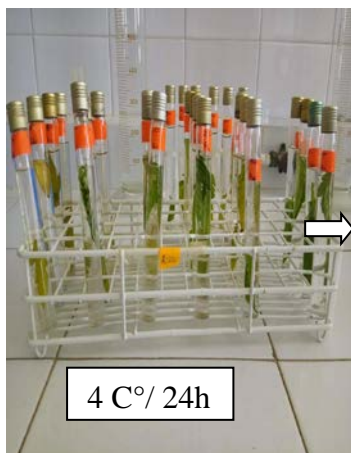
La teneur relative en eau est déterminée selon la méthode de (**Barrs et Weatherley, 1962**) puis par (**Scippa et al., 2004**), la feuille est coupée à la base du limbe et immédiatement pesée pour donner le poids frais (Pf) , puis la feuille a été trempée dans un tube à essai contenant de l'eau distillée , l'ensemble est placé à l'obscurité et à une température de 4°C pendant 24 heures. Les feuilles récupérées sont délicatement essuyées par un papier buvard pour éliminer l'eau de la surface, repesées pour donner le poids après réhydratation maximale (poids en pleine turgescence (Pt). Le poids sec (PS) est déterminé après passage des feuilles dans l'étuve réglée à 80°C pendant 48 heures (**Fig 20**).

La teneur relative en eau RWC est calculée selon la formule suivante :

$$RWC (\%) = [(Pf - Ps) / (Pt - Ps)] \times 100$$



(A): Poids frais



Calculer Pt



Calculer PS

(B) : limbe dans l'eau distillée.

(C) : des feuilles dans l'étuve 80°C/48 h.

**Fig 20** : Les étapes pour déterminer RWC.

**III.5.2.2 Transpiration cuticulaire R.W.L (taux de déperdition d'eau de la dernière feuille) :**

C'est une méthode qui permet d'identifier les géotypes de blé adaptés à des conditions défavorables. Elle a été utilisée par **Clarke et Mc Caig (1982)**, **Jaradat et Konzak (1983)**, **Clarke et Townely-Smith (1986)** et (**Clarke et al., 1989**).

Elle est basée sur la détermination du taux de déperdition d'eau dans des feuilles excisées, appelée pour cette raison par (**Clarke et Richards, 1988 ; Benchallel, 1994**) «La transpiration résiduelle» et par (**Mushow et Sinclair, 1989 ; Benchallel, 1994**).

Cette méthode aussi consiste à couper les feuilles à la base du limbe. La partie sélectionnée est trempée immédiatement dans un tube à essai rempli d'eau distillée et placée

à l'obscurité à une température de 4°C pendant 24 heures. A la pleine turgescence, les feuilles sont essuyées et pesées, ce qui constitue le poids initial ( $P_i$ ). Elles sont ensuite placées sur une pailleuse au laboratoire, à température ambiante. Des pesées sont effectuées après 60 mn (RWL 60min).

Les valeurs de la transpiration cuticulaire sont déterminées par la formule suivante :

$$\mathbf{R.W.L = P_i - P_{(60mn)} / Sf \times 60mn}$$

**R.W.L:** Exprimé par  $g/cm^2/mn$ .

**P<sub>i</sub>** : Poids frais initial.

**Pf<sub>60min</sub>** : poids frais après 60 min.

**Sf** : Surface foliaire.

### III.6 Analyse statistique :

Les expériences ont été répétées cinq fois et les résultats sont exprimés sous forme de moyennes  $\pm$  SD. Les différences entre les différents traitements ont été déterminées par l'analyse de variance ANOVA. Ces analyses ont été réalisées à l'aide d'un logiciel de traitement statistiques « STAT BOX ». Les moyennes sont comparées selon le Test de Newman et Keuls. On considère que les résultats sont :

- **Significatifs** quand  $P \leq 0,05$ .
- **Hautement significatif** quand  $P < 0.01$
- **Non significatif** quand  $P > 0.05$

### IV.1 Taux de germination :

Le taux de germination est le rapport des graines germées sur les graines semées.

La figure 21 représente le taux de germination obtenu (90%) par les graines de la variété de Saint pierre.

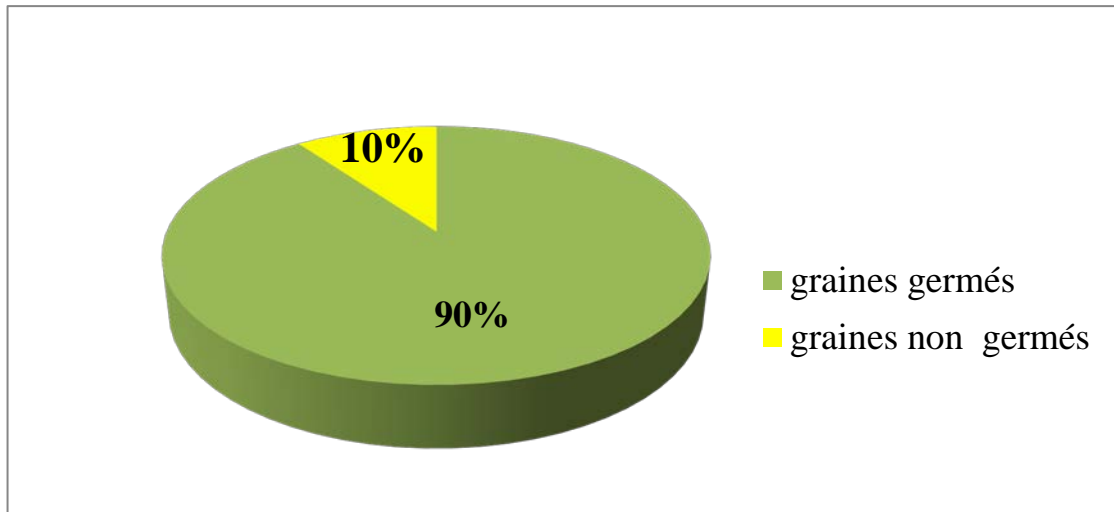


Fig 21 : Le taux de germination des graines de *Lycopersicon esculentum* Mill.

### IV.2 L'effet du cuivre sur les paramètres morphologiques et physiologiques de la tomate :

#### IV. 2.1 Paramètres morphologiques :

##### a. La longueur des tiges :

La figure 22 représente les valeurs moyennes de la longueur des tiges (50,16; 45; 46,66 ; 43,33; 42,5 cm) des plantes traitées par le cuivre sous différentes doses ( 100; 200; 300; 400; 500 ppm) respectivement, comparés au témoin qui a présenté la valeur la plus élevée ( 60 cm).

Les résultats obtenus montrent que la longueur des tiges sous l'effet du cuivre a enregistré une diminution remarquable par rapport au témoin avec une légère augmentation pour la dose de 300 ppm.

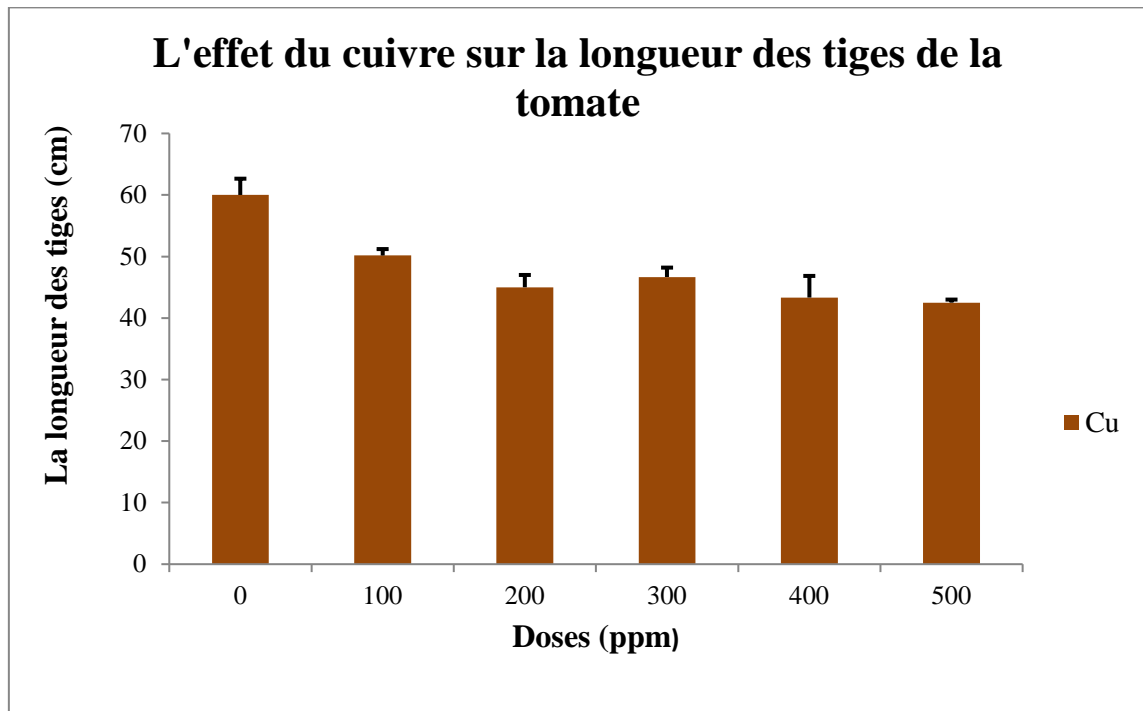


Fig 22: L'effet du cuivre sur la longueur des tiges de *Lycopersicon esculentum* Mill

Les résultats sont présentés en Moyennes  $\pm$  écart-type, selon le test de Newman-Keuls ( $P= 5\%$ ) (tableau 06).

**Tableau 6:** Les résultats moyens de l'évolution de la longueur des tiges (cm) de *Lycopersicon esculentum* Mill en fonction des doses de cuivre.

Doses du cuivre	Témoin	100 ppm	200 ppm	300 ppm	400 ppm	500 ppm
Longueur des tiges (cm)	60 $\pm$ 2.64	50.16 $\pm$ 1.04	45 $\pm$ 2	46.66 $\pm$ 1.52	43.33 $\pm$ 3.51	42.5 $\pm$ 0.5

Les données de l'analyse statistiques indique que l'effet du cuivre ( $P < 0,01$ ) sur les longueurs des tiges se révèlent très hautement significatifs avec ( $PROB = 0,00001$ ) (Annexe1).

#### b- Nombre de feuilles :

Les résultats illustrés de la figure 23 montrent que le nombre des feuilles chez les plantes témoin de *Lycopersicon esculentum* Mill est plus élevées (364 feuilles) par rapport

aux plantes traités (224 ; 194.33 ; 200 ; 192.33 ; 157) pour des concentrations de (100 ; 200 ; 300 ; 400 et 500 ppm) respectivement.

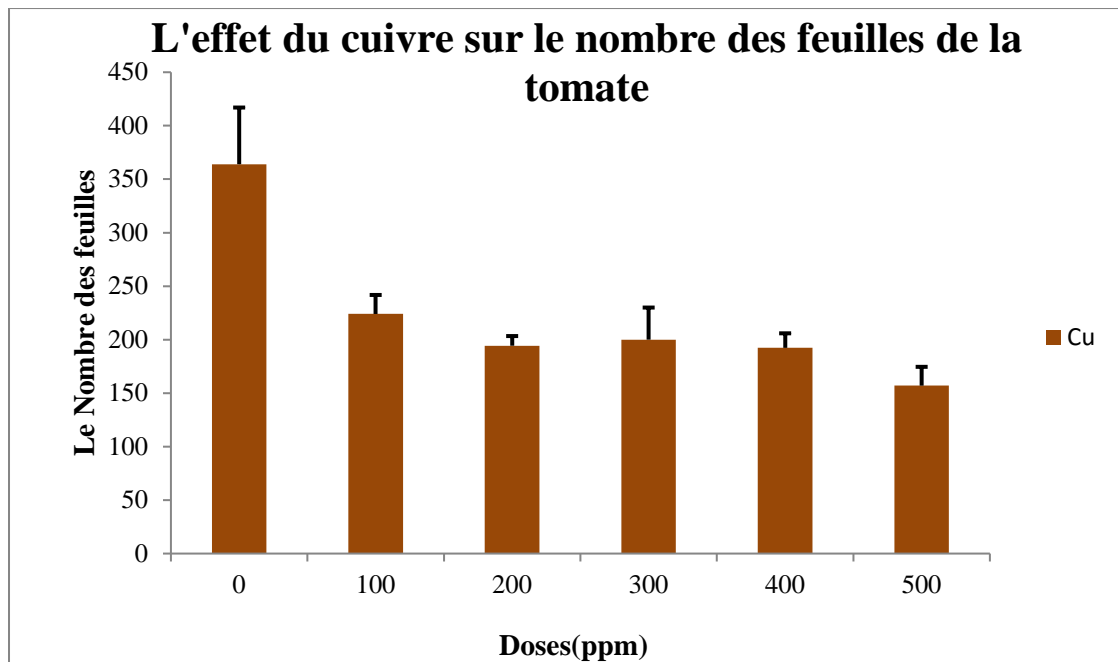


Fig 23: L'effet du cuivre sur le nombre des feuilles de *Lycopersicon esculentum* Mill

Les résultats sont présentés en Moyennes ± écart-type, selon le test de Newman-Keuls (P= 5%) (tableau 07).

Tableau 7 : Les résultats moyens de l'évolution du nombre des feuilles de *Lycopersicon esculentum* Mill en fonction des doses de cuivre.

Doses du cuivre (ppm)	Témoin	100 ppm	200 ppm	300 ppm	400 ppm	500 ppm
Nombre des feuilles	364 ± 53	224 ± 17,77	194,33 ± 9,01	200 ± 30	192,33 ± 13,57	157 ± 17,57

Les résultats de l'analyse statistique montre un effet très hautement significatif (P< 0,01) (PROB =0,00002) de nombre des feuilles pour tout les plantes traitées par la solution cuprique (Annexe 2).

c- La surface foliaire:

La surface foliaire des plantes stressées par les différentes doses (100 ; 200 ; 300 ; 400 et 500 ppm) a connu une chute remarquable de (9,93 ; 9,35 ; 9,39 ; 7,32 ; 6,8 cm<sup>2</sup>) par rapport au témoin (17,79 cm<sup>2</sup>). Alors que la dose 300 ppm comme les deux cas précédents a révélé une légère augmentation par rapport à la dose de 200 ppm (Fig 24).

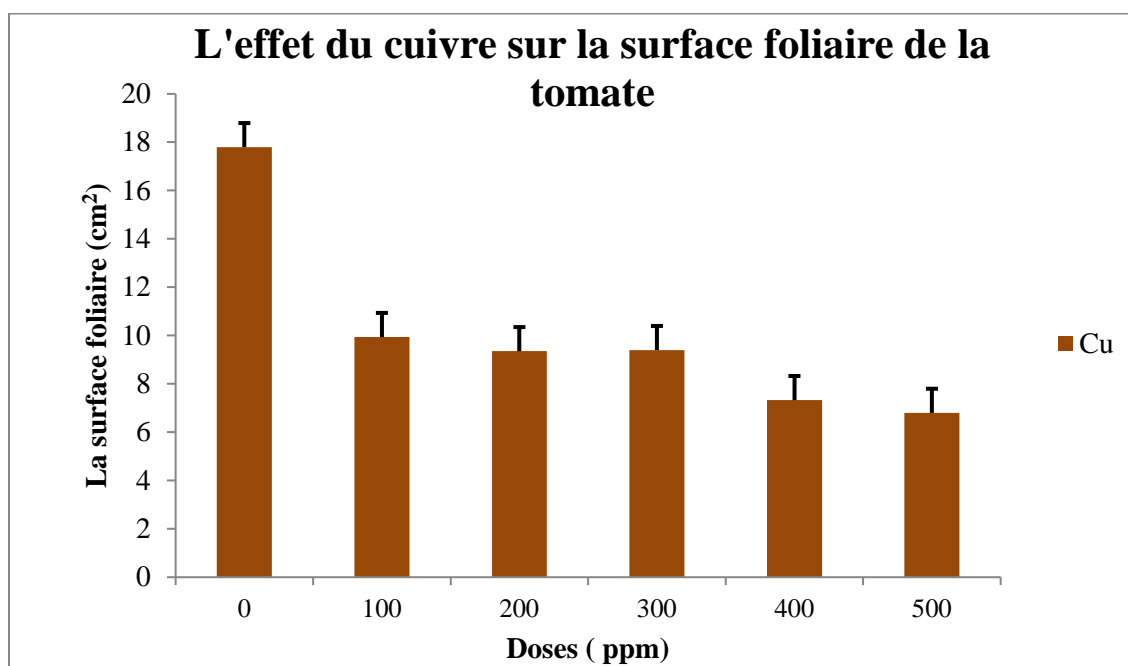


Fig 24: L'effet du cuivre sur la surface foliaire de *Lycopersicon esculentum* Mill.

Les résultats sont présentés en Moyennes ± écart-type, selon le test de Newman-Keuls (P= 5%) (tableau 08).

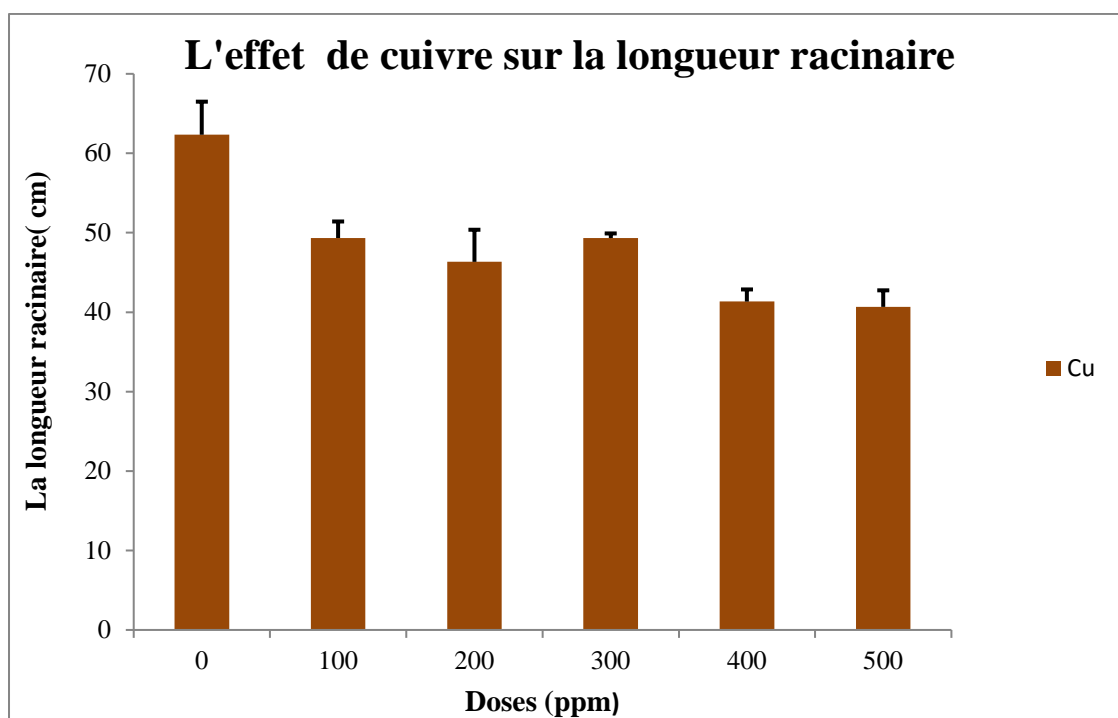
Tableau 8 : Les résultats moyens de la surface foliaire de *Lycopersicon esculentum* Mill en fonction des doses de cuivre.

Doses du cuivre (ppm)	Témoin	100 ppm	200 ppm	300 ppm	400 ppm	500 ppm
Surface foliaire (cm <sup>2</sup> )	17,79 ± 3,26	9,93 ± 0,44	9,35 ± 1,24	9,39 ± 0,32	7,32 ± 0,90	6,8 ± 0,45

L'analyse de la variance révèle un effet très hautement significatif (PROB =0,00002) de la surface foliaire par rapport aux plantes témoins dans l'ensemble des traitements métalliques (Annexe 3).

**d- La longueur racinaire:**

D'après la figure 25, on distingue une diminution de la longueur racinaire chez les plantes stressées (49,33; 46,33; 49,33; 41,33; 40,66 cm) par le cuivre (100; 200 ; 300; 400 et 500 ppm) par rapport aux plantes témoin (62,33). Les doses 100 et 300 ppm ont exercé le même effet avec une longueur de (49.33 cm) qui est supérieure à celle obtenue par 200 ppm.



**Fig 25:** L'effet du cuivre sur la longueur racinaire de *Lycopersicon esculentum* Mill

Les résultats sont présentés en Moyennes ± écart-type, selon le test de Newman-Keuls (P= 5%) (tableau 09).

**Tableau 9 :** Les résultats moyens de la longueur racinaire de *Lycopersicon esculentum* Mill en fonction des doses de cuivre.

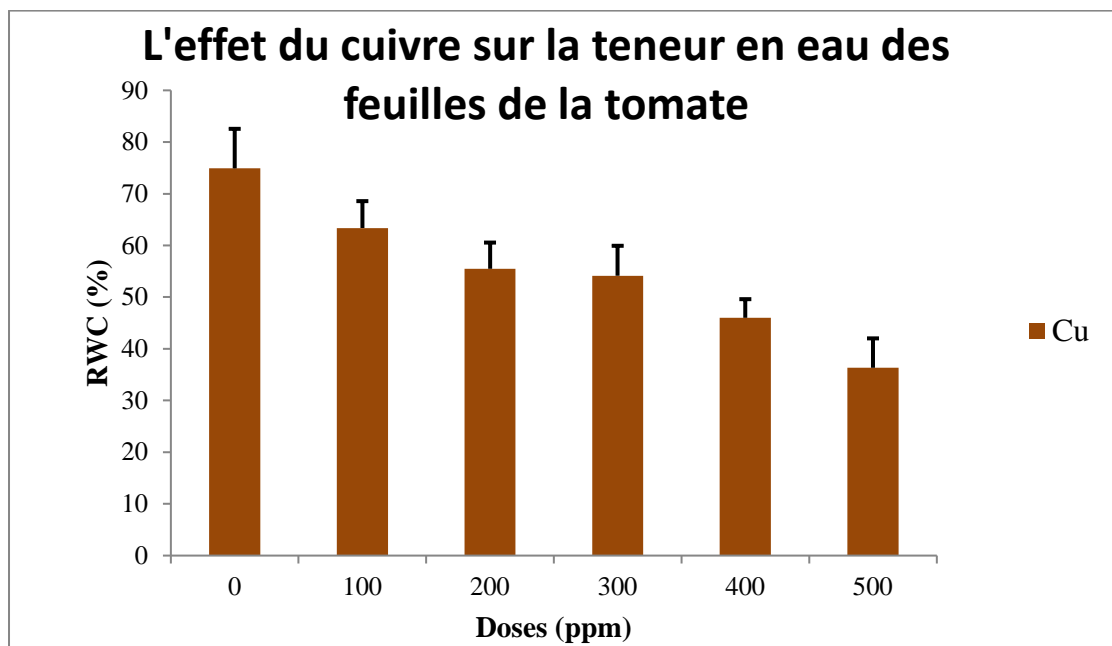
Doses du cuivre	Témoin	100 ppm	200 ppm	300 ppm	400 ppm	500 ppm
Longueur racinaire	62,33 ± 4,16	49,33 ± 2,082	46,33 ± 4,04	49,33 ± 0,577	41,33 ± 1,52	40,66 ± 2,08

L'analyse statistique a révélé une différence très hautement significative (PROB=0,00001) entre les plantes témoins et celles soumises à différentes doses de cuivre sur la longueur racinaire de la tomate. (Annexe 4).

#### IV. 2.2 Paramètres physiologiques:

##### a- L'effet du cuivre sur la teneur relative en eau des feuilles (RWC):

La teneur relative en eau des feuilles présente une différence entre les différents traitements (100 ; 200; 300 ; 400 et 500 ppm). Nous avons observé une diminution progressive de (63,37; 55,48; 54,14 ; 46; 36,33) respectivement sous l'effet de cuivre comparativement aux plantes témoins qui enregistrent la valeur la plus élevée de (74,907%). Tandis que la valeur la plus faible (36.33%) est marquée par la dose la plus forte de (500 ppm) (Fig 26).



**Fig 26 :** L'effet du cuivre sur la teneur relative en eau (RWC) des feuilles de *Lycopersicon esculentum* Mill.

Les résultats sont présentés en Moyennes  $\pm$  écart-type, selon le test de Newman-Keuls (P= 5%) (tableau 10).

Tableau 10: Les résultats moyens de la teneur en eau de *Lycopersicon esculentum* Mill en fonction des doses de cuivre.

Doses du cuivre (ppm)	Témoin	100 ppm	200 ppm	300 ppm	400 ppm	500 ppm
Teneur relative en eau (%)	74,90 ± 7,64	63,37 ± 5,19	55,48 ± 5,07	54,14 ± 5,791	46 ± 3,06	36,33 ± 5,68

L'analyse statistique montre que la différence de la teneur relative en eau des feuilles des plantes traitées est très hautement significatif (PROB=0,00006) comparativement au témoin. (Annexe 5).

**b- L'effet du cuivre sur le taux de déperdition d'eau ou la transpiration cuticulaire (R.W.L) après 60 mn:**

Les résultats illustrés par la figure 27 montrent une diminution du taux de déperdition d'eau des feuilles des plantes traitées (0,289; 0.282;0.253; 0.253; 0.232 g/cm<sup>2</sup>/mn) pour les doses de (100 ; 200 ; 300 ; 400 ; 500 ppm) par rapport au témoin (0.361g/cm<sup>2</sup>/mn) ; avec une faible différence entre les doses dont 300 et 400 ppm ont présenté le même effet 0.253 g/cm<sup>2</sup>/mn.

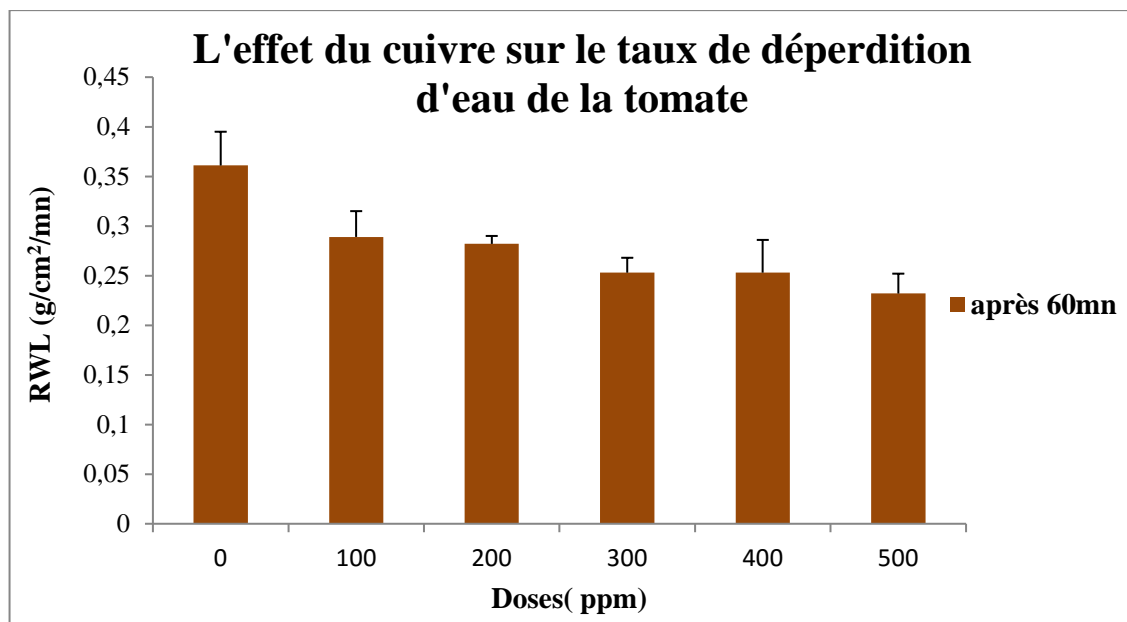


Fig 27 : L'effet du cuivre sur le taux de déperdition d'eau (R.W.L) des feuilles de *Lycopersicon esculentum* Mill après 60 min.

Les résultats sont présentés en Moyennes  $\pm$  écart-type, selon le test de Newman-Keuls (P= 5%) (**tableau 11**).

**Tableau 11:** Les résultats moyens du taux de déperdition d'eau (R.W.L) de *Lycopersicon esculentum* Mill en fonction des doses de cuivre.

Doses du cuivre (ppm)	Témoin	100 ppm	200 ppm	300 ppm	400 ppm	500 ppm
R.W.L (g/cm <sup>2</sup> /m)	0,361 $\pm$ 0,034	0,289 $\pm$ 0,026	0,282 $\pm$ 0,008	0,253 $\pm$ 0,015	0,253 $\pm$ 0,033	0,232 $\pm$ 0,02

L'étude statistique montre que l'effet du cuivre sur le taux de déperdition d'eau des feuilles des plantes traitées est très hautement significatif à (PROB=0,00057) (**Annexe 6**).



**Fig 28 :** La culture de la tomate avant l'application du cuivre



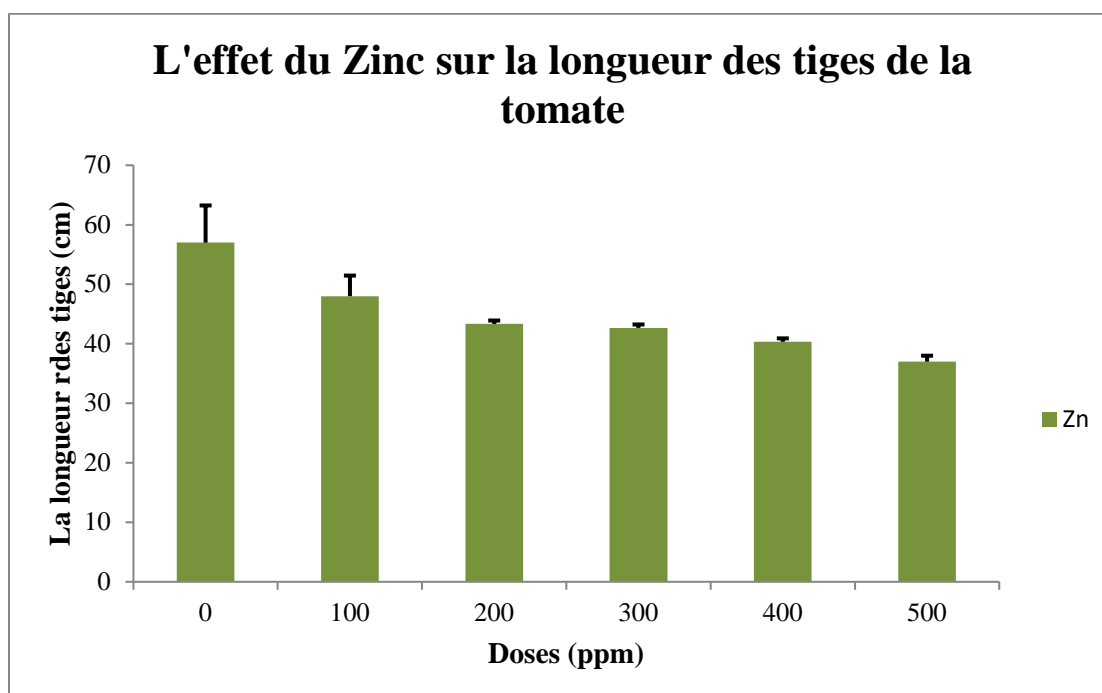
**Fig 29 :** la culture de la tomate après l'application du cuivre

### IV.3 L'effet du zinc sur les paramètres morphologiques, biométrique et physiologiques de la tomate :

#### IV. 3.1 Paramètres morphologiques :

##### a- La longueur des tiges :

Les résultats obtenus dans la figure 30, montrent que la longueur des tiges des plantes de *Lycopersicon esculentum* Mill diminue légèrement (57 ; 48 ; 43,33; 42,66; 40,33; 37 cm) en fonction de l'accroissement des doses du zinc appliquées (0 ; 100; 200; 300 ; 400 ; 500 ppm).



**Fig 30:** L'effet du zinc sur la longueur des tiges de *Lycopersicon esculentum* Mill

Les résultats sont présentés en Moyennes  $\pm$  écart-type, selon le test de Newman-Keuls (P= 5%) (tableau 12).

**Tableau 12:** Les résultats moyens de l'évolution de la longueur des tiges (cm) de *Lycopersicon esculentum* Mill en fonction des doses du zinc.

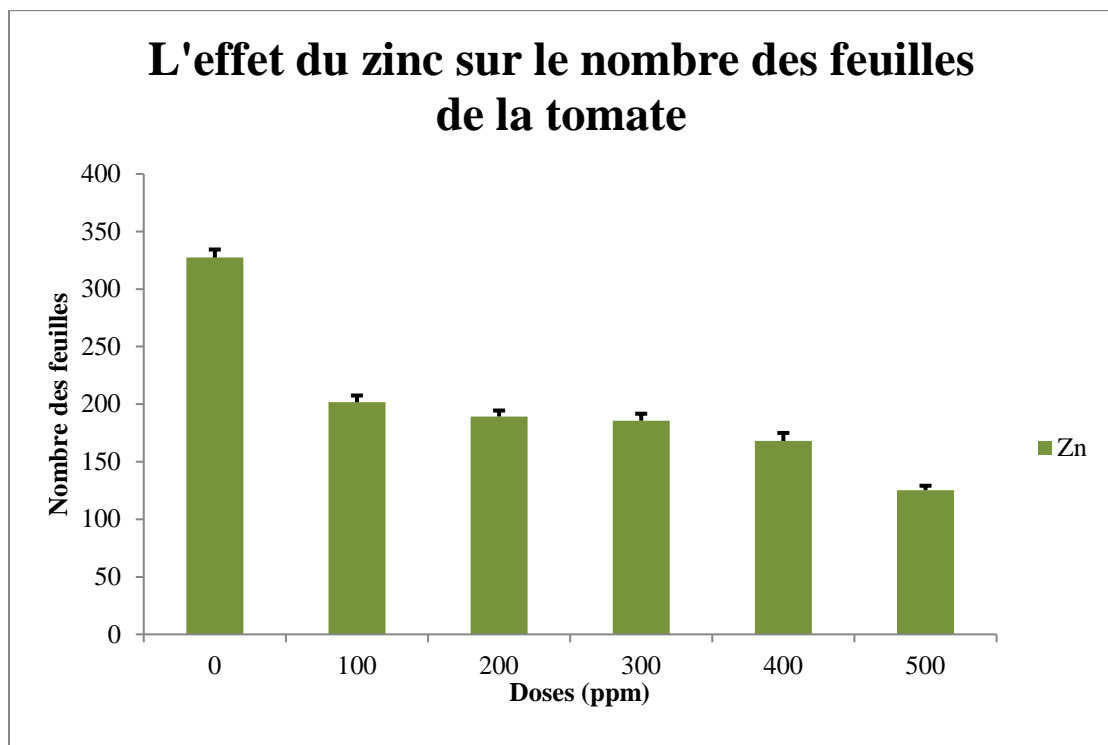
Doses du zinc (ppm)	Témoin	100 ppm	200 ppm	300 ppm	400 ppm	500 ppm
Longueur des tiges (cm)	57 $\pm$ 6,24	48 $\pm$ 3,46	43,33 $\pm$ 0,57	42,66 $\pm$ 0,57	40,33 $\pm$ 0,57	37 $\pm$ 1

L'analyse statistique révèle un effet très hautement significatif exercé par le zinc sur la longueur des tiges de la tomate (PROB=0,00007). (Annexe 7).

#### b- Nombre de feuilles :

L'application du zinc a provoqué une diminution remarquable dans le nombre des feuilles de la tomate *Lycopersicon esculentum* Mill (327,33 ; 201,66 ; 189,33 ; 185,66 ; 168 ; 125,33 feuilles) qui correspond aux doses de (0 ; 100 ; 200 ; 300 ; 400 ; 500) (Fig 31).

Les résultats montrent que le nombre de feuilles passe de 327,33 chez les plantes témoins à 125 feuilles chez les plantes traitées par à la dose la plus élevée (500 ppm).



**Fig 31:** L'effet du zinc sur le nombre des feuilles de *Lycopersicon esculentum* Mill

Les résultats sont présentés en Moyennes  $\pm$  écart-type, selon le test de Newman-Keuls (P= 5%) (tableau 13).

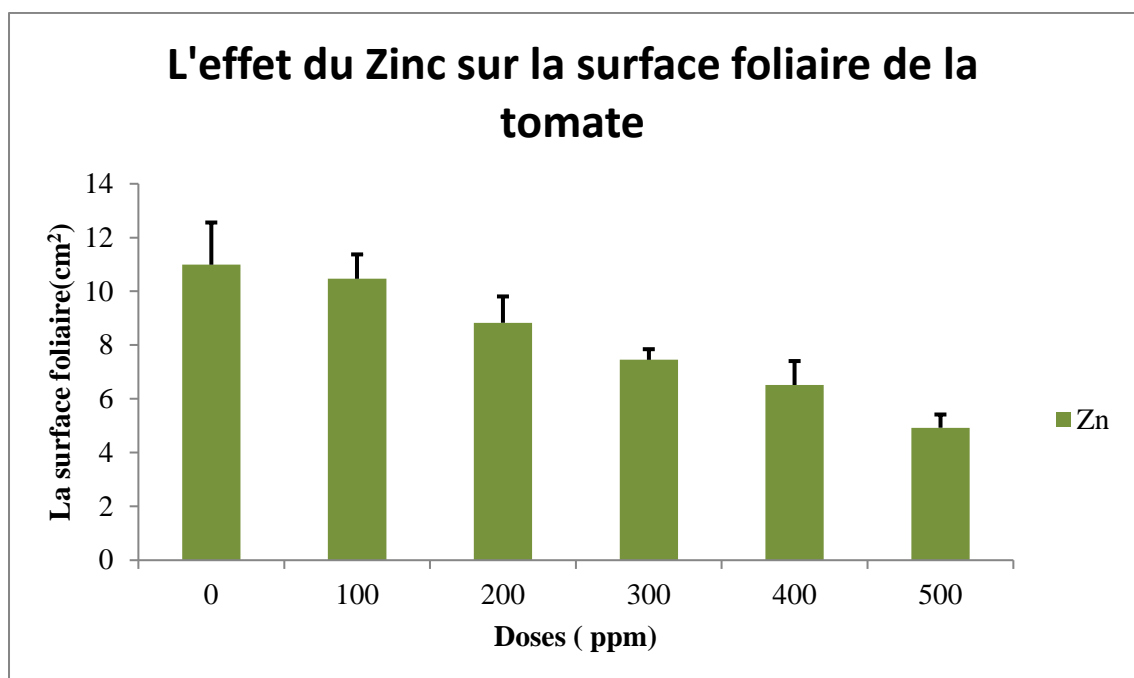
**Tableau 13** : Les résultats moyens de l'évolution du nombre des feuilles de *Lycopersicon esculentum* Mill en fonction des doses de zinc.

Doses du zinc (ppm)	Témoin	100 ppm	200 ppm	300 ppm	400 ppm	500 ppm
Nombre de feuilles	327,33 ± 7,024	201,66 ± 5,85	189,33 ± 5,13	185,66 ± 6,0.28	168 ± 7	125,33 ± 3,78

L'analyse de variance révèle une différence très hautement significatif pour le paramètre effet de zinc sur le nombre des feuilles de la tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill à P=0,0000). (Annexe 8).

**c- La surface foliaire :**

On observe dans la figure 32 que les surfaces foliaires des plantes traitées par le zinc sont au dessus des plantes témoin (10.99cm<sup>2</sup>) et leur valeurs obtenu par les différentes doses utilisées (100; 200; 300; 400; 500) enregistrent une réduction importante varient entre (10,46; 8,83 ; 7,45; 6,51; 4,92 cm<sup>2</sup>) respectivement. En effet la dose la plus élevé (500 ppm) a présenté le meilleur l'effet (4.92cm<sup>2</sup>).



**Fig 32:** L'effet du zinc sur la surface foliaire de *Lycopersicon esculentum* Mill.

Les résultats sont présentés en Moyennes  $\pm$  écart-type, selon le test de Newman-Keuls (P= 5%) (tableau 14).

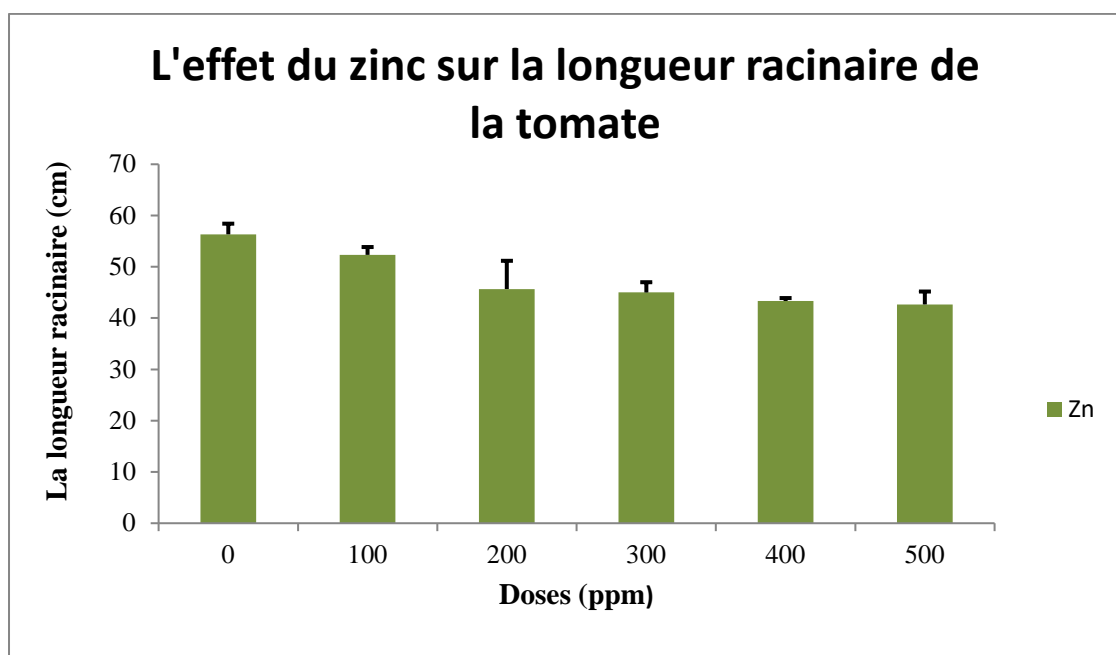
**Tableau 14** : Les résultats moyens de la surface foliaire de *Lycopersicon esculentum* Mill en fonction des doses de zinc.

Doses du zinc (ppm)	Témoin	100 ppm	200 ppm	300 ppm	400 ppm	500 ppm
Surface foliaire (cm <sup>2</sup> )	10,99 $\pm$ 1,57	10,46 $\pm$ 0,90	8,83 $\pm$ 0,98	7,45 $\pm$ 0,39	6,51 $\pm$ 0,89	4,92 $\pm$ 0,49

L'analyse de la variance représente un effet très hautement significatif de la surface foliaire par rapport aux plantes témoins à PROB =0,00005. (Annexe 9).

**d- La longueur racinaire :**

Les résultats obtenus dans la figure 33, montrent que la longueur des parties racinaires des plantes diminue légèrement en fonction de l'accroissement des doses du zinc appliquées (56,33; 52,33; 45,66; 45; 43,33; 42,66 cm) respectivement. L'effet obtenu par la dose de 200 ppm se rapproche de celui donné par 300 ppm.



**Fig 33:** L'effet du zinc sur la longueur racinaire de *Lycopersicon esculentum* Mill

Les résultats sont présentés en Moyennes  $\pm$  écart-type, selon le test de Newman-Keuls (P= 5%) (**tableau 15**).

**Tableau 15:** Les résultats moyens de la longueur racinaire de *Lycopersicon esculentum* Mill en fonction des doses de zinc.

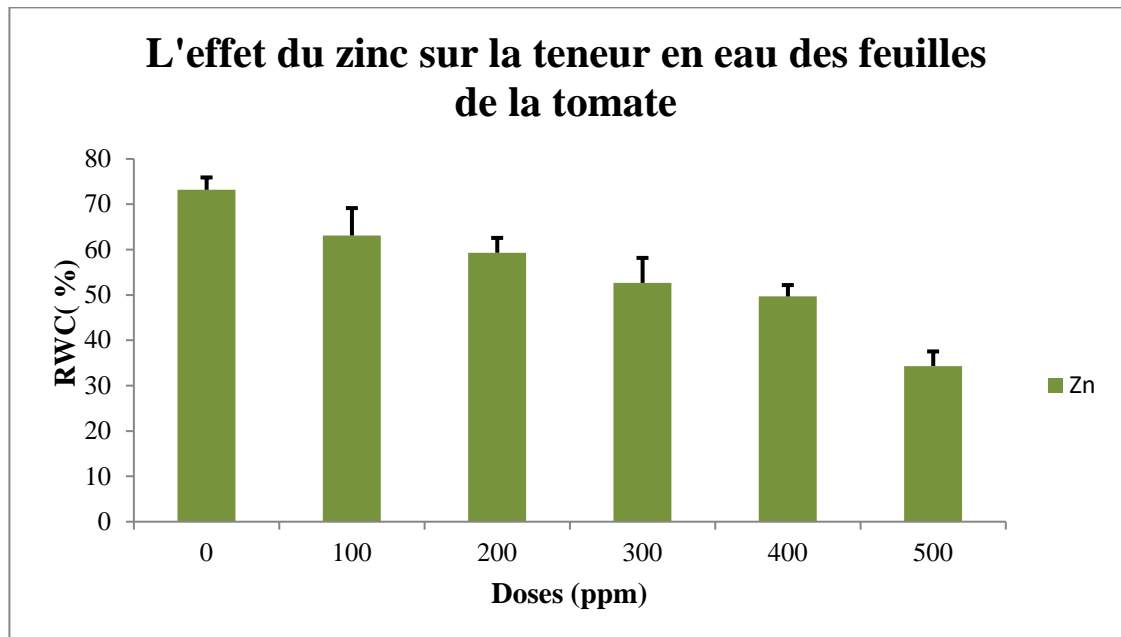
Doses du zinc (ppm)	Témoin	100 ppm	200 ppm	300 ppm	400 ppm	500 ppm
Longueur des racines (cm)	56,33 $\pm$ 2,08	52,33 $\pm$ 1,52	45,66 $\pm$ 5,50	45 $\pm$ 2	43,33 $\pm$ 0,57	42,66 $\pm$ 2,51

L'analyse statistique sur la longueur des racines de la tomate *Lycopersicon esculentum* Mill révèle un effet très hautement significatif (P=0,00037) obtenu par l'apport des différentes doses du zinc (**Annexe 10**).

### IV. 3.2 Paramètres physiologiques :

#### a- L'effet du zinc sur la teneur relative en eau des feuilles (RWC):

Les résultats présentés dans la figure 34 montrent que la teneur relative en eau des feuilles de la tomate diminue remarquablement (63,11; 59,31; 52,66 ; 49,66 ; 34,33 %) sous l'effet des différentes doses du zinc appliqués (100 ppm ; 200 ppm ; 300 ppm ; 400 ppm et 500 ppm) .Comparativement au témoin (73,2%) la dose 500 ppm a présenté l'effet le plus élevé (34,33 %).



**Fig 34** :L'effet du zinc sur la teneur relative en eau (RWC) des feuilles de *Lycopersicon esculentum* Mill.

Les résultats sont présentés en Moyennes  $\pm$  écart-type, selon le test de Newman-Keuls (P= 5%) (tableau 16).

**Tableau 16**: Les résultats moyens de la teneur en eau de *Lycopersicon esculentum* Mill en fonction des doses de Zinc (Annexe 11).

Dose du zinc (ppm)	Témoin	100 ppm	200 ppm	300 ppm	400 ppm	500 ppm
Teneur relative en eau (%)	73,2 $\pm$ 2,71	63,11 $\pm$ 6,04	59,31 $\pm$ 3,27	52,66 $\pm$ 5,508	49,66 $\pm$ 2,51	34,33 $\pm$ 3,21

Les résultats obtenus ont montrés clairement un effet très hautement significatif de l'ensemble des plantes traitées par le zinc sur la teneur relative en eau  $PROB=0.0000$  . (Annexe 11).

**b- L'effet de stress sur la perte graduelle en eau ou transpiration cuticulaire (R.W.L):**

La figure 35 présente une réduction nettement importante du taux de déperdition d'eau, varie entre  $0,548g/cm^2/mn$  pour les plantes témoin allant jusqu'à  $0.137g/cm^2/mn$  pour

celles traitées par la dose la plus élevée (500 ppm). Cette diminution est achevée par une augmentation marquée par la dose de 400 ppm alors que 500 ppm confirme l'effet de cette diminution. Les doses 100 ; 200 ; 300 ; 400 ; 500 ppm correspondent aux valeurs de réduction respectifs de 0,32 ; 0,29 ; 0,164 ; 0,25 ; 0,137 g/cm<sup>2</sup>/mn.

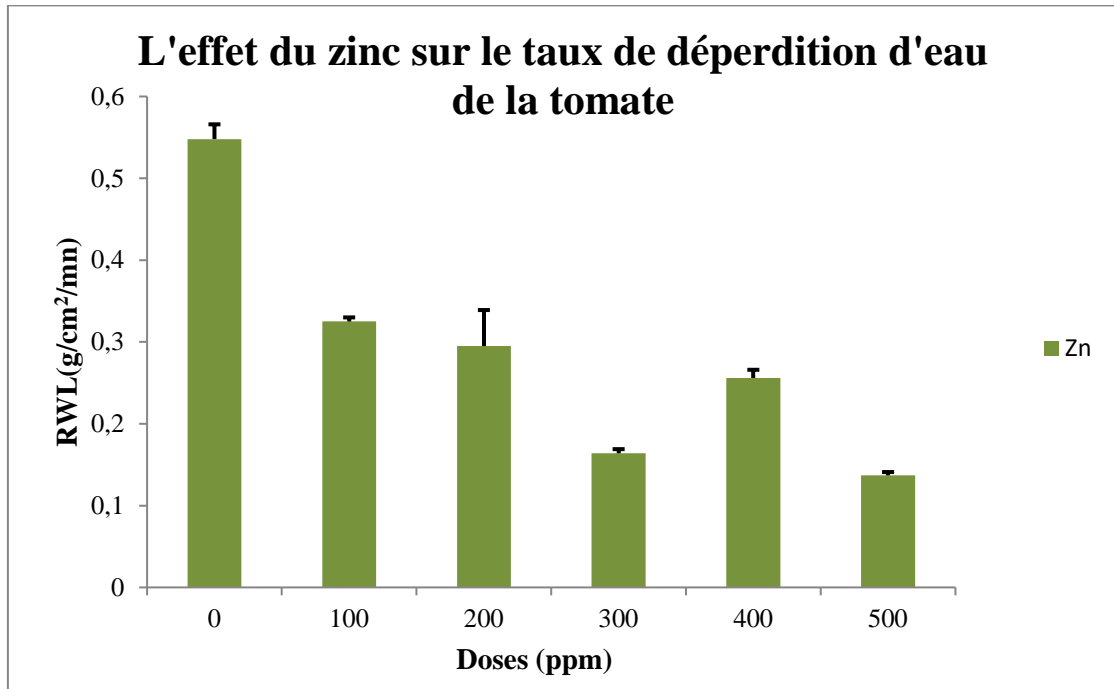


Fig 35 : L'effet du Zinc sur le taux de déperdition d'eau (R.W.L) des feuilles de *Lycopersicon esculentum* Mill après 60 min.

Les résultats sont présentés en Moyennes ± écart-type, selon le test de Newman-Keuls (P= 5%) (tableau 17).

Tableau 17: Les résultats moyens du taux de déperdition d'eau (R.W.L) de *Lycopersicon esculentum* Mill en fonction des doses de zinc. (Annexe 12).

Doses du zinc (ppm)	Témoin	100 ppm	200 ppm	300 ppm	400 ppm	500 ppm
R.W.L (g/cm <sup>2</sup> /mn)	0.54 ± 0,018	0.32 ± 0,005	0.29 ± 0,044	0.16 ± 0,005	0.25 ± 0,01	0.13 ± 0,004

L'analyse statistique montre que la différence du taux de déperdition d'eau des feuilles est hautement significative ( $PROB=0,0000$ ) en présence des différents traitements de doses comparativement au témoin.



**Fig 36 :** La culture de la tomate avant l'application du Zinc



**Fig 37:** La culture de la tomate après l'application du Zinc

### Discussion :

En générale le stress par les métaux lourds ; le cas du cuivre et du zinc dans notre étude provoque des changements morphologiques, physiologiques soit au niveau cellulaire ou au niveau de la plante entière.

Selon **Sonmez *et al.* (2006)** l'application du cuivre au sol diminue la hauteur de la plante « tomate » et cause des réductions de 39% et 50%, en comparaison avec le témoin.

Les résultats obtenus dans cette étude indiquent que le cuivre et le zinc ont provoqué un effet toxique apparu par une diminution remarquable sur le nombre des feuilles, surface foliaire, la longueur racinaire et la croissance en hauteur de la tige par rapport aux plantes témoins. D'autre part l'effet des deux métaux présente une différence qui se manifeste par les doses appliquées.

Le zinc a exercé un effet toxique à partir de la dose de 100 ppm. Alors que 100 ppm de cuivre provoque une légère diminution jusqu'à le seuil de 300 ppm qui enregistre une augmentation et au-dessus duquel la majorité des paramètres étudiés diminuent progressivement pour donner le meilleur effet toxique. Nos résultats sont en accord avec **Abdelhafis (2014)** par un seuil de 200 ppm pour les deux métaux. Donc On peut constater que la dose 300 ppm a exercé un effet bénéfique.

**Lexmond et Vorm (1981)** ont signalé que l'application des niveaux élevés du cuivre inhibe usuellement la croissance des racines de la tomate avant d'affecter la production de la biomasse aérienne. Cependant, ce ne signifie pas nécessairement que les racines sont plus sensibles à des concentrations élevées du cuivre, mais probablement, due en réalité que les racines sont dans un environnement où le cuivre est en excès

Les deux métaux lourds utilisés dans ce travail ont perturbé la teneur relative en eau et la déperdition d'eau « la transpiration cuticulaire ». Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par **Aurélien en 2009** qui a expliqué que le stress métallique provoqué par le zinc réduit de manière importante la teneur en eau des callosités et des tissus de la plante entière de la tomate, la réduction est d'autant plus marquée que la concentration en métal dans le milieu est élevée. Une corrélation positive est trouvée entre le comportement cellulaire et celui de la feuille, ce résultat est en accord avec celui de (**Houshmand *et al.*,2005**).

La turgescence cellulaire traduit sûrement encore mieux l'état physiologique des cellules ; les baisses importantes de turgescence peuvent être considérées comme des situations de détresse cellulaire non négligeables face aux ETM introduits dans le milieu de culture (**Aurélien, 2009**).

En effet, comme la surface foliaire des plantes témoins et des stressés différente, la présence d'une différence importante entre les valeurs du taux de déperdition d'eau de la dernière feuille des deux traitements semble logique. La perte d'eau est directement reliée à la surface foliaire avec un coefficient de corrélation de 0,90, plus la surface est large, plus le (*R.W.L.*) augmente (**Kirkham et al., 1980**).

Parmi les éléments potentiellement toxiques étudiés généralement, le Zn apparait avec les éléments trace les plus mobiles à une biodisponibilité et un transfert élevés vers les plantes (**Grejtovsky, 2006**). On constate à travers notre étude que le zinc est plus toxique que le cuivre cela est bien confirmé par les travaux mené par **Abdelhafid en 2009**.

## *Conclusion et Perspectives*

## Conclusion

---

Cette étude expérimentale a été entreprise dans le but d'étudier l'effet du cuivre et du zinc sur les paramètres morphologiques et physiologiques de la tomate *Lycopersicon esculentum* Mill.

En conclusion, l'ensemble des résultats obtenus dans notre travail comparé à ceux rapportés dans la littérature nous permettent de suggérer l'hypothèse suivante :

Le taux de germination obtenu par les graines de la variété de Saint pierre est de l'ordre de 90%.

La réduction de croissance est généralement observée lorsque des plantes sont soumises à un stress à différentes doses pour les deux métaux (100 ; 200 ; 300 ; 400 ; 500 ppm) comparés aux plantes témoin non traités.

L'influence du stress provoqué par les métaux se traduit par une diminution de la croissance des parties aériennes (la hauteur des tiges, nombre des feuilles, surface foliaire) et racinaire (la longueur racinaire).

A travers cette étude on peut conclure que le zinc est plus toxique que le cuivre. Cela est bien confirmé par l'effet des doses appliquées dont on remarque que la dose 100 ppm provoque un effet de diminution sur les paramètres morphologiques et physiologique pour les deux métaux jusqu'à 500 ppm qui présente la dose la plus élevée et qui a donné l'effet le plus toxique. Alors que l'application du cuivre sur les paramètres morphologiques a achevé cette diminution par une augmentation à la dose de 300 ppm qui au dessus de la quelle l'effet diminue. Dans ce cas la dose de 300 ppm a présenté un effet bénéfique pour les paramètres morphologiques.

Les analyses de variance ont révélé un effet hautement significatif exercé par les métaux sur les paramètres étudiés.

Pour une meilleure appréciation de ce travail, il serait intéressant de le compléter et de l'enrichir par :

- Etude de l'effet du cuivre et du zinc sur d'autres paramètres : chimique, biochimiques,.....
- Etude de l'effet combiné du cuivre et le zinc sur la tomate.
- Dosage des métaux lourds dans le sol et les parties aérienne et racinaire de la plante.

*Références*  
*Bibliographiques*

## Références bibliographiques

---

### A:

**Abdul Rida, A.M.M. (1996).** Concentrations et croissance de Lombriciens et de plantes dans des sols contaminés ou non par Cd, Cu, Fe, Pb et Zn: Interactions plant-sol-lombricien. *Soil. Biol. Biochem*, 21p

**Adriano, D.C. (2001).** Trace elements in terrestrial environments: Biochemistry, bioavailability and risks of metals. Springer-Verlag, New York, 11p.

**AFEE. (1979).** Thèse de *Contribution a l'étude des boues résiduaires* comme amendement organiques pour *les* cultures maraichères.

**Ali, N.A., Bernal, M.P., Ater, M. (2002).** Tolerance and bioaccumulation of copper in *Phragmites australis* and *Zea mays*. *Plant and Soil*, 19p.

**Allan, D.L., Jarrell, W.M. (1989).** Proton and copper adsorption to maize and soybean root cell walls. *Plant Physiology*, 19p

**Alloway, B.J. (1995).** Heavy metals in soils. Blackie academic and professional, London. 23p

**Alloway, B.J. (2004).** Bioavailability of elements in soil. In: Selinus O., Alloway B.J., Centeno A.R., Finkelman B., Fuge R., Lindh U., Smedley P. (Eds.), *Essentials of Medical Geology*. Amsterdam 21p, 24p

**Anonyme1. (2007).** Autres noms scientifiques de *Tuta absoluta* Meiryck. In. <http://www.Cabicompendium.Org/Namesliste/CPC/Full/SCPPAB.HTM>. 3p

**Anonyme. (2010).** [www.Smart.Http.Com.Tutaabsoluta.com](http://www.Smart.Http.Com.Tutaabsoluta.com) 1p

**Anonyme 1, 2011-** *Tuta absoluta* (Meyrick) la mineuse de la tomate. *FREDON Corse. Teghia BP15-CAURO* p1

### B:

**Babich, H., Stotzky, G. (1977b).** Sensitivity of various bacteria, including actinomycetes and fungi to cadmium and the influence of pH on sensitivity. *Appl. Environ. Microbiol.*, 13p, 14p

**Babich, H., Stotzky, G. (1977a et b).** Effect of cadmium on fungi and on interactions between fungi and bacteria in soil: influence of clay minerals and pH. *Appl. Environ. Microbiol.* 33, 1059-1066.

**Babich, H., Stotzky, G. (1980).** Environmental factors that influence the toxicity of heavy metals and gaseous pollutants to microorganisms, *Crit. Rev. Microbiol.* 8, 99-145.

**Baize, D. (1997).** Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France). INRA. Paris, 12p, 16p, 17p, 21p

## Références bibliographiques

---

**Baize, D., Tercé, M.(2002).** Les éléments traces métalliques dans les sols. Approches fonctionnelles et spatiales. INRA Editions, Paris .

**Baker, A.J.M., Walker, P.L. (1989).** Ecophysiology of metal uptake by tolerant plants. In: Heavy metal tolerance in plants -Evolutionary aspects. Shaw, A. (Eds). CRC Press, 155-177p

**Baker, A.J.M., Walker, P.L. (1990).** Ecophysiology of metal uptake by tolerant plants.

**Baker, D.E., Senft, J.P.(1995).** Copper. In: Heavy metals in soils (Alloway Ed), 2<sup>nd</sup> Edition, Blackie academic & professional.

**Barrs ,H.D.,Weatherley, P.E.(1962 ).** Are examination of the relative turgidity technique for estimating water deficits in leaves. Aust. J. Sci. 15 412.

**Benamor , L. (2015) .** Article » El Watan ».L'Algérie sera un pays exportateur de tomates en 2017 (Laid Benamor). <http://www.maghrebemergent.com/economie/algerie> **www.actualitealgerie.com > Culture.**

**Benchalaal.(1983).** Généralités sur la tomate, production végétale, production céréalière et fourragère. Aurès agronome. ,32p

**Benchallel, L. (1994).** Contribution à l'étude des mécanismes pédologiques, morphophysologiques et biochimiques sous l'influence de 2 herbicides (ILLOXAN - B et ACIDE 2, 4 DICHLOROPHENOXY ACETIQUE 2) chez 2 variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.). Thèse de Magister. Université d'Annaba, p. 32.

**Bezzala, A.(2005).** Essai d'introduction de l'arganier (*Argania spinosa* (L.) Skeels) dans la zone de M'doukel et évaluation de quelques paramètres de résistance à la sécheresse. Mémoire. Magistère en Sciences 143p.

**Blancard D., Laterrot H., Marchoux G. et Candresse T. (2009).** Les maladies de la tomate. Éd. INRA.3p

**Bliefert, C., Perraud, R.(2003).** Chimie de l'environnement : Air, Eau, Sols, Déchets. De Boeck. Paris,12p

**Bourbonnais,G.(2007).**[http://ici.cegepjjstefoy.qc.ca/profs/gbourbonnais/pascal/nya/botanique/powerpoint/botanique\\_4.ppt#15](http://ici.cegepjjstefoy.qc.ca/profs/gbourbonnais/pascal/nya/botanique/powerpoint/botanique_4.ppt#15)

**Bourelrier, P.H., Berthelin, J.(1998).** Contamination des sols par les éléments traces: les risques et leur gestion. Rapport n°42. Ed. Technique et documentation. Paris ,13p

### 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, Sciences de l'Environnement : Système Terre, Université d'Aix- Marseille ,14p,15p,16p

## Références bibliographiques

---

- Chaignon, V. Di., Malta, D., Hinsinger, P.(2002a).** Fe-deficiency increases Cu acquisition by wheat cropped in a Cu-contaminated vineyard soil. *New Phytologist*,19p.
- Chaignon, V. Di., Malta, D., Hinsinger, P.(2002b).** Fe-deficiency increases Cu acquisition by wheat cropped in a Cu-contaminated vineyard soil. *New Phytologist*,19p
- Chaux, C.L.(1971).** Livre Classification de Nic- 2de édition, version.
- Chaux, C.L., Foury, C.L. (1994).** Culture légumière et maraichère. Tome 3 : légumineuses potagères, légumes fruit. Tec et Doc. Lavoisier, Paris 3P,5p ,7p,9p
- Christensen, T.H. (1984).** Cadmium soil sorption at low concentrations: I. Effect of time, cadmium load, pH and calcium. *Water Air Soil Pollut*,14p
- Cirad., Gret. (2002).** (Organisme, France Ministère des affaires étrangères, Cirad, centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement France, et Gret, groupe de recherche et d'échanges technologique, ministère des affaires étrangères). Mémento de l'agronomie. (Éd). Quae,6p
- Clarke, J.M., Townley - Smith, T.F. (1986).** Heritability and relationship to yield of excised leaf water retention in *durum* wheat. *Crop. Sci.* N° 26, p. 289 - 292.
- Clarke, J.M., Richards, R.A.(1988).** The effect of glaucousness, epicuticular wax, leaf age, plant height and growth environment on water loss rates of excised wheat leaves. *Can; J.Plant Sci.* 68: 957-982
- Clarke,J.M., Mclaig,T.M.(1989).**Excised leaf water Capability as an indicator of drought resistanceof *Triticum* genotypes *Can. J. Plant Sci.*, 62- 578p.
- Clarke, J.M., Romagosa, I.J., Srivatava, J.P.Mc., Caig, J.N.(1989).** Relationship of excised leaf water loss rate and yield of durum wheat in diverse environments. *Can. J. Plant Sci.* N° 69, p. 1075 - 1081.
- Clemens, S.(2001).** Molecular mechanisms of plant metal tolerance and homeostasis. *Planta*,20p
- Clemens,S., Palmgren, M.G., Kramer, U.(2002).** A long way ahead: understanding and engineering plant metal accumulation. *Plant Science*,18p
- Coïc, Y., Coppenet, M. (1989).**Oligo-éléments en agriculture et élevage.INRA. Paris.11p,20p
- Cornu, J.Y., Staunton, S., Hinsinger, P.(2007).** Copper concentration in plants and in the rhizosphere as influenced by the iron status of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.). *Plant and Soil*,19p
- Coullery.(1997).** Put the metal to the petal: metal uptake and transport throughout plants. *Curr. Opin. Plant Biol.*, 9: 322-330

## Références bibliographiques

---

**Cronquist, A. (1981).** An integrated system of classification of following plants. Colombia University.2p

### D:

**Davis, R.D., Beckett, P.H.T. (1978).** Upper critical levels of toxic elements in plants. II. Critical levels of copper in young barley, wheat, rape, lettuce and ryegrass, and of nickel and zinc in young barley and ryegrass. *New Phytologist*,18p

**Deneux-Mustin, S., Roussel-Debet, S., Mustin, C., Henner, P., Munier-Lamy, C., Colle, C., Berthelin, J., Garnier-Laplace, J., Leyval, C.(2003).** Mobilité et transfert racinaire des éléments en traces : influence des micro-organismes du sol. TEC & DOC, Paris,15p.

**Desaules., Studer.(1993).** Phytoextraction for Soil Remediation. In: Brooks, R.R. (Ed.). Plants that hyperaccumulate heavy metals. CABI Publishing, Wallingford, pp. 261-287.

**Dore, C., Varoqaux F.(2006).** Histoire et amélioration de cinquante plantes cultivées. Ed. INRA, Paris,5p

**DSA Mostaganem.(2017).** Article du journal : le soir d'Algérie. /www.lesoirdalgerie.com

**Dučić, T., Polle, A.(2005).** Transport and detoxification of manganese and copper in

### E :

**Estevez.(2006).**G:\Agriculture bio -SYNDICATS AFFILIÉS\GrainsBio\Projets\Reproduction semences bio\Diffusion\Fi che technique éléments mineurs.doc

### F:

**FAO.(2008).** L'actualité agricole en Méditerranée. Ed. CIHEAM .33 .

**FAO-Stat.(2009).** World tomatoes, all production by country, 1990-2005,9p,10p

**Foy, C.D., Chaney, R.L.,White, M.C.(1978).** The physiology of metal toxicity in plants, Rev. Plant Physiol.29, 511-566 p

### G:

**Gaussen, H., Lefoy, J., Ozenda, P.(1982).** *Précis de Botanique*.2<sup>ème</sup>Ed. Masson, Paris.2p

**Giller, E., K., Witter, Ernst., Mcgrath, P.S.(1998).** Toxicity of heavy metals to microorganisms and microbial processes in agricultural soils. Soil. Biol. Biochem,14p plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology*,20p.

## Références bibliographiques

---

**Godin, P. M ., Feinberg, M.H., Ducauze, C.J.(1985).** Modelling of soil contamination by airborne lead and cadmium around several emission sources. *Environ. Pollut*,13p.

**Graham, R.D.(1981).** Absorption of copper by plant roots. In: Copper in soils and plants (Loneragan JF, Robson AD and Graham RD Eds). *Academic Press* ,19p

**Grotz, N., Fox, T., Connolly, E., Park, W., Guerinot, M.L., Eide, D. (1998).** Identification of a family of zinc transporter genes from *Arabidopsis* that respond to zinc deficiency. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*,22p

**Guerinot, M.L.(2000).** The ZIP family of metal transporters. *Biochim. Biophys*,22p.

### H:

**Hasan, S.A., Fariduddin, Q., Ali, B., Hayat, S., Ahmad, A. (2009).** Cadmium: toxicity and tolerance in plants. *Journal of Environmental Biology*,18p

**Heuvelink.** (2009). La tomate industrielle en chine.

**Hodgson., Gokhan, H., Bannerot, H. (1966).** Physiological and biochemical mechanisms underlying zinc efficiency in monocot and dicot plants. *Plant Physiology*, 131:595-602.

### J :

**Juste, C., Grotz, N., Fox, T., Connolly.(1995).** Appréciation de la mobilité et de la biodisponibilité des éléments en trace du sol. *Science du Sol*,21p.

### I :

**TDAS.(2005).** Recueil de fiches techniques, Boubakeur CHEBAANI BISKRA, pp:128, 129, 130,131p.

### J :

**Jaradat, A., Konzak, C.F. (1983).** Screening of wheat genotypes for drought tolerance. Excised leaf water retention. *Cer. Res. Commu. N° 11*, p. 196 - 197.

### K:

**Kabata-Pendias, A. (1986).** Trace Elements in Soils and Plants. Fourth ed. CRC Press, Boca Raton, Taylor & Francis Group,21p

## Références bibliographiques

---

**Kabata-Pendias ,A., Pendias, H.(1992).** Copper. In: Trace elements in soils and plants, 2nd Edition, CRC Press,17p

**Kabata-Pendias, A., Pendias, H.(2001).** Trace Elements in Soils and Plants. Third ed. CRC Press, Boca Raton, LLC,18p

**Karid Keltoum., Messati San.(2013).** Efficacité de la résistance de six variétés de la tomate à Tuta absolutasous abrisplastique à l'ITDAS de Hassi Ben Abdellah (Ouargla).

**Khudsar, T., Uzzafar Mahmood., Iqbal, M., Sairam, R.K.(2004).** Zinc-induced changes in morpho-physiological and biochemical parameters in *Artemisia annua*. *Biologia Plantarum*

**Kolev ,N.(1976).** Les cultures maraichères en Algérie .Tome I .Légumes fruits .Ed. Ministre de l'Agriculture et des Reformes Agricoles 1p

**Kopittke, P.M., Menzies, N.W.(2006).** Effect of Cu toxicity on growth of cowpea (*Vigna unguiculata*). *Plant and Soil*,19p

### L :

**Lamy, I. (2002).** Réactivité des matières organiques des sols vis-à-vis des métaux. Journées nationales de l'étude des sols.14p

**Latigui, A.(1984).** Effets des différents niveaux de fertilisation potassique sur la fructification de la tomate cultivée en hiver sous serre non chauffée. Thèse de magister. INRA El-Harrach ,Algérie. 2p

**Lasat, M.M., Pence, N.S., Garvin, D.F., Ebbs, S.D., Kochian, L.V. (1999).** Molecular,22p physiology of zinc transport in the Zn hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*

**Lecomte, P.(1998).** Les sites pollués :Traitement des sols et des eaux souterraines. TEC & DOC, Lavoisier, Paris.

**Li, T.Q., Yang, X.E., Yang, J.Y., He, Z.L.(2006).** Zn accumulation and subcellular distribution in the Zn hyperaccumulator *Sedum alfredii* Hance. *Pedosphere*,14p

**Li, L.Y., Li, R.S.(2000).** The role of clay minerals and effect of H<sup>+</sup> ions on removal of heavy metal (Pb<sup>2+</sup>) from contaminated soil. *Can. J. Geotech/Rev.* 37, 296-307.

**Liao, M.T., Hedley, M.J., Woolley, D.J., Brooks, R.R., Nichols, M.A.(2000a).** Copper uptake and translocation in chicory (*Cichorium intybus* L. cv. *Grasslands Puna*) and tomato(*Lycopersicon esculentum* Mill. cv. *Rondy*) plants grown in NFT system. II. The role of nicotinanamine and histidine in xylem sap copper transport. *Plant Soil*,19p

**Lindsay.(1997).** Phytoextraction of toxic metals: A Review of Biological Mechanisms. *Journal of Environmental Quality* 31, 109-120

## Références bibliographiques

---

**Loneragan, J.F.(1981).** Distribution and movement of copper in plants. In: Copper in soils and plants. Eds Loneragan JF, Robson AD and Graham RD. *Academic Press* ,19p

**Loué, A. (1993).** Oligo-éléments en agriculture. Ed. Nathan (ed),11p,22p

### M:

**Macnicol, R.D., Beckett, P.H.T.(1985).** Critical tissue concentrations of potentially toxic elements. *Plant and Soil*,18p

**MADR.(2009).** Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural , Direction des Statistiques.62.

**Marschner, H.(1995).** Mineral Nutrition of Higher Plants. 2nd ed. London, UK. Academic Press,18p,19p,20p

**McBride MB.(2001).** Cupric ion activity in peat soil as a toxicity indicator for maize. *Journal of Environmental Quality*,19p

**Mémento de l'agronome.(2003).**7p,8p

**Menard. (2009).** Impact of temperature on seed dormancy. *HortScience*. 38:336 341.

**Mengel, K., Kirkby, E.A. (2001).** Soil copper. In: Principles of plant nutrition, 5th Edition, *Kluwer Academic Publishers* ,18p ,20p

**Meyers, D.(1991).** Uptake and localisation of lead in the root system of *Brassica juncea*. *Environmental Pollution*

**Michaud ,A.(2007).** Interaction entre biodisponibilité, phytotoxicité du cuivre et nutrition en fer de graminées: mécanismes physiologiques et rhizosphériques. Thèse de Doctorat, Centre International d'Etudes Supérieures en Sciences Agronomiques (Montpellier SupAgro,32p

**Morard., S.(2013).***Guide pratique. Mes tomates du jardin à la cuisine.* SMACT,11p

**Murugesan, K. (1996).** Influence of copper on the growth and yield of groundnut under *Rhizobium sp.* and *Azotobacter sp.* *Geobios*.

**Mushow., Sinclair, 1989** Seed size variation and its effects on germination and seedling vigour in rice and wheat J. Agron. Crop Sci. N° 176, p. 79 - 82

### N :

**Naika ,S. De., Jeude, J.V.L., De., Goffau, M., Hilmi, M., Van Dam, B. (2005).** La culture de la tomate : production, transformation et commercialisation. 5eme (ed). Foundation agromisa et CTA, Wageningen,5p

**Navarre et al.(1980).** A comparison of biochemical responses to oxidative and metal stress in seedling of barley, *Hordeum vulgare* L. *Environ.Pollut.*101: 99-105.

## Références bibliographiques

---

**Navel ,A.(2011).**Distribution, spéciation, impact et transfert du cuivre dans un sol sous vigne: rôle de la structuration spatiale et du statut organique. Thèse de doctorat. Spécialité : Océan, Atmosphère, Hydrologie. Université de Grenoble,21p

### **P:**

**Pich, A., Scholz, G.(1996).** Translocation of copper and other micronutrients in tomato plants (*Lycopersicon esculentum* Mill.): Nicotianamine-stimulated copper transport in the xylem. *Journal of Experimental Botany*,19p

**PNTTA.(1999).** BULLETIN MENSUEL D'INFORMATION ET DE LIAISON DU PNTTA.Fiche technique tomate sous serre

**Polese, J.M. (2007).** La culture de la tomate. Ed Artémis . 5p,8p,9p

**Puig, S., Andres-Colas, N., Garcia-Molina, A., Penarrubia, L.(2007).** Copper and iron homeostasis in Arabidopsis: response to metal deficiencies, interactions and biotechnological applications. *Plant Cell and Environment*, 18p,19p,20p

### **R :**

**Raemaekers, R.(2001).** Agriculture en Afrique tropicale. DGIC, Bruxelles.4p

**Reuter,D.J., Robinson, J.B.(1997).** Plant Analysis: an Interpretation Manual. CSIRO publishing, Australia,18p

**Reichman,S.M. (2002).** The responses of plants to metal toxicity: a review focusing on copper, manganese and zinc. The Australian Minerals Energy and Environment Foundation

**Robert, M., Juste, C.(1999).** Dynamique des éléments traces de l'écosystème sol. In Club CRIN Environnement et Ministère de l'environnement. Spéciation des métaux dans le sol. Paris: CRIN,13p

**Rousseau,D.(1988).** Heavy metal tolerance in *Typha latifolia* without the evolution of tolerant races. *Ecology* 55: 1163-1165.

### **S :**

**Sancenon, V., Puig, S., Mateu-Andres, I., Dorcey, E., Thiele, DJ., Penarrubia, L. (2004).** The Arabidopsis copper transporter COPT1 functions in root elongation and pollen development. *Journal of Biological Chemistry*,18p

## Références bibliographiques

---

**Sanders, J.R., McGrath, S.P., and Adams, T.M. (1986).** Zinc, copper and nickel concentrations in ryegrass grown on sewage sludgecontaminated soils of different pH. *J. Sci. Food Agr.*37, 961-968.

**Sanders, J.R.(1983).** The effect of pH on the total and free ionic concentrations of , manganese, zinc and cobalt in soil solutions. *J. Soil Sci*14p

**Scippa,G., Di Michele, M., Onelli, N. E., Patrignani, G., Chiatante, D., Bray.(2004).** EThe histone-like protein H1-S and the response of tomato leaves to water deficit. *J.ExpBot.* 55 004109.

**Shankara, N., Jeude, J. V. L.,Goffau, M., Hilmi, M., Da, B. V., 2005 -** *La culture de la tomate production, transformation et commercialisation.* Ed. Prota,11p

**Shaw, J. (Ed.).** Heavy Metal Tolerance in plants: Evolutionary aspects. CRC Press, Boca Raton, Florida,11p,16p

**Sheldon, A.R., Menzies, N.W. (2005).** The effect of copper toxicity on the growth and root morphology of Rhodes grass (*Chloris gayana* Knuth.) in resin buffered solution culture. *Plant and Soil*,19p

**Singh,O.V., Labana, S., Pandey, G., Budhiraja, R., and Jain, R.K. (2003).** Phytoremediation: an overview of metallic ion decontamination from soil. *Appl. Microbiol. Biotechnol*,12p

**Sittig,k.(1975).** Copper pollution of agricultural soils. In: Copper in soils and plants Eds Loneragan JF, Robson AD and Graham RD. *Academic Press*, pp. 25–45.

**Sivasankar, R., Kalaikandhan, R. ,Vijayarengan, P.(2012).** Phytoremediating capability of four plant species under zinc stress. *International Journal of Research in Environmental Science and technology.*

### T:

**Tremel-Schaub,A., Feix, I.(2005).** Contamination des sols : transferts des sols vers les plantes. EDP Sciences,22p,23p.

### V:

**Van der Zaal, BJ., Neuteboom.,LW.(1999).** Pinas JE, Chardonnens AN, Schat H, Verkleij JAC, Hooykaas PJJ.. Over-expression of a novel *Arabidopsis* gene related to putative zinc-

## Références bibliographiques

---

transporter genes from animals can lead to enhanced zinc resistance and accumulation. *Plant Phys*,22p

**Vijayarengan, P. (2012).** Growth and biochemical variations in radish under zinc applications. *Intern. J. Res. Plant Science*, 2(3): 43-49.

**Vijayarengan, P., Mahalakshmi, G. (2013).** Zinc Toxicity in Tomato Plants. *World Applied Sciences Journal* 24 (5): 649-653.

**Von Wiré, N., Marschner, H., Römheld, V. (1995).** Uptake kinetics of ironphytosiderophores in two maize genotypes differing in iron efficiency. *Physiologia Plantarum*,22p.

### W:

**Wintz, H., Fox, T., Wu, YY., Feng, V., Chen, W., Chang, H.S., Zhu, T., Vulpe, C. (2003).** Expression profiles of *Arabidopsis thaliana* in mineral deficiencies reveal novel transporters involved in metal homeostasis. *J. Biol. Chem.*22p

# *Annexes*

# Annexe

**Annexe 1 :** Analyse de variance de l'effet du cuivre sur la longueur des tiges de *Lycopersicon esculentum* Mill

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	688,444	17	40,497				
VAR.FACTEUR 1	634,444	5	126,889	28,198	0,00001		
VAR.RESIDUELLE 1	54	12	4,5			2,121	4,42%

F1	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES		
1.0	F1n1	60	A		
2.0	F1n2	50,167		B	
4.0	F1n4	46,667		B	C
3.0	F1n3	45			C
5.0	F1n5	43,333			C
6.0	F1n6	42,5			C

**Annexe 2 :** Analyse de variance de l'effet du cuivre sur la le nombre des feuilles de *Lycopersicon esculentum* Mill

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	88766,95	17	5221,585				
VAR.FACTEUR 1	79567,61	5	15913,52	20,758	0,00002		
VAR.RESIDUELLE 1	9199,336	12	766,611			27,688	12,48%

F1	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES		
1.0	F1n1	364	A		
2.0		224			B
4.0		200			B
3.0		194,333			B
5.0		192,333			B
6.0		157			B

# Annexe

**Annexe 3 :** Analyse de variance de l'effet du cuivre sur la surface foliaire de *Lycopersicon esculentum* Mill

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	263,692	17	15,511				
VAR.FACTEUR 1	236,558	5	47,312	20,924	0,00002		
VAR.RESIDUELLE 1	27,134	12	2,261			1,504	14,89%

F1	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES	
1.0	F1n1	17,793	A	
2.0		9,937		B
4.0		9,397		B
3.0		9,35		B
5.0		7,327		B
6.0		6,8		B

**Annexe 4 :** Analyse de variance de l'effet du cuivre sur la longueur racinaire de *Lycopersicon esculentum* Mill

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	1019,111	17	59,948				
VAR.FACTEUR 1	929,111	5	185,822	24,776	0,00001		
VAR.RESIDUELLE 1	90	12	7,5			2,739	5,68%

F1	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES		
1.0	F1n1	62,333	A		
4.0		49,333		B	
2.0		49,333		B	
3.0		46,333		B	C
5.0		41,333			C
6.0		40,667			C

# Annexe

**Annexe 5 :** Analyse de variance de l'effet du cuivre sur la teneur relative en eau (RWC) des plantes *Lycopersicon esculentum* Mill.

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	3070,583	17	180,623				
VAR.FACTEUR 1	2690,389	5	538,078	16,983	0,00006		
VAR.RESIDUELLE 1	380,194	12	31,683			5,629	10,23%

F1	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES			
1.0	F1n1	74,907	A			
2.0		63,373		B		
3.0		55,483		B	C	
4.0		54,14		B	C	
5.0		46			C	D
6.0		36,333				D

**Annexe 6 :** Analyse de variance de l'effet du cuivre sur la déperdition d'eau (R.W.L) de *Lycopersicon esculentum* Mill après 60 min.

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	0,039	17	0,002				
VAR.FACTEUR 1	0,031	5	0,006	10,344	0,00057		
VAR.RESIDUELLE 1	0,007	12	0,001			0,025	8,84%

F1	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES			
1.0	F1n1	0,361	A			
2.0		0,289			B	
3.0		0,282			B	
4.0		0,253			B	
5.0		0,253			B	
6.0		0,232			B	

# Annexe

## Annexe 7 : Analyse de variance de l'effet du zinc sur la longueur des tiges de *Lycopersicon esculentum* Mill

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	845,611	17	49,742				
VAR.FACTEUR 1	739,611	5	147,922	16,746	0,00007		
VAR.RESIDUELLE 1	106	12	8,833			2,972	6,65%

F1	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES			
1.0	F1n1	57	A			
2.0		48		B		
3.0		43,333		B	C	
4.0		42,667		B	C	
5.0		40,333			C	
6.0		37			C	

## Annexe 8 : Analyse de variance de l'effet du zinc sur le nombre des feuilles de *Lycopersicon esculentum* Mill

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	69820,45	17	4107,085				
VAR.FACTEUR 1	69401,11	5	13880,22	397,206	0		
VAR.RESIDUELLE 1	419,336	12	34,945			5,911	2,96%

F1	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES				
1.0	F1n1	327,333	A				
2.0		201,667		B			
3.0		189,333			C		
4.0		185,667			C		
5.0		168				D	
6.0		125,333					E

# Annexe

## Annexe 9 : Analyse de variance de l'effet du zinc sur la surface foliaire de *Lycopersicon esculentum* Mill

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	93,147	17	5,479				
VAR.FACTEUR 1	82,274	5	16,455	18,16	0,00005		
VAR.RESIDUELLE 1	10,873	12	0,906			0,952	11,61%

F1	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES				
1.0	F1n1	10,99	A				
2.0		10,467	A	B			
3.0		8,83		B	C		
4.0		7,453			C	D	
5.0		6,517				D	E
6.0		4,927					E

## Annexe 10 : Analyse de variance de l'effet du zinc sur la longueur racinaire de *Lycopersicon esculentum* Mill

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	550,445	17	32,379				
VAR.FACTEUR 1	455,111	5	91,022	11,457	0,00037		
VAR.RESIDUELLE 1	95,333	12	7,944			2,819	5,93%

F1	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES				
1.0	F1n1	56,333	A				
2.0		52,333	A				
3.0		45,667				B	
4.0		45				B	
5.0		43,333				B	
6.0		42,667				B	

# Annexe

**Annexe 11 :** Analyse de variance de l'effet du zinc sur la teneur en eau de *Lycopersicon esculentum* Mill

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	2830,458	17	166,498				
VAR.FACTEUR 1	2627,15	5	525,43	31,013	0		
VAR.RESIDUELLE 1	203,309	12	16,942			4,116	7,43%

F1	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES				
1.0	F1n1	73,2	A				
2.0		63,11		B			
3.0		59,31		B	C		
4.0		52,667			C	D	
5.0		49,667				D	
6.0		34,333					E

**Annexe 12 :** Analyse de variance de l'effet du Zinc sur le taux de déperdition d'eau de *Lycopersicon esculentum* Mill

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	0,33	17	0,019				
VAR.FACTEUR 1	0,325	5	0,065	164,16	0		
VAR.RESIDUELLE 1	0,005	12	0			0,02	6,92%

F1	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES				
1.0	F1n1	0,548	A				
2.0		0,325		B			
3.0		0,295		B			
5.0		0,256			C		
4.0		0,164				D	
6.0		0,137				D	

## Résumé

Le travail présenté dans ce mémoire est une contribution à l'étude des effets provoqués par les métaux lourds (Cu, Zn) sur les paramètres morphologiques et physiologiques de la tomate *Lycopersicon esculentum*. Pour ce faire les différents plants utilisés ont été soumis à des différentes concentrations (100 ; 200 ; 300 ; 400 ; 500 ppm) de cuivre et du zinc comparés aux plants témoins non stressés.

Les deux métaux lourds ont exercé un effet toxique qui se diffère selon le métal et la dose appliquée. Cet effet se manifeste par une réduction de croissance des paramètres morphologiques et physiologiques obtenus à partir de la dose de 100 ppm. Alors que le cuivre à 300 ppm exerce un effet bénéfique bien marqué sur les paramètres morphologiques.

La dose de 500 ppm appliquée par le cuivre et le zinc a provoqué le meilleur effet toxique sur l'ensemble des paramètres étudiés. Notre étude montre que le zinc est plus toxique que le cuivre.

**Mots clés:** *Lycopersicon esculentum* Mill., Métaux lourds, cuivre, zinc, paramètres morphologiques, paramètres physiologiques.

## Abstract

The work presented in this thesis is a contribution to the study of the effects caused by heavy metals (Cu, Zn) on the morphological and physiological parameters of the tomato *Lycopersicon esculentum* Mill. To do this, the different plants used were subjected to different concentrations (100; 200; 300; 400; 500 ppm) of copper and zinc compared to the stressless control plants.

The two heavy metals had a toxic effect which differed according to the metal and the applied dose. This effect is manifested by a reduction in the growth of the morphological and physiological parameters obtained from the dose of 100 ppm. While copper at 300 ppm exerts a beneficial effect only on morphological parameters.

The 500 ppm dose applied by copper and zinc caused the best toxic effect on all the parameters studied. Our study shows that zinc is more toxic than copper.

**Key words:** *Lycopersicon esculentum* Mill., Heavy metals, copper, zinc, morphological parameters, physiological parameters.