

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABDELHAMID IBN BADIS – MOSTAGANEM

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie



DEPARTEMENT DE BIOLOGIE

Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de Magister en Biologie

Option : Sciences du Sol et Environnement

Thème

**Effet des métaux lourds (cuivre et zinc) sur les paramètres chimiques,
morphologiques et biométriques de la tomate
(*Lycopersicon esculentum*. Mill)**

Présenté par : *Mr. HEMEIR Abdelhafidh*

Laboratoire de Biodiversité et de Conservation des Eaux et des Sols

Composition du jury de Soutenance

Nom et Prénom	Grade	Appartenance administrative	Qualité
BELKHODJA Moulay	Pr	Université Es- Senia Oran	Président
CHIBANI Abdelouahab	MCA	Université Abdelhamid Ibn Badis -Mostaganem	Examineur
DJIBAOUI Rachid	MCA	Université Abdelhamid Ibn Badis -Mostaganem	Examineur
REGUIEG YSSAAD Houcine A	Pr	Université Abdelhamid Ibn Badis - Mostaganem	Encadreur
MASMOUDI Ali	MCA	Université Mohamed Khider –Biskra	Co-Encadreur

Année Universitaire : 2014/2015

Remerciement

Je souhaite remercier toutes les personnes qui m'ont permis de mener à bien ce modeste travail. Tout d'abord, mon promoteur Mr REGUIEG Yssaad Houcine Abdelhakim Professeur à la Faculté des sciences de la Nature et de la Vie, Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, je le remercie de ses conseils d'ordre professionnels et personnels ainsi que de sa transmission de la curiosité.

Pour la même occasion, je profite pour remercier mon co-directeur, Dr MASMOUDI Ali, qui m'a soutenu tout au long de mon projet et m'a fait part de nombreux commentaires constructifs. Aussi, je tiens à remercier le Mr GUIMEUR Kamal chef de département d'agronomie à l'université Mohamed Khider Biskra pour son aide pertinente et qui m'a offert l'opportunité de travailler au sein de laboratoire et de terrain d'expérimentation. Je lui exprime ici toute ma reconnaissance.

Mes remerciements s'adressent aussi vivement à tous les membres du jury qui ont accepté d'évaluer mon travail. Je cite Mr BELKHODJA Moulay Professeur à la faculté de biologie de l'université Essenia D'Oran qui m'a fait l'honneur de présider le jury, je lui exprime ma profonde gratitude. Mr DJIBAOUI Rachid maitre de conférences à la faculté des sciences à l'université de Mostaganem et Mr CHIBANI Abdelouahab maitre de conférences à la Faculté des sciences de la Nature et de la Vie, Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, pour leur participation comme membres de jury et contribué ainsi par leur critiques au raffinement de mon écrit. C'est avec sincérité que je leur exprime ma gratitude et mon profond respect.

Enfin, qu'il me soit permis de remercier très sincèrement toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de cette thèse.

Abdelhafidh

Dédicace

Je dédie ce modeste travail:

A mes très chers parents qui ont fait beaucoup de sacrifices tout en veillant sur
mon
éducation et mon instruction pour que je sois un jour le digne de leur bonne foi.

A mon frère et mes sœurs et à toute famille Hemeir.

A tous ceux qui m'ont encouragé et m'aider de
près ou de loin pour réaliser
Ce travail

Abdelhafidh

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Classification des oligo-éléments et des contaminants stricts	2
Tableau 2: Classification de quelques métaux lourds selon leur densité et leur toxicité	4
Tableau 3: Valeur nutritionnelle moyenne pour 100g de tomate crue.....	26
Tableau 4: Poids des constituants de substrat de culture.....	30
Tableau 5 : Quelques analyses physico-chimiques du sol.....	30
Tableau 6: Analyses chimiques de l'eau de robinet	31
Tableau 7 : Evolution des conditions climatiques de la région de Biskra pendant l'essai.....	32
Tableau 8: Quantité totale de sulfate de cuivre et sulfate de zinc en grammes qui doit être apporté à chaque pot	33
Tableau 9: Evolution de la hauteur des plantes en cm de <i>Lycopersicon esculentum</i> Mill en fonction de dose de cuivre et dans le temps (semaines). Les résultats sont présentés en Moyennes ± écart-type, selon le test de Newman-Keuls (P= 5%).....	41
Tableau 10: Taux d'évolution (%) de la hauteur des plantes en fonction de l'application de cuivre dans la 8 ^{ème} et la 14 ^{ème} semaine.	42
Tableau 11 : Longueur moyenne des racines des plantes de <i>Lycopersicon esculentum</i> . en fonction de la dose de cuivre appliquée. Les résultats sont présentés en Moyennes ± écart-type, selon le test de Newman-Keuls (P= 5%).....	43
Tableau 12: Poids frais de la partie aérienne et des racines chez <i>Lycopersicon esculentum</i> Mill. en fonction de la dose de cuivre appliquée. Les résultats sont présentés en Moyennes ± écart-type, selon le test de Newman-Keuls (P= 5%)	45
Tableau 13 : Poids sec de la partie aérienne et des racines chez <i>Lycopersicon esculentum</i> Mill en fonction de la dose de cuivre appliquée. Les résultats sont présentés en Moyennes ± écart-type, selon le test de Newman-Keuls (P= 5%).....	46
Tableau 14: Concentrations de cuivre dans les parties aériennes et des racines de <i>Lycopersicon esculentum</i> Mill en fonction de la dose de cuivre appliquée. Les résultats sont présentés en Moyennes ± écart-type, selon le test de Newman-Keuls (P= 5%).....	49
Tableau 15: Teneur en potassium et en phosphore dans la partie aérienne de <i>Lycopersicon esculentum</i> Mill en fonction de la dose de cuivre appliquée. Les résultats sont présentés en Moyennes ± écart-type, selon le test de Newman-Keuls (P= 5%).....	50
Tableau 16: Nombre et le poids total de fruits de <i>Lycopersicon esculentum</i> Mill en fonction de la dose de cuivre appliquée. Les résultats sont présentés en Moyennes ± écart-type, selon le test de Newman-Keuls (P= 5%).....	53

Tableau 17: Evolution de la hauteur des plantes en cm de <i>Lycopersicon esculentum</i> Mill en fonction de dose de zinc et dans le temps (semaines).....	57
Tableau 18: Taux d'évolution (%) de la hauteur des plantes en fonction de l'application de zinc dans la 8 ^{ème} et la 14 ^{ème} semaine.	58
Tableau 19 : Longueur moyenne des racines des plantes de <i>Lycopersicon esculentum</i> . en fonction de la dose de zinc appliquée. Les résultats sont présentés en Moyennes ± écart-type, selon le test de Newman-Keuls (P= 5%).....	59
Tableau 20: Poids frais de la partie aérienne et des racines chez <i>Lycopersicon esculentum</i> Mill. en fonction de la dose de zinc appliquée. Les résultats sont présentés en Moyennes ± écart-type, selon le test de Newman-Keuls (P= 5%).....	62
Tableau 21: Poids sec de la partie aérienne et des racines chez <i>Lycopersicon esculentum</i> Mill. en fonction de la dose de zinc appliquée. Les résultats sont présentés en Moyennes ± écart-type, selon le test de Newman-Keuls (P= 5%).....	63
Tableau 22: Concentrations de zinc dans les parties aériennes et des racines de <i>Lycopersicon esculentum</i> Mill en fonction de la dose de cuivre appliquée. Les résultats sont présentés en Moyennes ± écart-type, selon le test de Newman-Keuls (P= 5%).	66
Tableau 23: Teneur en potassium et en phosphore dans la partie aérienne de <i>Lycopersicon esculentum</i> Mill en fonction de la dose de zinc appliquée. Les résultats sont présentés en Moyennes ± écart-type, selon le test de Newman-Keuls (P= 5%).	67
Tableau 24: Nombre et le poids total de fruits de <i>Lycopersicon esculentum</i> Mill. en fonction de la dose de zinc appliquée. Les résultats sont présentés en Moyennes ± écart-type, selon le test de Newman-Keuls (P= 5%).....	70

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : La table périodique des éléments	1
Figure 2: Origine des métaux lourds dans le sol d'après Robert et Juste, 1999	5
Figure 3 : Caractéristiques morphologiques de la tomate	22
Figure 4 : Conduite de l'essai	32
Figure 5: Schéma de dispositif expérimental adopté	34
Figure 6: Dispositif expérimental adopté dans la serre pour le cuivre et pour le zinc séparés	34
Figure 7: Spectrophotomètre à UV (colorimètre)	37
Figure 8: photomètre à flamme.....	37
Figure 9: Le protocole de travail expérimental.....	38
Photo 1: Effet des métaux lourds sur la tomate.....	40
Figure 10: Effet du cuivre sur la hauteur des plantes de <i>Lycopersicon esculentum</i> Mill. en fonction du temps (semaines).....	42
Figure 11: Effet du cuivre sur la longueur des racines de <i>Lycopersicon esculentum</i> Mill.....	43
Figure 12: Effet du cuivre sur la biomasse fraîche aérienne et racinaire de <i>Lycopersicon esculentum</i> Mill.....	46
Figure 13: Effet du cuivre sur la biomasse sèche aérienne et racinaire de <i>Lycopersicon esculentum</i> Mill.....	47
Figure 14: Effet du cuivre sur son accumulation dans la partie aérienne et racinaire de <i>Lycopersicon esculentum</i> . Mill.....	50
Figure 15: Effet du cuivre sur la concentration de potassium et de phosphore dans la partie aérienne de <i>Lycopersicon esculentum</i> Mill.....	51
Figure 16: Effet du cuivre sur le nombre et le poids des fruits de <i>Lycopersicon esculentum</i>	54
Figure 17: Effet du zinc sur la hauteur des plantes de <i>Lycopersicon esculentum</i> Mill. en fonction du temps (semaines).....	59
Figure 18: Effet du zinc sur la longueur des racines de <i>Lycopersicon esculentum</i> Mill.....	60
Figure 19: Effet du zinc sur la biomasse fraîche aérienne et racinaire de <i>Lycopersicon esculentum</i> Mill.....	63
Figure 20: Effet du zinc sur la biomasse sèche aérienne et racinaire de <i>Lycopersicon esculentum</i> Mill.....	64
Figure 21: Effet du zinc sur son accumulation dans la partie aérienne et racinaire de <i>Lycopersicon esculentum</i> Mill.....	67
Figure 22: Effet du zinc sur la concentration de potassium et de phosphore dans la partie aérienne de <i>Lycopersicon esculentum</i> Mill.....	68

Figure 23: Effet du zinc sur le nombre et le poids de fruits de *Lycopersicon esculentum* Mill.....71

TABLE DES MATIERES

Introduction

PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I : Les métaux lourds (Cu, Zn) dans le sol et le végétal

1. Définition des éléments traces métalliques	1
2. Définition des oligo-éléments	2
3. Définition des métaux lourds	3
3.1 Origine de la contamination des sols par les métaux lourds.....	4
3.1.1 Origine naturelle.....	5
3.1.2 Origine anthropique	5
3.2 Spéciation et mobilité des métaux lourds.....	6
3.3. Les principaux métaux lourds	6
3.3.1 Le cuivre	7
3.3.1.1 Fond pédogéochimique et sources de contamination des sols en cuivre.....	7
3.3.1.2 Le cuivre dans le sol	8
3.3.1.3 Le cuivre dans la plante	9
3.3.1.3.1 Le cuivre, oligo-élément.....	9
a L'absorption	9
b Distribution du cuivre dans la plante.....	11
c Rôle physiologique	11
3.3.1.3.2 La déficience en cuivre et sa correction.....	11
3.3.1.3.3L'excès de cuivre et sa correction	12
3.3.2 Le zinc	13
3.3.2.1 Fond pédogéochimique et sources de contamination des sols en zinc.....	13
3.3.2.2 Le zinc dans le sol	14
3.3.2.3 Le zinc dans la plante	14
a1 L'absorption	14
b Rôle physiologique	15
c La déficience en Zn et sa correction.....	16
d L'excès de zinc et sa correction.....	17
Conclusion	17

Chapitre II : La tomate (*Lycopersicon esculentum*. Mill).....18

1. Origine et histoire	19
2. Classification de la tomate	19
2.1. Classification botanique	19
2.2. Classification génétique	20
2. 2.1 Variétés fixées	20
2.2.2 Variétés hybrides.	20

3. Caractéristiques morphologiques de la tomate	21
3.1. L'appareil végétatif	21
3.1.1. Le système racinaire	21
3.1.2. La tige	21
3.1.3. Les feuilles	21
3.2. L'appareil reproducteur.....	21
3.2.1. Les fleurs	21
3.2.2. Le fruit	22
3.2.3. Graine	22
4. Exigences de la tomate.....	23
4.1. Température	23
4.2. Humidité relative, (H.R. %).	23
4.3. Lumière	23
4.4. Sol.....	23
a. Structure et texture	23
b. pH	24
c. Salinité	24
4.5. Besoins hydriques	24
5. Le cycle biologique de la tomate	24
5.1. Germination	24
5.2. Croissance.....	24
5.3. Floraison	25
5.4. Phase de fructification et maturation	25
6. Importance économique	25
7. La valeur nutritionnelle	26
8 Maladies de la tomate.....	27
8.1. Les maladies cryptogamiques.....	27
a. L'alternariose -b. Le mildiou -c. La fusariose -d. L'oïdium -e. Pourriture grise.....	27
8.2. Les maladies bactériennes.....	27
a. Le chancre bactérien -b. Le flétrissement bactérien.....	27
8.3. Les maladies virales.....	28
a. (TYCL V) - b. (CMV) - c. (TSWV).....	28

PARTIE EXPERIMENTALE

Chapitre III : Matériel et méthodes	29
1 Préparation du substrat de culture	30
2 Matériel végétal	32
3 Conduite de l'essai.....	32
3.1 Semis.....	32
3.2 L'arrosage	33
3.3 Fertilisation minérale	33
3.4 Protocole expérimental.....	33
4 Paramètres mesurés	34

4.1 Paramètres morphologiques	34
4.1.1 La hauteur des plantes	34
4.1.2 Longueur des racines	34
4.2 Paramètres biométrique	34
4.2.1 La biomasse fraîche aérienne et racinaire	34
4.2.2 La biomasse sèche aérienne et racinaire	35
4.3 Paramètres de la production.....	35
4.3.1 Nombre totales des fruits	35
4.3.2 Le poids total des fruits.....	35
4.4. Paramètres chimiques.....	35
4.4.1. Extraction des éléments minéraux de la plante	35
4.4.2. Dosage du potassium par le photomètre à flamme.....	35
4.4.3. Dosage du phosphore par le spectrophotomètre à UV	36
4.4.4. Dosage du Cu et du Zn par le spectrophotomètre d'absorption atomique.....	37
5. Analyses statistiques	37

Chapitre IV : Résultats et discussion.....39

1 L'effet du cuivre.....	40
1.1 Paramètres morphologiques	40
Discussion	44
1.2 Paramètres biométriques.....	45
Discussion	47
1.3 Paramètres chimiques.....	49
Discussion	51
1.4 Paramètres de la production	53
Discussion	54
-Corrélation entre le cuivre et les paramètres étudiés.....	55
2 L'effet du zinc	57
2.1 Paramètres morphologiques.....	57
Discussion	60
2.2 Paramètres s biométrique	62
Discussion.....	64
2.4 Paramètres chimiques	66
Discussion.....	68
2.3 Paramètres de la production	70
Discussion.....	71
-Corrélation entre le zinc et les paramètres étudiés.....	71
Conclusion	73
Références bibliographiques	
Annexes	
Résumé	

INTRODUCTION

Introduction

Les activités anthropiques, i.e. activités industrielles et agricoles, peuvent être à l'origine d'une accumulation de métaux dans l'environnement et en particulier dans les sols, au-delà des concentrations naturellement observées. L'apport des métaux au sol se fait généralement soit par retombées atmosphériques, soit par l'application directe au sol, ou indirecte via la végétation, de matériaux (fertilisants, phytosanitaires, amendements organiques, boues de station d'épuration notamment,...) concentrés en métaux (**Alloway, 1995 ; Adriano, 2001**). La contamination des sols par les métaux peut avoir deux conséquences majeures. D'une part, elle peut favoriser la dispersion des métaux dans l'environnement vers les eaux de surface par érosion, vers les eaux souterraines et les nappes par lixiviation-lessivage et, enfin, par transferts dans la chaîne alimentaire par l'intermédiaire des animaux (vers de terre, escargots...) et plus encore des végétaux (**Adriano, 2001**). D'autre part, la contamination des sols par les métaux peut affecter les différentes fonctions du sol, i.e. celles contribuant aux services écosystémiques, et en particulier sa fonction de production en zones agricoles.

L'intensification agricole s'accompagne généralement d'un accroissement significatif de la fertilisation définie comme étant l'ensemble des amendements (engrais de ferme et engrais chimiques) apportés aux terres pour assurer aux plantes des compléments d'éléments nutritifs nécessaires à leur croissance de manière à améliorer et augmenter le rendement et la qualité des cultures (**Anafide, 2006**).

Les activités agricoles sont la source de nombreux polluants disséminés dans l'environnement. Les éléments en traces métalliques (ETM), incluant des métaux et des métalloïdes, font partie de ces polluants à risque de préoccupation prioritaire car ce sont des éléments très toxiques et non dégradables. Les sols ont été contaminés par des polluants métalliques dont les concentrations n'ont cessé d'augmenter au cours du 20^{ème} siècle entraînant des effets toxiques chez les êtres vivants et perturbant le bon fonctionnement des écosystèmes (**Nriagu et Pacyna, 1988**).

La région de Biskra a connu un développement agricole important, notamment la plasticulture, qui a enregistré un départ vertigineux à partir des années 80. La tomate *Lycopersicon exulentum* Mill, qui est une des cultures stratégiques les plus importantes dans le monde, vient en tête des cultures sous serre dans la région de Biskra.

L'intensification de l'agriculture dans la région a exigé l'augmentation de l'application des produits phytosanitaires et des engrais. 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'impact des métaux lourds le cas du cuivre et du zinc sur les paramètres morphologiques, chimiques, biométriques et de la production 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, enfin la troisième partie concerne les résultats et discussion.

PARTIE
BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I :
Les métaux lourds
(Cu, Zn) dans le sol et
le végétal

I.2 Définition des oligo-éléments

Les oligo-éléments se différencient des éléments majeurs par leur fonction catalytique et leurs besoins très minimes (**Duthil, 1973**). Ils agissent soit en tant que composant d'enzymes, soit comme activateur d'enzymes. 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 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**).

Tableau 1: Classification des oligo-éléments et des contaminants stricts (**Tremel-Schaub et Feix, 2005**).

Pour l'homme	
Oligo-éléments à risque élevé de carence	Cu, Zn, Se, Cr, Mo
Oligo-éléments à faible risque de carence (non prouvée chez l'homme)	Ni, Co, As
Contaminants stricts	Pb, Cd, Hg, Tl (thallium)
Pour les plantes supérieures (Bargagli, 1998)	
Éléments essentiels	B, Co, Cu, Fe, Mn, Mo, Zn
Éléments bénéfiques	Cl, Cr, F, I, Li, Na, Ni, Rb (rubidium), Se, Si, Sr (strontium), Ti (titane), V (vanadium)
Contaminants stricts	Br, Cd

I.3 Définition des métaux lourds

L'appellation métaux lourds est cependant une appellation courante et qui n'a ni fondement scientifique, ni application juridique.

Les métaux lourds sont des métaux formant des précipités insolubles avec les sulfures. D'autres définitions existent : métaux dont la masse volumique est supérieure à 6 g.mL⁻¹ (parfois la définition donne une limite de 4,5 ou 5,0 g.mL⁻¹); métal dont le numéro atomique est supérieur à 20 (**Tremel-Schaub et Feix, 2005**).

Les métaux lourds sont réputés toxiques, alors que certains sont des oligo-éléments (Cu, Zn, Fe). C'est pourquoi le terme de métal lourd est souvent appliqué à tort à des éléments en raison de leur toxicité. De plus, certains éléments sont déclarés métaux lourds alors qu'ils sont des métalloïdes (Se, As) ou qu'ils ne sont pas « lourds » (Be, Al). De fait, il est préférable de ne pas utiliser ce vocable, devenu ambigu (**Tremel-Schaub et Feix, 2005**).

Certains chercheurs utilisent des définitions plus spécifiques encore. Le géologue par exemple, considérera comme métal lourd tout métal réagissant avec la pyrimidine (C₆H₅N) (**Anfossi et al, 1997**).

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

- ❖ 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). Par exemple, le zinc (Zn), à la concentration du milli-molaire, 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**).
- ❖ 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) (**Kabata-Pendias et Pendias, 2001**).

Tableau 2: Classification de quelques métaux lourds selon leur densité et leur toxicité (Bliefert et Perraud, 2001)

Métal	Plantes		animaux		Densité(en g/cm ³)
Pt		T			21.4
Hg		T		T	13.59
Pb		T		T	11.34
Mo	E		E	T	10.2
Cu	E	T	E	T	8.92
Ni		T	E		8.90
Co			E		8.9
Cd		T		T	8.65
Fe	E		E		7.86
Sn			E		7.28
Cr			E		7.20
Mn	E	T	E		7.2
Zn	E	T	E		7.14
V	E		E		5.96

T : toxique, E : essentiel

I.3.1 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 des sols. Dans la croûte terrestre, les métaux lourds sont présents sous forme de minerai, d'où ils peuvent être mobilisés par des phénomènes naturels comme l'érosion ou les éruptions volcaniques, mais également par des activités anthropiques. (Zorrig, 2010) (Figure 2).

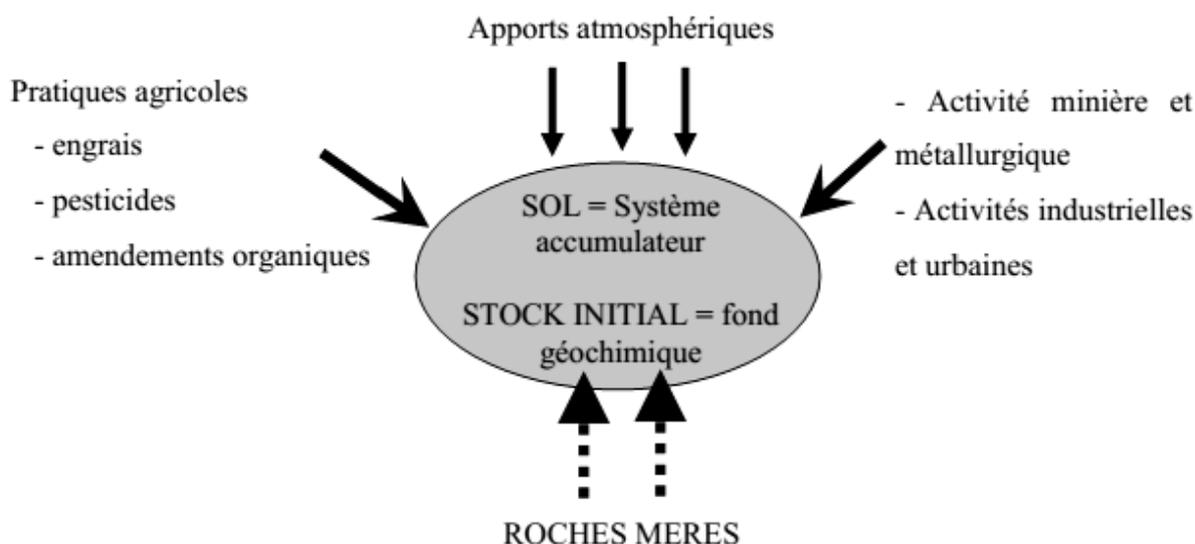


Figure 2: Origine des métaux lourds dans le sol d'après Robert et Juste, 1999

I.3.1.1 Origine naturelle

La présence des ETM dans les sols est due à différentes sources : endogènes ou exogènes. Les concentrations en ETM dits endogènes, c'est-à-dire liés à l'évolution géologique et pédologique du matériau parental en absence de tout apport d'origine humaine, constituent le fond pédo-géochimique naturel. Ce fond varie grandement en fonction de la nature du matériau parental des sols, de l'histoire géologique locale, du type et de la durée de la pédogenèse (Baize, 2009).

I.3.1.2 Origine anthropique

L'inquiétude sur les pollutions des sols par l'anthropisation est née de la forte augmentation des contaminations liées au développement agro-industriel de notre société. Ce développement a induit le relargage important de composés minéraux et notamment les éléments en trace, la plupart du temps présents sous forme immobile, vers les écosystèmes, sans qu'ils soient éliminés par les processus de biodégradation et d'épuration (Bourrelier et al, 1998).

Les sources de pollutions liées aux activités anthropiques sont diverses, allant de la pulvérisation sous forme de pesticide dans l'agriculture, à l'extraction minière, et au dépôt atmosphérique sur le sol, sans être exhaustif (Naval, 2011), fonderies, combustions et incinérateurs des déchets (Nagajyoti et al, 2010).

I.3.2 Spéciation et mobilité des métaux lourds

✓ La spéciation

La spéciation est définie comme la distribution des espèces chimiques d'un élément au sein d'un système, solide ou liquide (**Templeton et al., 2000**). Ces espèces sont différenciées selon leur composition isotopique, leur structure électronique, leur état d'oxydation, et/ou leur structure moléculaire. Cependant, le terme de spéciation d'un élément dans un sol est souvent utilisé dans un sens plus large englobant la distribution ou les processus d'identification des différentes phases d'un élément dans le milieu solide ou liquide (**Ure et Davidson, 2007**). Pour décrire cela, l'IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) a proposé d'utiliser le terme « fractionation » et de garder au terme « spéciation » son sens classique (**Templeton et al, 2000**).

✓ La mobilité

La forme chimique des ETM affecte leur mobilité dans les sols et leur capacité de transfert dans les différents compartiments environnementaux. La mobilité correspond à l'aptitude d'un élément à passer d'un compartiment du sol où il est retenu avec une certaine énergie vers un autre compartiment où il est retenu avec une énergie moindre (**Juste, 1988**). Elle peut être étudiée au travers du changement de phase porteuse d'un élément (**McBride, 1994**). A l'échelle d'un sol, la mobilité d'un élément peut être évaluée en étudiant sa distribution verticale ou latérale.

✓ La biodisponibilité

La notion de biodisponibilité des ETM est définie par le passage d'un élément au travers d'une membrane biologique, végétale ou animale (**Lebourg et al, 1996**). Elle dépend d'une part, de la fraction de l'élément qui peut être mobilisée physico-chimiquement dans le sol et d'autre part, de la capacité d'une espèce donnée à l'absorber (**Michel et Ludwig, 2005**).

I.3.3 Les principaux métaux lourds

D'un point de vue biologique, le cuivre et le zinc sont des « micro-éléments » ou oligo-éléments : ils sont indispensables au métabolisme des êtres vivants (végétaux et animaux), on les retrouve donc dans leur tissus mais à de plus faibles teneurs que dans les sols (< 0,01%). Cependant, aux fortes concentrations, ils pourront devenir toxiques, ce phénomène justifiera alors l'appellation de micropolluant métallique.

Dans la suite, le cuivre et le zinc pourront être indifféremment appelés élément trace métallique (ETM) ou oligo-élément. Le terme « métal lourd », qui désigne normalement les métaux formant des précipités insolubles avec les sulfures, peut induire de nombreuses confusions entre micropolluants métalliques, oligo-éléments, et métalloïdes, ce pourquoi il sera proscrit (**Marcato, 2007**).

I.3.3.1 Le cuivre

I.3.3.1.1 Fond pédogéochimique et sources de contamination des sols en cuivre

Le cuivre est présent dans la croûte terrestre à des concentrations comprises entre 25 et 75 mg / kg, en moyenne 55 mg / kg. Son modèle de l'abondance dans les roches montre la tendance à la concentration dans les roches ignées volcaniques et dans les sédiments argileux.

Le cuivre révèle une forte affinité pour le soufre, d'où ses principaux minéraux sont la chalcopirite, CuFeS_2 ; bornite, Cu_5FeS_4 ; chalcocite, Cu_2S ; et covellite, CuS . Au cours de l'altération des sulfures de cuivre, Cu est incorporé dans l'oxyde et le carbonate de minéraux dont la cuprite, Cu_2O ; tenarite, CuO ; malachite, $\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$; et l'azurite, $\text{Cu}_2(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$ sont les plus communs. Le Cu est souvent associée à la sphalérite, ZnS ; pyrite, FeS ; et à la galène, PbS . Ses minerais sont généralement trouvés dans des roches ignées acides et divers dépôts sédimentaires (**Kabata-Pendias, 2011**).

Dans les roches sédimentaires, la concentration est plus élevée dans les schistes, indiquant que Cu serait surtout adsorbé sur les particules fines. L'altération des dépôts de Cu a conduit à des minéraux bleus et verts. Quelle que soit la forme de Cu dans les roches mères, il se dissout en Cu^{2+} au cours du processus d'altération (**Loué, 1993**).

Certaines activités anthropiques sont à l'origine d'un enrichissement des sols en éléments en traces métalliques comme le cadmium (Cd), le zinc (Zn), le nickel (Ni), le plomb (Pb) et (Cu). Parmi les sources industrielles et urbaines de contamination des sols en Cu, l'activité minière et le traitement des minerais, l'utilisation d'installations électriques (câblages) en Cu ainsi que la production et l'incinération de déchets municipaux provoquent une pollution localisée des sols. D'autre part, l'épandage de boues de station d'épuration, de déchets municipaux et de déjections animales (volailles, porcs, bovins), pouvant contenir des éléments en traces métalliques comme Cu, peuvent provoquer une pollution diffuse des terres agricoles (**Tiller et Merry, 1981 ; Baker et Senft, 1995 ; Bourrelier et Berthelin, 1998**).

Outre ces apports anthropiques, la source principale de pollution des sols en Cu est l'utilisation de fongicides à base de Cu dans les vignobles, les vergers et pour d'autres cultures sensibles à des maladies cryptogamiques (notamment pommes de terre, houblon et tomates) (Tiller et Merry, 1981). L'action protectrice des sels de Cu contre le mildiou (champignon phytopathogène *Plasmopara viticola*) a été découverte fortuitement à la fin du 19ème siècle. Depuis, l'utilisation de formulations à base de Cu (par exemple la bouillie bordelaise, $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CuSO}_4$) comme fongicides en viticulture s'est généralisée dans toutes les régions viticoles françaises et particulièrement en Languedoc-Roussillon, où la vigne fut de longue date la principale culture de la région (Tiller et Merry, 1981 ; Chaignon, 2001). Une telle utilisation de sels de Cu sur les vignes a conduit à l'accumulation continue de Cu dans les horizons superficiels des sols viticoles, multipliant ainsi par un facteur de 10 à 100 les teneurs naturelles des sols (Brun, 1998 ; Chaignon, 2001). D'ailleurs, des concentrations de 200 à 1000 mg kg⁻¹ souvent observées dans de tels sols, sont bien au-dessus des normes fixées en France pour l'épandage de boues de station d'épuration de 100 mg kg⁻¹ pour Cu (Flores-Vélez et al, 1996 ; Baize et Tercé, 2002).

I.3.3.1.2 Le cuivre dans le sol

Les valeurs générales pour les teneurs moyennes en Cu total dans les sols des différents groupes partout dans le monde entre 14 et 109 mg / kg (Kabata-Pendias, 2011).

Dans les sols, le cuivre et le zinc se retrouvent, comme les autres métaux traces, au sein des différents constituants des sols: dans les tétraèdres des silicates des minéraux primaires et secondaires ; au sein des autres édifices cristallins (ou gels amorphes) : phosphates, carbonates, oxy-hydroxydes de fer et de manganèse, sulfures ; dans la matière organique plus ou moins humifiée ou dans la biomasse microbienne. La fraction la plus accessible à la solution du sol sera celle adsorbée à la surface de chacun de ces constituants (Baize, 1997).

Les contenus de cuivre sont étroitement associés à la texture du sol et sont généralement les plus faibles dans les sols sableux légers et les plus élevés dans les sols limoneux. La régularité à grande échelle de l'apparition du Cu dans les sols indique que deux facteurs principaux, matériau originel et les processus de formation du sol, gouvernent le statut initial du Cu des sols. En outre, la fraction d'argile contribue de manière significative à la teneur en Cu de sols. Autres propriétés du sol, tels que les oxydes de Fe et Mn, et la saturation en bases, expliquent environ 15-25% de tous les facteurs d'impact (Kabata-Pendias, 2011).

Selon **Lundsgaard et al. (2006)**, Les formes de cuivre dans le sol sont influencées par le pH du sol, dans la solution des sols de pH supérieur à 6, le cuivre se trouve presque exclusivement sous forme de complexes organiques. Pour les sols à pH inférieur à 5, c'est à dire les sols trop acides, la part de Cu^{++} augmente dans la quantité de cuivre total de la solution du sol.

I.3.3.1.3 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^{-1} de matière sèche suivant le stade de développement et l'espèce considérés. Au-delà du seuil de toxicité de 15-30 mg kg^{-1} dans les parties aériennes, Cu peut être phytotoxique (**Davis et Beckett, 1978 ; Macnicol et Beckett, 1985 ; Marschner, 1995 ; Reuter et Robinson, 1997**).

I.3.3.1.3.1 Le cuivre, oligo-élément

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-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^+ , 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 (e.g. 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).

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 (*Brassica napus* L.) (Chaignon et al, 2002a), tomate (*Lycopersicon esculentum* L.) (Chaignon et al, 2002a ; Cornu et al, 2007), niébé (*Vigna unguiculata* L.) (Kopittke et Menzies, 2006), ray gras (*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 (citrates) (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 (citrates, malates), acides aminés (histidine, nicotianamine), métallothionéines et phytochélatines (Marschner, 1995 ; Clemens, 2001 ; Dučić et Polle, 2005).

c. Rôles physiologiques

Le cuivre est un élément de transition à activité redox avec des rôles dans la photosynthèse, la respiration, le métabolisme de C et N, et la protection contre le stress oxydatif. Comme Fe, il forme des complexes très stables et participe à des réactions de transfert d'électrons. Le Cu divalent est facilement réduit en Cu monovalents qui est instable (**Marschner, 2012**). Il est associé à de nombreuses enzymes intervenant dans des processus physiologiques clés tels que la photosynthèse et la respiration (**Bussler, 1981 ; Walker et Webb, 1981 ; Kabata-Pendias et Pendias, 1992 ; Mengel et Kirkby, 2001**) :

- la plastocyanine des chloroplastes : protéine participant à la chaîne de transport des électrons au cours de la photosynthèse,
- la superoxyde dismutase : responsable de la détoxification de radicaux superoxydes,
- la cytochrome oxydase : oxydase terminale de la chaîne de transport d'électrons dans les mitochondries (respiration),
- l'ascorbate oxydase : catalysant les réactions d'oxydation de l'acide ascorbique,
- les peroxydases et les phénols oxydases : enzymes impliquées dans la synthèse des plastocyanines et de la lignine, respectivement.

Le cuivre a une forte affinité pour les groupes sulfhydriles et peptidiques, et donc à des protéines riches en cystéine, ainsi que également des groupes carboxyliques et phénoliques. Par conséquent, plus de 98% du Cu dans les plantes est présent dans des formes complexées et les concentrations de Cu^{2+} et Cu^+ libres sont extrêmement faibles dans le cytoplasme.

Par ailleurs, Cu a un effet marqué sur la formation et la composition chimique des parois cellulaires via son rôle direct dans la biosynthèse de la lignine. D'ailleurs, chez des plantes souffrant de déficience en Cu sévère, les vaisseaux du xylème sont insuffisamment lignifiés (**Marschner, 2012**).

I.3.3.1.3.2 La déficience en cuivre et sa correction

Le cuivre est un élément dont la plante a besoin en faibles quantités dans une fourchette de 25 à 150 g/ha. La carence en cuivre est souvent rencontrée dans les sols organiques et expliquée par le fait que le cuivre est plus rapidement adsorbé par la matière organique du sol que les autres éléments. Un pH élevé peut aussi induire un stress nutritionnel en cuivre, la déficience en cuivre est observée au dessus du pH 7 (**El Alaoui, 2007**).

Le cuivre est légèrement mobile dans les plantes comme il est fortement lié par l'azote et les protéines. Avec un déficit en Cu, une plante peut pousser la végétation normale pour un court laps du temps, mais il sera un échec dans la redistribution de Cu à partir de feuilles âgées et les racines provoquant la chlorose et la nécrose des pointes dans les nouvelles feuilles, connus comme des symptômes de carence en Cu. La carence en Cu affecte fortement les processus physiologiques et par conséquent la production des plantes (**Kabata-Pendias, 2011**).

Les applications du cuivre minéral au sol comme CuSO_4 ou sous forme d'oxyde, ou des composés métalliques à libération lente, les boues d'épuration ou les engrais sont souvent adaptés pour les effets à long terme. Les applications foliaires de Cu sous forme de sels inorganiques, des oxydes, ou des chélates peuvent être utilisées pour corriger rapidement la carence en cuivre dans le sol et des plantes cultivées. L'utilisation d'engrais contenant du Cu peut augmenter la concentration du Cu des parties comestibles des cultures où il y a des carences alimentaires de Cu chez les humains et le bétail (**White et Broadley, 2009**).

I.3.3.1.3.3 L'excès de cuivre et sa correction

Le cuivre, comme les autres éléments essentiels B, Mn, Mo et Zn, est un oligoélément potentiellement phytotoxique en trop forte concentration. La phytotoxicité de Cu se manifeste principalement au travers de la rhizotoxicité et parfois de la mise en place d'une déficience induite en Fe. Par ailleurs, sa phytotoxicité semble altérer l'intégrité des membranes plasmiques des cellules racinaires et affecter la perméabilité membranaire provoquant ainsi la perte d'ions (ex. K^+ , HPO_4^{2-}) et de solutés (**Woolhouse et Walker, 1981 ; Kabata-Pendias et Pendias, 1992 ; Marschner, 1995**). Un excès de Cu dans le milieu environnant induit une rhizotoxicité visible au travers d'un épaississement et d'une coloration brune des racines, de la diminution de la ramification et du nombre de poils racinaires et de l'élongation racinaire globale. Des lésions de l'épiderme sont également observées ainsi qu'un épaississement des apex et des dommages occasionnés sur les méristèmes. Sa phytotoxicité semble altérer l'intégrité des membranes plasmiques des cellules racinaires et affecter la perméabilité membranaire provoquant ainsi la perte d'ions (K^+ , HPO_4^{2-}) et de solutés (**Michaud, 2007**)

La correction de l'excès de cuivre se fait par l'application de chaux (**Loué, 1993**), aussi on y remédie par l'apport d'amendement organique (**Cahurel, 2008**).

I.3.3.2 Le zinc

I.3.3.2.1 Fond pédogéochimique et sources de contamination des sols en zinc

La teneur moyenne en Zn dans la croûte terrestre est estimée à 70 mg / kg, et le même niveau moyen est pour les sols à travers le monde. Zn est assez uniformément répartie dans les roches magmatiques, alors que dans les roches sédimentaires il est susceptible d'être concentrés dans les sédiments argileux, jusqu'à 120 mg / kg. Il est très mobile pendant les processus d'altération et ses composés facilement solubles sont prêts à précipiter par réaction avec les carbonates, ou il est absorbé par les minéraux et les composés organiques, en particulier en présence d'anions de soufre. Les minéraux communs du Zn sont : sphalérite, αZnS ; wurzite, βZnS ; zincite, ZnO ; smithsonite, ZnCO_3 ; willemite, Zn_2SiO_4 ; et hemimorphite, $\text{Zn}_4\text{Si}_2\text{O}_7 (\text{OH})_2 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$. Tous ces minéraux contiennent environ 50% de Zn **(Kabata-Pendias, 2011)**.

Le zinc diffère du cuivre du fait son sulfure est et plus soluble. En comparaison de Cu, Zn est plus mobile. L'altération des minéraux du Zn donne Zn^{2+} en solution **(Loué, 1993)**.

Les sources anthropiques de Zn sont liées, tout d'abord, à l'industrie des métaux non ferriques, puis à la pratique agricole. La contamination des sols contemporains observés avec Zn a déjà apporté Zn à une accumulation extrêmement élevée dans le top des sols dans certains domaines. D'autres problèmes liés à la pollution Zn sont des changements dans la spéciation des métaux. Par exemple, dans le sol (sable limoneux, pH 6,1, MO 1,25%) amendé avec boues d'épuration riche en Zn, on a observé une augmentation des espèces du Zn disponibles facilement de 3% à 21%, et faiblement liée ou espèces de Zn échangeables de 21% à 34% de la teneur totale du Zn. Il est plutôt très difficile d'estimer la pollution Zn dans les sols **(Kabata-Pendias, 2011)**. Diatta et al (2008) proposé (après Müller) à utiliser l'indice de géoaccumulation Zn qui aide à évaluer la contamination des sols Zn.

Le sort de la Zn provenant de diverses sources (par exemple, les dépôts atmosphériques, les engrais, les pesticides, les boues d'épuration et les cendres) diffère en fonction de ses espèces chimiques et de leur affinité pour les paramètres du sol. La variabilité dans les isotopes du Zn est suggérée de se prêter à identifier les différentes sources de zinc atmosphériques, cependant, l'examen de son cycle biochimique dans les profils de tourbe **(Weiss et al, 2007)**.

I.3.2.2.2 Le zinc dans le sol

Les valeurs générales pour le contenu moyen en Zn total dans les sols des différents groupes, partout dans le monde, se situent entre 60 et 89 mg / kg. Les contenus de Zn sont étroitement associés à la texture du sol et sont généralement les plus bas dans le sol léger et sablonneux. Sa concentration élevée est souvent observée dans les sols calcaires et organiques (**Kabata-Pendias, 2011**).

Dans les sols, le cuivre et le zinc se retrouvent, comme les autres métaux traces, au sein des différents constituants des sols: dans les tétraèdres des silicates des minéraux primaires et secondaires ; au sein des autres édifices cristallins (ou gels amorphes) : phosphates, carbonates, oxy-hydroxydes de fer et de manganèse, sulfures ; dans la matière organique plus ou moins humifiée ou dans la biomasse microbienne. La fraction la plus accessible à la solution du sol sera celle adsorbée à la surface de chacun de ces constituants (**Baize, 1997**).

La teneur en zinc total des sols est liée à celle de la roche mère. Les sols dérivant de roches ignées basiques peuvent être bien pourvus en zinc. Les sols sur roches mère sédimentaires siliceuses sont plutôt pauvres en zinc.

L'intensité de l'adsorption de Zn tend à croître avec l'élévation du pH, et la mobilité de Zn se trouve nettement diminuée au-dessus de pH 7 (**Loué, 1993**).

I.3.2.2.3 Le zinc dans la plante

a. L'absorption et distribution

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. **Kabata-Pendias 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**).

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)**.

b. Rôle physiologique

Zinc (Zn) est le deuxième métal de transition le plus abondant dans les organismes vivant après Fe. Dans les plantes, ainsi que dans d'autres systèmes biologiques, Zn existe seulement comme ZnII, et ne prend pas part à des réactions d'oxydoréduction. Les fonctions métaboliques de Zn sont basées sur sa forte tendance à former des complexes tétraédriques avec les ligands de N-, O- et en particulier S- à travers lesquels il joue un rôle fonctionnel (catalytique) et structural dans des réactions enzymatiques **(Vallee et Auld, 1990)**.

Le zinc entre dans la composition d'un très grand nombre d'enzymes (plus de 300), au sein desquelles il remplit trois types de fonctions : catalytiques, co-catalytiques ou structurales. Le zinc est particulièrement important pour le métabolisme des sucres, des protéines et des phosphates, mais il joue également un rôle par rapport à l'ADN, via des métalloprotéines impliquées dans la réplication et la transcription de l'ADN, et donc la régulation de l'expression des gènes. De plus, le zinc influence également l'intégrité et la perméabilité des membranes, et permet la protection des lipides et protéines membranaires du stress oxydant **(Marcato, 2007)**.

Une des fonctions les plus importantes du zinc est son effet sur la régulation de la croissance par le contrôle de la synthèse du tryptophane. Le tryptophane est un précurseur de l'acide indole B- acétique, et la formation de cette substance de croissance est donc indirectement influencée par Zn (**Loué, 1993**).

c. La déficience en Zn et sa correction

La déficience en zinc peut être vue dans les sols érodés, calcaires et acides aux intempéries. Elle est souvent accompagnée d'une carence en fer dans les sols calcaires. La carence en zinc dans ces sols est liée à l'adsorption de zinc de la solution par des particules argilo-calcaires du sol. Dans les sols érodés, la déficience en zinc est causée par une carence en matière organique. La carence en zinc peut être aussi liée aux conditions météorologiques, elle augmente dans des conditions météorologiques froides et humides. Elle peut être due à la croissance limitée des racines dans les sols frais, ou à la réduction de l'activité de micro-organismes et la réduction de la libération de zinc à partir de matières organiques (**Alam et al, 2010; Abdou et al, 2011 ; Mousavi, 2011**).

Les symptômes de carence en zinc apparaissent en premier sur les jeunes feuilles des plantes; car le zinc ne peut pas être transféré aux jeunes tissus à partir des tissus âgés (le zinc n'est pas un élément mobile). Les zones entre-nervures dans les plantes sont de couleur jaune par une carence en zinc (**Vitosh et al, 1994**). Dans les dicotylédones, la distance entre-nœuds et la taille de la feuille seront courtes et dans les plantes monocotylédones, le maïs en particulier, des bandes entre dans la nervure principale sur les deux côtés des feuilles en cas de déficience générale en zinc, la croissance de la partie aérienne est plus touchée que celle des racines par la carence en zinc (**Boardman et McGuire, 1990; Gokhan, 2002 ; Mousavi, 2011**).

L'absorption du zinc par les plantes ne dépasse guère 0.5 kg/ha/an. Dans la pratique, la carence en zinc est facilement corrigée par pulvérisation foliaire ou par apport au sol. Les apports au sol sont plus efficaces pour la correction de cette déficience et ne peuvent être substitués par la pulvérisation foliaire si la déficience est grave. Le sulfate de zinc ($ZnSO_4$) est largement utilisé en raison de sa grande solubilité. L'oxyde de zinc (ZnO) est également efficace si sa granulométrie est fine. Dans les sols acides, on recommande la pulvérisation foliaire utilisant des formes de zinc à faible assimilation car $ZnSO_4$ est rapidement lessivé (**El Alaoui, 2007**).

d. L'excès de zinc et sa correction

Les concentrations considérées comme toxiques sont estimées entre 100 et 500 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ MS (**Kabata-Pendias, 2011**). Cette toxicité se traduit par une réduction de la croissance des racines et des feuilles, suivie d'une chlorose des jeunes feuilles pouvant être induite par une carence en fer ou magnésium. Le principal mécanisme de tolérance au zinc consiste en l'immobilisation du métal dans les vacuoles (**Marschner, 2012**).

La production de NADPH dans les chloroplastes des végétaux sont diminuée avec l'augmentation de concentration du zinc. En outre, la production de radicaux libres sera augmentée dans les plantes. L'activité de l'enzyme RUBP carboxylase et Photosystème II diminue par la toxicité de zinc. La toxicité du Zinc réduit la synthèse de l'ATP et l'activité chloroplastes et la photosynthèse va diminuer en conséquence. En outre, de grandes quantités de zinc réduit l'absorption de P et Fe. (**Prasad et al, 1999; Vitosh et al, 1994; Teige et al, 1990; Ruano et al, 1988**).

Selon **Loué (1993)** l'apport de chaux est susceptible de freiner l'absorption excessive. La toxicité du zinc dans la tomate peut être améliorée par pulvérisation foliaire d'engrais contenant le P et Fe (**Kaya et Higgs, 2002**).

Conclusion

Les oligo-éléments sont nécessaires au développement des organismes vivants, ce caractère essentiel étant lié à leur rôle de cofacteurs et de biocatalyseurs dans un grand nombre de molécules biologiques. Ainsi, Cu et Zn sont fréquemment trouvés dans certaines protéines et enzymes.

L'accumulation d'ETM dans l'environnement amène ainsi à la perturbation du fonctionnement des écosystèmes naturels mais aussi des agrosystèmes. Des teneurs élevées en métaux dans les sols agricoles réduisent les rendements des cultures, ce qui est problématique face à la demande alimentaire croissante de la population mondiale. Par ailleurs, les métaux d'origine anthropique tendent à s'accumuler dans les horizons de surface et sont relativement mobiles, ils peuvent facilement être absorbés par les végétaux (**Redon, 2009**).

PARTIE
BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre II :
La tomate
(*Lycopersicon*
***esculentum*. Mill)**

II.1 Origine et historique

La tomate du genre *lycopersicon* est une plante cultivée dans le monde entier pour son fruit. Elle est originaire des régions andines côtière 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). Elle fut domestiquée au Mexique, puis introduite en Europe au XVIème siècle par les Espagnols avant même la pomme de terre et le tabac (Naika, 2005). Le genre *Lycopersicon* comprend neuf espèces, dont une seule ; *Lycopersicon esculentum* sous sa forme sauvage ceraciforme qui pourrait être directement à l'origine des autres variétés, a émigré vers le Sud de l'Amérique du Nord (Chaux et Foury, 1994).

En Algérie, ce sont les cultivateurs du Sud de l'Espagne (Tomateros), qui l'ont introduite en raison des conditions climatiques qui sont propices pour sa culture. Quant à sa consommation, elle a commencée dans la région d'Oran en 1905 puis, elle s'étendit vers le centre, notamment au littoral algérois (Latigui, 1984).

II.2. Classification de la tomate

II.2.1. Classification botanique

Les botanistes modifièrent à plusieurs reprises les noms de genre et d'espèce attribués à la tomate. Elle a été classée par Linné en 1753, comme *Solanum lycopersicon*, d'autre botanistes lui ont attribué différents noms : *Solanum lycopersicon*, *Solanum esculentum*, *Lycopersicon lycopersicum* ; c'est finalement *Lycopersicon esculentum* attribué par PHILIPPE MILLE en 1754, qui a été retenu (Munroe et Small, 1997).

Le nom de genre « *Lycopersicon* » est gréco-latin, il signifie « pêche de loup » et la partie « *esculentum* » complétant le nom de l'espèce vient du latin et qui signifie « comestible ». Cette comestibilité ne concerne ni le feuillage, ni les jeunes fruits verts car ils contiennent des alcaloïdes toxiques (tomatine, solanine). Ces derniers disparaissent des fruits au cours du mûrissement (Blancard et al, 2009).

D'après Cronquist (1981) et Gausson et al (1982) la classification de la tomate est comme suit :

Règne.....	Plantae.
Sous règne.....	Trachenobionta.
Division.....	Magnoliophyta.
Classe.....	Magnoliopsida
Sous classe.....	Asteridae.
Ordre.....	Soloniales.
Famille.....	Solanaceae.
Genre.....	<i>Solanum</i> ou <i>Lycopersicon</i>
Espèce.....	<i>Solanum lycopersicum</i> L

II.2.2. Caractéristiques génétiques

La tomate cultivée, *Lycopersicon esculentum* Mill est une espèce diploïde avec $2n=24$ chromosomes, chez laquelle il existe de très nombreux mutants monogéniques, dont certains sont très importants pour la sélection. Sa carte chromosomique compte actuellement 235 gènes localisés avec précision (**Gallais et Bannerot, 1992**).

La structure de la fleur de *L.esculentum* assure une cleistogamie (autogamie stricte), mais elle peut se comporter comme une plante allogame. On peut avoir jusqu'à 47% de fécondation croisée dans la nature (**Publishers, 2004**). Ces deux types de fécondation divisent la tomate en deux variétés qui sont :

2.2.1. Variétés fixées

Il existe plus de cinq cents variétés fixées (conservernt les qualités parentales). Leurs fruits sont plus ou moins réguliers, sont sensibles aux maladies, mais donnent en général des fruits d'excellente qualité gustative (**Polese, 2007**).

2.2.2. Variétés hybrides

Les variétés hybrides sont plus nombreuses. Elles sont relativement récentes, puisqu'elles n'existent que depuis 1960 (**Polese, 2007**).

II.3. Caractéristiques morphologiques de la tomate

II.3.1. L'appareil végétatif

3.1.1. 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**).

3.1.2. La tige

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**).

3.1.3 .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**).

II.3.2. L'appareil reproducteur

3.2.1. 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 (PNTTA, 1999).

3.2.2. Le fruit

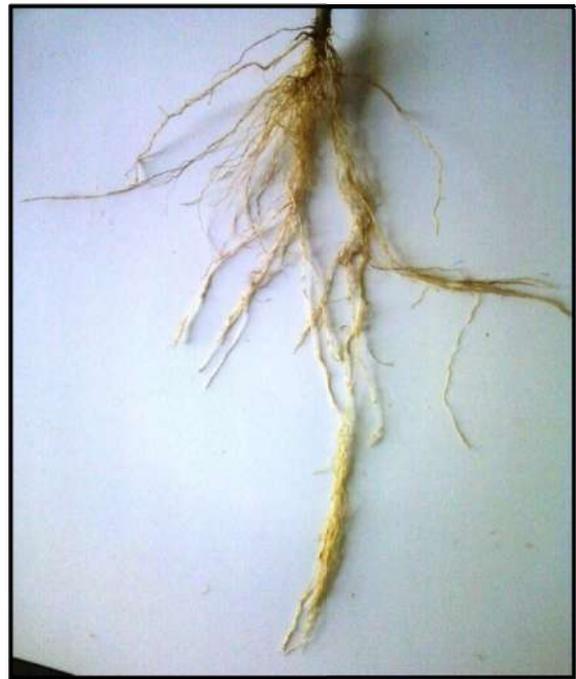
Est un une baie charnue à un ovaire élargi et contient plusieurs loges (fruits locaux) qui renferment des graines (ovules fécondés) enveloppées dans un placenta gélatineux. La maturité du fruit peut continuer même après la cueillette, c'est un fruit climactérique. (PNTTA, 1999). En général les fruits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

3.2.3. Graine

Selon Chaux 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).



-A-



-B-

Figure 3 : Caractéristiques morphologiques de la tomate (Originaire, 2014)

A : la partie aérienne.

B : La partie racinaire.

II.4. Exigences de la tomate

II.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).

II.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-nœuds. 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 (P.N.T.T.A, 1999).

II.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.

II.4.4. Sol

a. 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).

b. 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.

c. 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**).

II.4.5. Besoins hydriques

Les besoins en eau de la tomate se situent entre 6000 et 7000 m³/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**).

II.5. Le cycle biologique de la tomate**II .5.1. Germination**

La germination est le stade de levée qui mène la graine jusqu'à la jeune plante capable de croître normalement (**Corbineau et Core, 2006**).

La germination chez la tomate est épigée. A ce moment une température ambiante d'environ 20°C et une humidité relative de 70 à 80% sont nécessaires (**Chaux et Foury, 1994**).

II .5.2. Croissance

Selon **Laumonier (1979)**, la croissance de plant de tomate se déroule en 2 phases et en 2 milieux différents.

En pépinière : De la levée jusqu'au stade 6 feuilles, on remarque l'apparition des racines non fonctionnelles et des pré feuilles.

En plein champ : Après l'apparition des feuilles à photosynthèse intense et des racines

fonctionnelles, les plantes continuent leur croissance. La tige s'épaissit et augmente son nombre de feuille.

II .5.3. Floraison

La floraison est le développement des ébauches florales par transformation du méristème apical de l'état végétatif, à l'état reproducteur.

A un certain moment de la croissance de la plante qui dure environ 1mois, la tomate entre en parallèle avec la mise à fleur. Ces fleurs étaient auparavant des boutons floraux. La floraison dépend de la photopériode, de la température et des besoins en éléments nutritifs de la plante, car celle-ci ne peut fleurir que si elle reçoit la lumière pendant une durée qui lui est propre, en plus d'un apport équilibré sous serre (**Laumonier, 1979**).

II.5.4. Phase de fructification et maturation

La nouaison est l'ensemble de gamétogenèse, pollinisation, croissance du tube pollinique, la fécondation des ovules et le développement des fruits « fructification ». La température de nouaison est de 13°C à 15°C.

La maturation du fruit se caractérise par grossissement du fruit, changement de couleur, du vert ou rouge. La lumière intense permet la synthèse active de matière organique qui est transporté rapidement vers les fruits en croissance, pour cela il faut une température de 18°C la nuit et 27°C le jour (**Rey et Costes, 1965**).

II.6. Importance économique

La tomate est le fruit le plus populaire et le plus apprécié dans le monde après celle de la pomme de terre, étant donné sa diversité d'emploi, frais ou sous forme de différentes conserves et de préparation culinaire (concentré, jus, sucre, poudre etc.) (**Anonyme, 2003**).

Selon les statistiques de l'organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), la production mondiale de tomate s'élevait en 2007 à 126,2 millions de tonnes pour une superficie de 4,62 millions d'hectare, soit un rendement moyen de 27,3 tonnes à l'hectare (**FAO-STAT, 2009**).

De par son importance, la tomate (maraîchère et industrielle) constitue la 3^{ème} activité agricole en Algérie, après les céréales et la pomme de terre. D'après les statistiques du Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural, la production nationale de tomate s'élevait en 2011 à 771600 tonnes pour une superficie de 20 789 ha d'hectare, soit un rendement moyen de 30,84 tonnes à l'hectare.

La région de Biskra occupe la deuxième classe à l'échelle nationale après la région de Tipaza, avec une production annuelle de 150779,3 tonnes pour une superficie de 1361,8 ha, soit un rendement moyen de 110,7 tonnes à l'hectare (**MADR, 2011**).

II.7. La valeur nutritionnelle

La tomate est riche en nutriments et calories. Elle est une bonne source de Fe et vitamines A, B, et C (Tableau 1). La consommation de 230 g de tomate peut fournir environ 60% du besoin journalier de vitamine C aux adultes et 85% aux enfants (**USDA, 1963**). Également, la consommation de 100 ml de jus de tomate peut fournir 20% du besoin journalier de vitamine A. La consommation de tomate et ses produits peuvent significativement réduire le risque de développement du cancer du colon, rectal, et d'estomac. Des études récentes proposent que les tomates contiennent l'antioxydant le lycopène, la forme la plus commune de caroténoïde, qui inmanquablement réduire le risque de cancer de prostate (**Kucuk, O. 2001**).

Tableau 3: Valeur nutritionnelle moyenne pour 100g de tomate crue (**Favier *et al*, 2003**).

Eau		93.8g
Minéraux	Fer	0.4mg
	Calcium	9mg
	Magnésium	11mg
	Phosphore	24 mg
	Potassium	226mg
	Sodium	5mg
Vitamines	Provitamine A	0.6mg
	Vitamine B1	0.06mg
	Vitamine B2	0.05mg
	Vitamine B6	0.08mg
	Vitamine C	18mg
	Vitamine PP	0.6mg
Éléments énergétiques	Protides	0.8g
	Glucides	3.5g
	Lipides	0.3g
Fibres		1.2g

II.8 Maladies de la tomate

Malgré l'utilisation des variétés résistant aux maladies vasculaires, la tomate sous serre demande sujette aux attaques d'autres maladies et ravageurs occasionnant par fois des dégâts très importants.

II .8.1. Les maladies cryptogamiques

a. L'alternariose (*Alternaria solani*)

Cette moisissure se trouve partout, des taches rondes noirâtres sur feuille, chancreuses sur tige et nécrosent sur fruit (Naika et al, 2005).

b. Le mildiou (*Phytophthora infestans*)

Cette moisissure se trouve dans toutes les régions du monde, de légères taches foncées avec un point jaune en leur centre sont visibles sur les feuilles (Naika et al, 2005).

c. La fusariose (*Fusarium oxysporum*)

Les feuilles flétrissent, jaunissent et s'enroulent à leurs bords en commençant par la base de la plante et continuant vers le haut (Naika et al, 2005).

d. Le mal blanc ou oïdium (*Leveillula taurica*)

Cette moisissure apparaît par des taches jaunes sur les feuilles et de la poudre provenant des spores sur le côté inférieur de ces taches. Cette maladie se propage rapidement dans des conditions arides (Naika et al, 2005).

e. Pourriture grise (*Botrytis cinerea*)

Il apparaît sur les feuilles, taches nécrotiques couleur gris-beige, zonées. Ainsi sur la tige, des chancres gris-beiges, secs (Verolet et al, 2001).

✚ Les principales mesures de lutte sont les suivantes :

- ✓ Utiliser des variétés tolérantes.
- ✓ Ramasser et brûler les parties de plantes endommagées.
- ✓ Désherber régulièrement et à fond.
- ✓ Eviter une carence en eau.
- ✓ Diminuer l'acidité du sol en appliquant du calcium (Naika et al, 2005).

II.8.2. Les maladies bactériennes

a. Le chancre bactérien (*Clavibacter michiganense*)

Les bactéries peuvent survivre sur des résidus de plantes, les symptômes apparaissent ; flétrissement unilatéral sur feuilles, des coupes longitudinales sur tige et pétioles montrent des stries brunâtres (Verolet et al, 2001).

b. Le flétrissement bactérien (*Ralstonia solanacearum*)

Les premiers symptômes sont le flétrissement des feuilles terminales, suivi après 2 à 3 jours d'un flétrissement soudain et permanent sans jaunissement (Naika *et al*, 2005).

✚ La lutte contre maladies bactériennes :

- ✓ Utiliser des variétés tolérantes/résistantes.
- ✓ Ne pas blesser les racines ni les feuilles, faire attention pendant le repiquage et tailler le moins possible.
- ✓ Ne pas semer sur un sol contaminé.
- ✓ Ramasser et brûler tous les résidus de culture (Verolet *et al*, 2001).

II .8.3. Les maladies virales**a. Virus des feuilles jaunes en cuillère de la tomate (TYCL V)**

Il est transmis par la mouche blanche *Bemisia tabaci*. Les symptômes sont le rabougrissement, le jaunissement et l'enroulement des feuilles vers le haut ou vers le bas. Les fruits sont de petite taille et déformés (Verolet *et al*, 2001).

b. Mosaïque du concombre (CMV) (*Cucumber Mosaic Virus*):

Le CMV, virus transmis par pucerons, est présent dans le monde entier. Il peut être à l'origine de trois principaux types de symptômes: des marbrures, mosaïque sur les jeunes folioles, déformation des folioles qui prennent l'aspect d'une feuille de fougère ou celui d'un l'ace de chaussure car très filiformes, altération nécrotiques commençant sur les folioles, s'étendant à la tige et à l'apex de la plante (Blancard *et al*, 2009).

c. Le virus de la maladie bronzée de la tomate (TSWV)

Il se manifeste par des plages foncées doré-brun puis taches nécrotiques plus ou moins diffuses. Jaunissement et dessèchement des feuilles, puis la plante. Il y aura des plages décolorées et déformations sur fruits. (Verolet *et al*, 2001).

✚ Les principales mesures de lutte sont les suivantes :

- ✓ L'utilisation de variétés tolérantes.
- ✓ La protection des semis en pépinière avec un filet.
- ✓ Arracher les plantes malades pendant les premières semaines après la levée.
- ✓ Utiliser un paillage pour réduire l'infestation de la Mouche blanche.
- ✓ Il est important d'éliminer les thrips et les plantes-hôtes afin de prévenir la maladie.
- ✓ L'utilisation des prédateurs et déprédateurs (Verolet *et al*, 2001).

**PARTIE
EXPERIMENTALE**

**Chapitre III :
Matériel et méthodes**

III Matériels et méthodes :

III.1 Préparation du substrat de culture:

-Les pots utilisés ont 23 cm de diamètre, 27 cm de la hauteur, un volume de 9 L et 10 kg du poids. Le substrat de culture se compose d'un mélange (en volume) de 50 % du sable avec 25 % du sol et 25 % de la fumure organique (fumier ovin), tout tamisés préalablement par un tamis à maille de 2 mm (Tableau 4). Les composants du substrat sont bien mélangés afin de les homogénéiser.

Tableau 4: Poids des constituants de substrat de culture.

Composants	Sable	Sol	Fumure organique
Poids (Kg)	6,67	2,29	1,04

Le sol utilisé est celui du terrain d'expérimentation du département d'agronomie à l'université de Biskra. Les paramètres physico-chimiques du sol ont été analysés (Tableau5).

Tableau 5 : Analyses physico-chimiques du sol.

Type d'analyse		Résultat	Méthode
Granulométrie (%)	Argile	22,22	La méthode internationale Pipette de Robinson ➤ Une texture limoneuse (USDA texture)
	Limon fin	27,53	
	Limon grossier	21,17	
	Sable fin	27,14	
	Sable grossier	1,94	
Calcaire total (%)		34,33 (sol fortement calcaire selon Baize, 1988)	La méthode de calcimètre Bernard
pH eau		7,64 (sol basique selon Baize, 1988)	Dans un rapport 1/2,5 sol/eau
CE (ds/m)		2,24 (sol salé selon Aubert, 1978)	Dans un rapport 1/5 sol/eau
CEC (meq/100g)		36,82 (CEC très élevés selon Anonyme, 2000)	La méthode de Pauer et Toudjan
MO (%)		0,71 (très pauvres d'après I.T.A, 1977)	La méthode de Walkly et Black
Phosphore assimilable (ppm)		58	La méthode Joret Hébert

La suite : Tableau 5			
Cations solubles (meq/l)	Ca⁺⁺	14,67	Complexométrie avec l'EDTA
	Mg⁺⁺	12,8	
	K⁺	1,41	Spectrophotométrie à flamme
	Na⁺	9,21	
Anions solubles (meq/l)	Cl⁻	10,19	Argentométrie (titration)
	SO₄⁻	20,35	Colorimétrie
	HCO₃⁻	1,75	Par titration
	CO₃⁻	0	
Les métaux lourds (µg/g)	Cu⁺⁺	1,44	(Clément et François, 2003)
	Zn⁺⁺	2,47	

Alors, il s'agit d'un sol limoneux, salé, fortement calcaire, à pH basique, possède une capacité d'échange très élevée et très pauvre en matière organique. Ce sol présente la dominance des cations solubles Ca⁺⁺ et Mg⁺⁺, et des anions solubles Cl⁻ et SO₄⁻. Cependant, les teneurs du sol en Cu⁺⁺ et en Zn⁺⁺ sont au dessous des seuils de phytotoxicité 120 ppm pour le cuivre et 100 ppm pour le zinc (Coppenet et al, 1993), 167 ppm pour le cuivre (Cheverry, 1994) et 130 ppm pour le zinc (Baize, 1997).

L'eau d'irrigation utilisée est l'eau de robinet dont les analyses chimiques sont présentées dans le tableau ci dessous.

Tableau 6: Analyses chimiques de l'eau de robinet.

Type d'analyse	Elément dosé	Résultat
pH		7,54 (alcaline selon Boulaine, 1974)
CE (mS/cm)		4,05 (à très forte salinité selon USSL, 1954)
ATS (g/l)		2,59 (très salée selon l'I.T.A, 1977)
Cations (méq/l)	Ca⁺⁺	18,4
	Mg⁺⁺	15,2
	Na⁺	33,4
	K⁺	0,15
Anions (méq/l)	HCO₃⁻	3,75
	Cl⁻	19
	SO₄⁻	29,6
	CO₃⁻	0
Métaux lourds (µg/ml)	Cu⁺⁺	0,11
	Zn⁺⁺	0,07

Ainsi, l'eau utilisée est très salée, à pH alcaline, contient les cations Na⁺, Ca⁺⁺ et Mg⁺⁺ plus dominants que le K⁺, les anions SO₄⁻ et Cl⁻ sont les plus dominants. Les teneurs du Cu et du Zn sont inférieures au seuil de phytotoxicité selon Anonyme (2002) 2 mg/l pour les deux métaux, et d'après Peterson (1999) 0,2 ppm pour le cuivre.

III.2 Matériel végétal

La variété de la tomate choisie appelée « Sahra hybride F1 », elle est très utilisée par les agriculteurs de la région de Biskra, caractérisée par: une très bonne vigueur, très précoce, productive et résiste bien à la chaleur.

III.3 Conduite de l'essai

Le travail expérimental est réalisé dans une serre en plastique au département d'agronomie à l'université de Biskra. Les conditions climatiques de la région pendant l'essai sont présentées dans le tableau 7.

Tableau 7 : Evolution des conditions climatiques de la région de Biskra pendant l'essai.

	Novembre 2013	Décembre 2013	Janvier 2014	Février 2014	Mars 2014
Température (°C)	17.3	12.2	12.7	14.9	16.3
Hygrosco pie (%)	44.1	58.9	57.7	47.8	46.4
Précipitations (mm)	0	14.99	8.13	4.06	16.01
Vents(Km/h)	0	0.1	0	0.3	16

III.3.1 Semis

Les graines sont semées dans des plateaux alvéolés dans la tourbe à raison 1 plant/alvéole pendant une période de 20 jours pour assurer une bonne germination. Le repiquage des plantules de tomate dans les pots a eu lieu le 25 novembre 2013 à raison de 2 plants par pot, après 15 jours (la reprise de croissance) on a laissé une seule plante par pot après l'élimination des plantes non homogènes.



Figure 4: Conduite de l'essai : A. La serre en plastique à l'université de Biskra.

B. Le repiquage des plantules à raison de 2 plants par pot

III.3.2 L'arrosage :

L'irrigation est effectuée à l'eau de robinet, la capacité de rétention en eau est déterminée par la différence entre la quantité d'eau apportée avant l'arrosage et celle drainée après 24h. Les pots ont été irrigués à 40 % de la capacité de rétention soit environ 1000 ml par pot.

III.3.3 Fertilisation minérale

La fumure de fond minérale a été apportée avec les doses de 10qx/ha de l'engrais minéral composé NPK 15-15-15 soit 3,33 g/pot. Ensuite une dose de 180 unités/ha d'azote sous forme d'urée 46 % soit 1,29 g/pot, et 300 unités de potassium sous forme de sulfate de potasse 50 % soit 2,01 g/pot ont été apportées en couverture fractionnée en 3 fois en fertigation.

III.3.4 Protocole expérimental

Deux essais séparés sont adoptés, l'un pour le Cu et l'autre pour le Zn. Les substrats reçoivent neuf traitements en utilisant le sulfate de cuivre (CuSO_4) et le sulfate de zinc ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), elles sont apportées dissouts dans l'eau d'irrigation. Les doses sont : 0, 50, 100, 200, 300, 400, 500, 1000 et 2000 ppm (mg/kg du sol), chacune comporte 3 répétitions (Tableau 8). Les substrats témoins sont irrigués uniquement à l'eau de robinet pendant presque toute la période de l'essai. Après 20 jours de repiquage des plantes, l'application du cuivre et de zinc a été effectuée fractionnée en 4 fois avec les irrigations, l'essai a été étalé sur 14 semaines à partir du début des traitements, avant le prélèvement des plantes pour les analyser.

Tableau 8: Quantité totale de sulfate de cuivre et sulfate de zinc en grammes qui doit être apporté à chaque pot.

Dose (ppm)	0	50	100	200	300	400	500	1000	2000
CuSO_4 (g)	0	1,13	2,26	4,52	6,79	9,05	11,32	22,64	45,28
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (g)	0	1,97	3,95	7,89	11,84	15,79	19,73	39,47	78,95

Le dispositif expérimental adopté est en Blocs aléatoires complets et comporte neuf (9) traitements avec 03 répétitions (Figure 5).

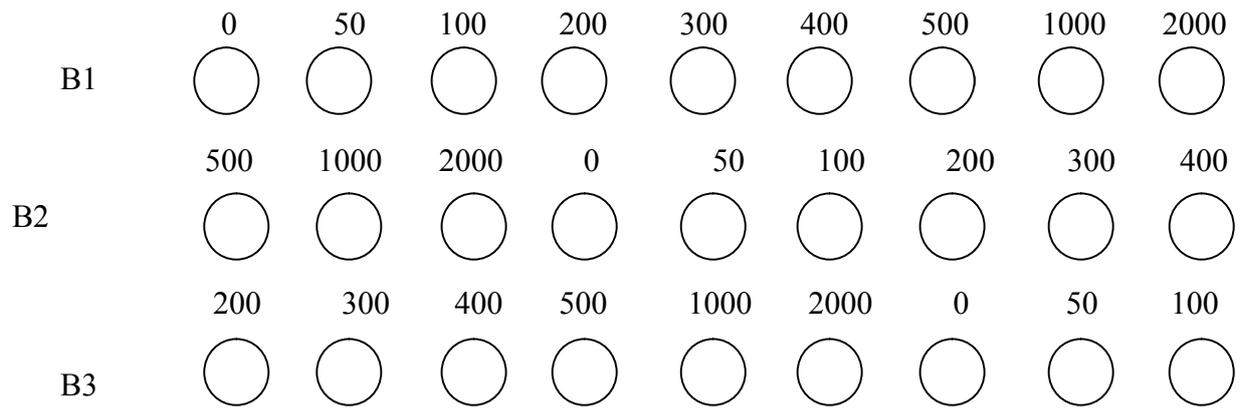


Figure 5: Schéma de dispositif expérimental adopté.



Figure 6: Dispositif expérimental adopté dans la serre pour le cuivre et pour le zinc séparément

III.4 Paramètres mesurés

III.4.1 Paramètres morphologiques

4.1.1 La hauteur des plantes : déterminée chaque semaine à partir du début de l'application de cuivre et de zinc.

4.1.2 Longueur des racines : après la récolte des plantes, on a mesuré la taille des racines les plus abondants dans chaque plantes.

III.4.2 Paramètres biométriques

4.2.1 La biomasse fraîche aérienne et racinaire : elle est mesurée immédiatement après la récolte des plantes.

4.2.2 La biomasse sèche aérienne et racinaire : mesurée après dessèchement à l'étuve à 105° pendant 24 h (poids constant)

III.4.3 Paramètres de la production

4.3.1 Nombre totales des fruits : on procède à la récolte des fruits à la fin de l'essai et les dénombrer pour chaque plante.

4.3.2 Le poids total des fruits : les fruits sont pesés (le poids total par plante) au laboratoire à l'aide d'une balance de précision.

III.4.4. Paramètres chimiques

4.4.1. Extraction des éléments minéraux de la plante

◆ Mode opératoire

- Porter 1g de matière végétale (feuilles et tiges, racines), séchée préalablement à 105°C dans un creuset en porcelaine, calciner à 550 °C dans un four à moufle pendant 5 h jusqu'à l'obtention d'une cendre blanche, Sortir l'échantillon et laisser refroidir,
- Transférer la cendre dans un bécher de 100 ml et ajouter 5 ml HCl (2N), couvrir d'un verre de montre.
- Digérer à l'ébullition douce sur une plaque chauffante pendant 10 mn,
- Après refroidissement, ajouter 25 ml d'eau distillée, puis filtrer dans une fiole de 50 ml et avec un papier filtre. Ajuster au volume. Cet extrait sert au dosage des éléments essentiels (P, K) et des métaux lourds (Cu, Zn) (**Pauwels et al, 1992**).
- Faire un témoin dans les mêmes conditions.

Finalement, on utilise le spectrophotomètre à UV pour le dosage de P, le photomètre à flamme pour le K, et le spectrophotomètre d'absorption atomique pour le Cu et Zn.

4.4.2. Dosage du potassium par le photomètre à flamme

Après la réalisation de courbe d'étalonnage, on procède au dosage du potassium qui sera réalisé sur filtrat, par la lecture d'un photomètre à flamme.

Pour préparer une solution mère de potassium de 1000 ppm, il faut mettre 1.9066 g du chlorure de potassium (KCl) desséché dans une fiole jaugée d'un litre de capacité et compléter le volume avec de l'eau déminéralisée jusqu'au trait de jauge.

Le calcul des concentrations réelles se fait par l'équation déduite de la gamme d'étalonnage et par des conversions prenant en considération toutes les dilutions faites et le poids initial des échantillons.

4.4.3. Dosage du phosphore par le spectrophotomètre à UV :

Le phosphore est présent dans l'extrait sous forme d'orthophosphate. Avec les ions de vanadate et molybdate, il forme un complexe phospho-vanado-molybdate de couleur jaune mesurable par colorimètre (spectrophotomètre) à 430 nm. Cette méthode est appropriée pour les analyses foliaire ou les teneurs sont de l'ordre de pour mille (**Pauwels et al, 1992**).

Pour préparer une solution mère de phosphore de 500 ppm, il faut mettre 2.1965 g du dihydrogenophosphate de potassium (KH_2PO_4) desséché dans une fiole jaugée d'un litre de capacité et compléter le volume avec de l'eau déminéralisée jusqu'au trait de jauge.

Le réactif nitro-vanado-molybdate est préparé comme suite :

- Dissoudre 5 g de heptamolybdate d'ammonium [$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$] dans une fiole de 100 ml contenant 50 ml l'eau déminéralisée chaude (50°C), laisser refroidir puis ajuster au volume et agiter (réactif **a**).
- Dissoudre 0.25 g de metavanadate d'ammonium (NH_4VO_3) dans une fiole de 100 ml contenant 50 ml l'eau bouillante (50°C), laissé refroidir puis ajouter 20 ml d'acide nitrique HNO_3 concentré, compléter le volume par l'eau déminéralisée et agiter (réactif **b**).
- Ajouter les deux réactifs (**a**) et (**b**) dans une fiole de 1 litre, à 100 ml de HNO_3 dilué 1/3, agiter et laisser refroidir.

Porter successivement dans un tube à essai : 2 ml de l'extrait, 2 ml de réactif nitro-vanado-molybdate et 6 ml d'eau déminéralisée, homogénéiser et laisser réagir pendant 1 heure. Faire la même opération avec les étalons.

On procède finalement au dosage du phosphore à la longueur d'onde 430 nm à l'aide du spectrophotomètre à UV, après la réalisation de courbe d'étalonnage de phosphore. Le calcul des concentrations réelles se fait par l'équation déduite de la gamme d'étalonnage et par des conversions prenant en considération toutes les dilutions faites et le poids initial des échantillons.



Figure 7: Spectrophotomètre à UV (colorimètre)



Figure 8: photomètre à flamme.

4.4.4. Dosage du Cu et du Zn par le spectrophotomètre d'absorption atomique :

Solution mère de cuivre et de zinc (concentration 2000 ppm)

Dans une fiole jaugée de 100 ml contenant environ 25 ml d'eau déminéralisée, dissoudre 0.6285 g d'acétate de cuivre ($\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et 0.6715 g d'acétate de zinc ($\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Ajuster au volume, homogénéiser. Conserver dans un flacon brun à l'abri de la lumière, au réfrigérateur.

Solution fille de l'élément

Dans une fiole jaugée de 1000 ml contenant environ 500 ml d'eau déminéralisée, verser 50 ml de la solution mère de cuivre et de zinc. Ajuster au volume. Homogénéiser. On obtient ainsi une solution fille à 0,1 g/l de cuivre et de zinc. Cette solution reste stable pendant trois mois. Conserver à l'abri de la lumière, au réfrigérateur.

Après la réalisation des courbes d'étalonnage pour chaque élément, on procède au dosage du cuivre et du zinc, par une lecture au moyen du spectrophotomètre d'absorption atomique. Le calcul des concentrations réelles se fait par l'équation déduite de la gamme d'étalonnage et par des conversions prenant en considération toutes les dilutions faites et le poids initial des échantillons.

III-5. Analyses statistiques :

Les résultats obtenus sont soumis à une analyse de variance à un seul facteur en blocs aléatoires complets à l'aide de logiciel **STATBOX 6.50**, les moyennes sont comparées selon le Test de **Newman et Keuls** ainsi une matrice de corrélation est établie. On considère que les résultats sont significatifs quand $P \leq 0,05$. La construction des graphes a été effectuée par **l'Excel**. L'organigramme de l'expérimentation est présenté dans la figure 9.

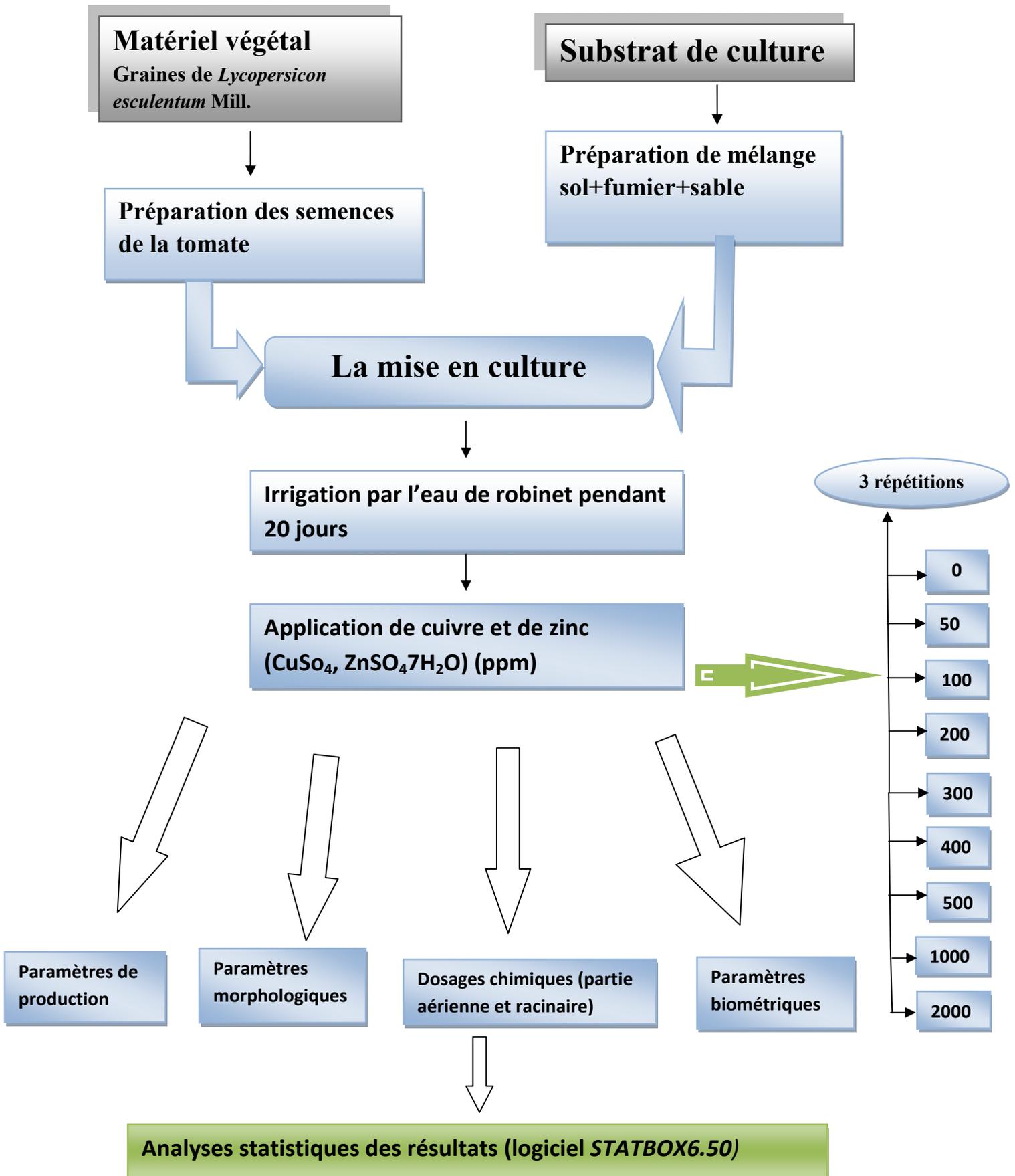


Figure 9: Le protocole de travail expérimental

**PARTIE
EXPERIMENTALE**

**Chapitre IV :
Résultats et
discussion**

IV. Résultats et discussion

Au terme de cette étude on a obtenu les résultats suivants, en premier on note la mort des plantes qui ont subi l'application du cuivre à des doses de 1000 et 2000 mg/kg et du zinc à des doses de 400 et 500, 1000 et de 2000 mg/kg à cause de la phytotoxicité (Photo 1).



Photo 1: Effet des métaux lourds sur la tomate.

- a. La mort des plantes à 2000 ppm du cuivre.
- b. La chlorose induite puis la mort à 400 ppm du zinc.

IV.1. L'effet de cuivre

1.1 Paramètres morphologiques

1.1.1 Evolution de la hauteur des plantes :

L'étude des résultats obtenus (Annexe 2) montre que la hauteur des plantes n'est pas influencée par la présence de cuivre ($P > 0,05$) durant la première période (de la 1^{ère} à la 8^{ème} semaine). Par ailleurs, l'étude des résultats de la 9^{ème} semaine montre que la hauteur des plantes est influencée par la présence de cuivre ($P < 0,05$), ensuite elle est hautement affectée ($P < 0,01$) par l'application de cuivre à partir de la 10^{ème} jusqu'à la dernière semaine (Annexe 02, Tableau 9).

Tableau 9: Evolution de la hauteur des plantes en cm de *Lycopersicon esculentum* Mill. en fonction de dose de cuivre et dans le temps (semaines). Les résultats sont présentés en Moyennes \pm écart-type, selon le test de Newman-Keuls (P= 5%).

Semaines	Dose de cuivre (ppm)						
	0	50	100	200	300	400	500
S1	15,833 $\pm 1,123$	15,667 $\pm 0,149$	15,333 $\pm 0,635$	16,167 $\pm 0,918$	15,333 $\pm 0,689$	14,833 $\pm 0,892$	14,667 $\pm 1,174$
S2	17,5 $\pm 1,861$	17,333 $\pm 0,218$	16,833 $\pm 0,715$	17,833 $\pm 1,585$	17,667 $\pm 1,041$	16,5 $\pm 1,323$	16,833 $\pm 1,341$
S3	20,333 $\pm 1,944$	20,5 $\pm 0,515$	19,667 $\pm 0,527$	20,167 $\pm 1,014$	19,167 $\pm 0,861$	19 $\pm 1,674$	19,667 $\pm 1,386$
S4	22,333 $\pm 2,33$	22,667 $\pm 1,719$	22,167 $\pm 0,795$	23 $\pm 1,793$	22,667 $\pm 1,485$	21,5 $\pm 2,284$	22,333 $\pm 2,45$
S5	23,5 $\pm 2,985$	24,5 $\pm 2,475$	24 $\pm 0,812$	25,167 $\pm 1,187$	25,333 $\pm 1,754$	23,833 $\pm 2,123$	24,5 $\pm 2,588$
S6	27 $\pm 2,479$	27,5 $\pm 2,771$	28 $\pm 1,593$	27,833 $\pm 0,502$	26,833 $\pm 0,846$	27 $\pm 3,196$	27 $\pm 3,018$
S7	30,5 $\pm 2,044$	31,5 $\pm 3,62$	31,833 $\pm 2,682$	32,333 $\pm 0,546$	28,167 $\pm 0,218$	29,667 $\pm 3,647$	28 $\pm 2,952$
S8	32,167 $\pm 1,623$	34,833 $\pm 2,808$	33,833 $\pm 2,963$	35,667 $\pm 0,648$	30 $\pm 1,202$	32,167 $\pm 2,404$	29,833 $\pm 2,951$
S9	33,167 $\pm 1,418$ B	36,833 $\pm 2,322$ AB	36,333 $\pm 4,222$ AB	41 $\pm 1,075$ A	31,833 $\pm 2,368$ B	33,667 $\pm 3,037$ B	31,5 $\pm 2,805$ B
S10	33,5 $\pm 0,991$ B	37,667 $\pm 2,943$ AB	38,667 $\pm 4,549$ AB	43,667 $\pm 1,026$ A	33 $\pm 3,215$ B	35,167 $\pm 2,722$ B	32,167 $\pm 2,98$ 5 B
S11	34,333 $\pm 0,599$ B	39,667 $\pm 2,605$ AB	39,833 $\pm 3,924$ AB	44,167 $\pm 1,363$ A	35 $\pm 3,716$ B	37 $\pm 2,218$ AB	33,5 $\pm 3,086$ B
S12	35,5 $\pm 0,352$ BC	40,667 $\pm 2,114$ ABC	42,833 $\pm 4,307$ AB	45,167 $\pm 1,391$ A	37,333 $\pm 3,472$ ABC	38,833 $\pm 2,973$ ABC	34,333 $\pm 3,22$ 6 C
S13	36,333 $\pm 0,322$ B	41,167 $\pm 2,2$ AB	44,833 $\pm 4,33$ A	45,667 $\pm 0,878$ A	38,833 $\pm 3,575$ AB	40,667 $\pm 2,342$ AB	34,667 $\pm 3,02$ 1 B
S14	37,5 $\pm 0,419$ B	42,667 $\pm 2,352$ AB	45,833 $\pm 4,55$ A	46,5 $\pm 0,904$ A	40,167 $\pm 3,458$ AB	41,833 $\pm 2,696$ AB	35,333 $\pm 3,16$ B

On peut distinguer d'après la figure 10 périodes :

La première période s'étend de la 1^{ère} vers la 8^{ème} semaine, on remarque une croissance similaire entre les différents doses cuivrique par rapport au traitement témoin, sauf la 7^{ème} et la 8^{ème} où on rencontre une faible supériorité de la hauteur des plantes chez les doses 50, 100 et 200 ppm, par contre les traitements 300 et 500 ppm engendrent une baisse de la hauteur des plantes comparativement au plantes non traité (Tableau 9). Dans la 8^{ème} semaine, les plantes qui sont soumis à une dose de 200 ppm de cuivre présentent les hauteurs les plus élevés avec 35,667 cm marquant un accroissement par 10,88 %, tandis que les hauteurs les plus bas sont de l'ordre de 29,833 cm provoquées par la dose 500 ppm soit une réduction de 7,26% en comparaison avec le témoin à 0 ppm (Tableau 10).

La deuxième période débute dans la 9^{ème} semaine et se prolonge jusqu'à la dernière, et se caractérise par une croissance rapide des plantes dans les différents traitements notamment à 100 et 200 ppm de cuivre en comparaison avec les plantes non traitées (0 ppm), excepté du traitement 500 ppm qui montre les hauteurs des plantes les plus bas.

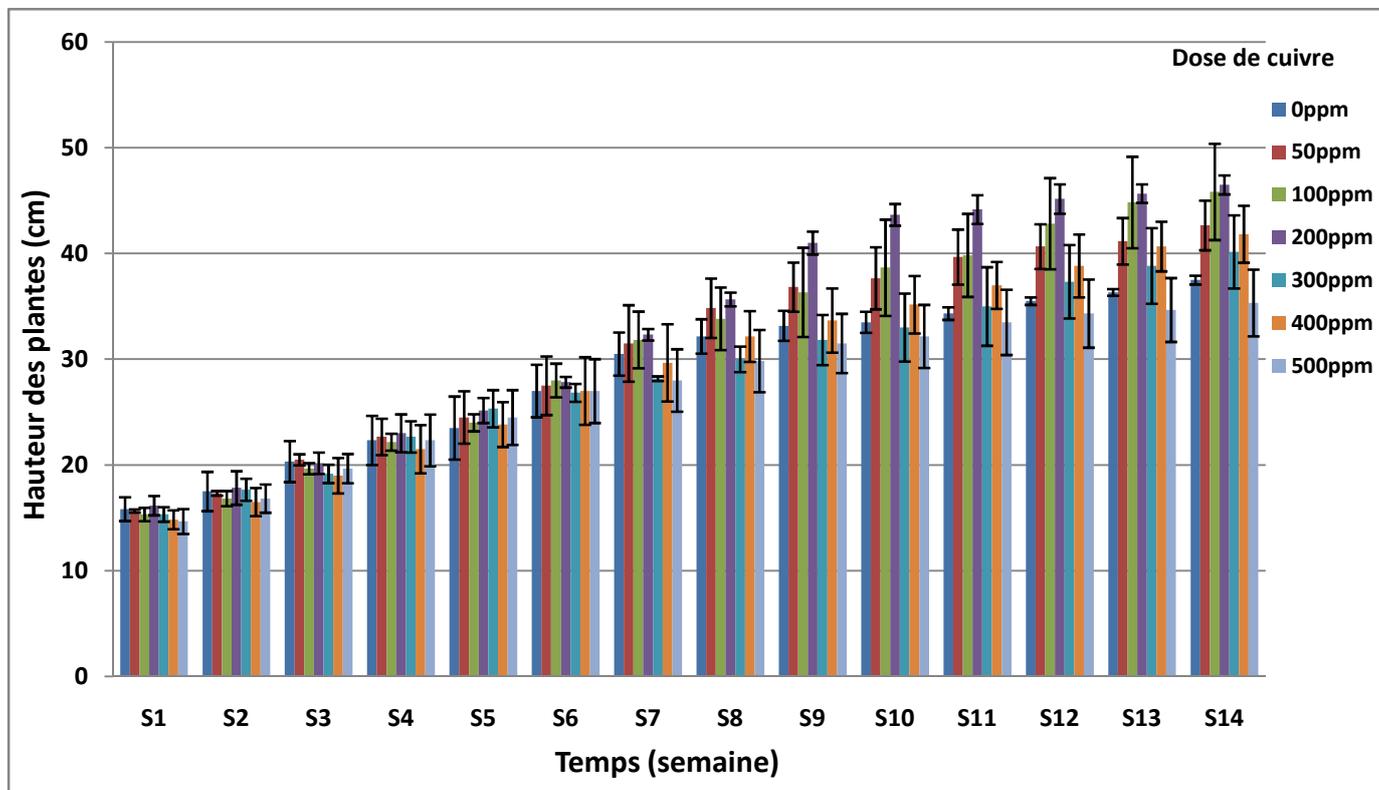


Figure 10: Effet du cuivre sur la hauteur des plantes de *Lycopersicon esculentum* Mill. en fonction du temps (semaines).

En général, les doses 100 et 200 ppm ont contribué à un meilleur développement en hauteur réalisant des gains de 22,22 et 24 % respectivement puisque les plantes atteignent 45,833 et 46,5 cm d'hauteur, en revanche les plantes recevant une concentration de 500 ppm apparaissent les plus basses avec 35,333 cm d'hauteur soit une réduction de 5,78 % (Tableau 10).

Tableau 10: Taux d'évolution (%) de la hauteur des plantes en fonction de l'application de cuivre dans la 8^{ème} et la 14^{ème} semaine.

Dose de cuivre (ppm)	0	50	100	200	300	400	500
Evolution % (S8)	-	8,29	5,18	10,88	6,74	0	-7,26
Evolution % (S14)	-	13,78	22,22	24,00	7,11	11,55	-5,78

1.1.2 La longueur des racines :

L'analyse statistique révèle un effet très hautement significatif ($P=0,00014$) de l'augmentation de l'apport de cuivre sur l'élaboration de la longueur des racines de la tomate (Annexe 2), ainsi le test de Newman et Keuls-Seuil = 5% exprime deux groupes homogènes: le groupe **A** renferme à partir du témoin (0) jusqu'à la dose 200 ppm, le groupe **B** englobe les traitements 300, 400, 500 ppm (Tableau 11).

Tableau 11 : Longueur moyenne des racines des plantes de *Lycopersicon esculentum*. en fonction de la dose de cuivre appliquée. Les résultats sont présentés en Moyennes \pm écart-type, selon le test de Newman-Keuls ($P= 5\%$).

Dose de cuivre (ppm)	Longueur des racines (cm)	Evolution %
200	12,833 \pm 0,723 A	8,76
50	12,033 \pm 1,097 A	1,98
0	11,8 \pm 0,924 A	-
100	11,333 \pm 0,058 A	-3,95
400	7,833 \pm 0,451 B	-33,62
300	7,6 \pm 1,882 B	-35,59
500	7,533 \pm 1,115 B	-36,16

D'après la figure 11, on distingue une faible augmentation de longueur racinaire chez les plantes amendé par les doses 50 et 200 ppm, cette dernière présente la croissance radiculaire la plus élevée avec 12,833 cm manifestant une progression par 8,76% (Tableau 11) en comparaison avec les racines plantes témoins (0), puis une diminution intense chez les plantes qui ont reçue des doses 300, 400 et enfin 500 ppm qui exprime la longueur la plus courte soit 7,533 cm avec une baisse par 36,16%.

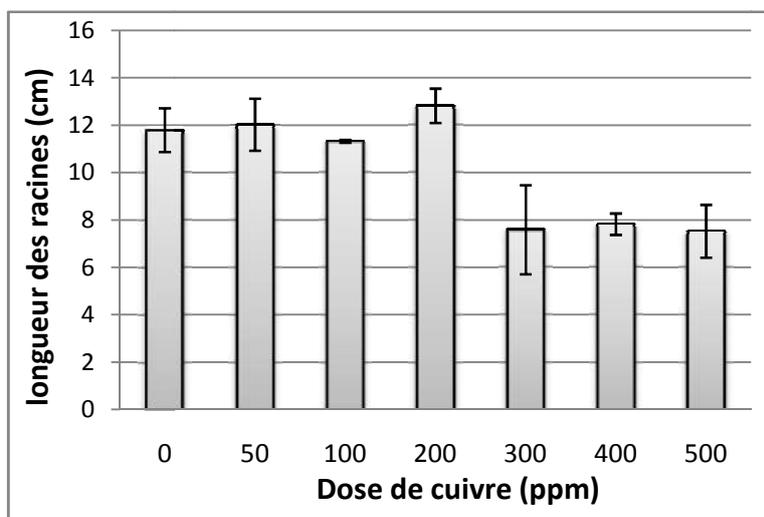


Figure 11: Effet du cuivre sur la longueur des racines de *Lycopersicon esculentum* Mill.

Discussion

Notre essai suggère que l'augmentation de la concentration en cuivre dans le substrat est accompagnée négativement de façon significative avec l'élongation racinaire de la tomate, c'est-à-dire ils sont corrélés par un coefficient négatif et significatif ($r = -0,77$).

Concernant la croissance des plantes en hauteur, la présence du cuivre n'a pas créé une différence dans les 8 premières semaines, ce qu'il peut être due au froid qui a bloqué l'assimilation du cuivre par les plantes (janvier et février), ensuite l'effet du cuivre est devenue significatif après la 9^{ème} semaine à cause de l'augmentation de température. Le cuivre est corrélé légèrement avec la hauteur des plantes par un coefficient négatif ($r = -0,30$).

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

D'après **Pahlsson (1989)**, le cuivre généralement atteint le développement racinaire par l'inhibition de la croissance des racines latérales et de l'initiation de la croissance des racines des jeunes plantes. Ainsi **Ouzounidou (1994)** a montré que les concentrations supérieures du Cu (80 et 160 μM) en solution de culture, mais pas les inférieures, conduisent à une réduction significative de la croissance des racines.

La toxicité du cuivre a endommagé les racines des plantes, avec des symptômes allant de destruction de la cuticule des racines et réduire la prolifération des poils absorbantes, jusqu'à la déformation sévère de structure de la racine dans une culture en solution. (**Sheldon et Menzies, 2005.**). Chez les plantes non-tolérantes, l'inhibition de l'élongation racinaire et le dommage des membranes cellulaires des racines sont les réponses immédiates vis-à-vis des niveaux élevés du cuivre (**Wainwright et Woolhouse, 1977**). **Lidon et Henriques (1992)** ont reporté que la toxicité du Cu, est exprimée par la taille réduite des racines, apparaît comme le résultat direct de l'accumulation du Cu en excès dans les tissus.

L'application du cuivre au sol diminue la hauteur de la plante et a causé des réductions de 39% et 50%, en comparaison avec le témoin (**Sonmez et al, 2006**). D'après **Kaplan (2010)**, la hauteur des plantes de tomate a été affectée significativement par l'application de Cu au sol qui a causé un décroissement à des doses : 250, 500, 1000 et 2000 ppm.

1.2 Paramètres biométriques

1.2.1 La biomasse fraîche des plantes :

L'analyse statistique montre que l'effet de l'application du cuivre est très hautement significatif ($P < 0,005$) sur le poids frais de la partie aérienne par rapport au témoin, et aussi que l'effet du cuivre est hautement significatif ($P < 0,005$) sur la biomasse fraîche des racines par rapport aux plantes dans des substrats sans application (annexe 2).

Les résultats rapportés sur la figure 12 montrent qu'il existe une augmentation du poids frais de la partie aérienne et des racines avec l'augmentation de la dose de cuivre appliquée jusqu'à la dose 200 ppm qui a donné des gains maximaux (35,97 et 14,50 % respectivement) par rapport au témoin, puis il y aura une diminution jusqu'à des taux de 14,48 et 44,12 % chez les plantes traitées par 500 ppm (Tableau 12). En revanche, il faut noter que la dose 100 ppm de cuivre provoque une baisse de l'ordre 13,95 % sur la production de la matière fraîche racinaire des plantes.

Tableau 12: Poids frais de la partie aérienne et des racines chez *Lycopersicon esculentum* Mill. en fonction de la dose de cuivre appliquée. Les résultats sont présentés en Moyennes \pm écart-type, selon le test de Newman-Keuls ($P = 5\%$)

Dose de cuivre (ppm)	biomasse fraîche aérienne (g)	Evolution %	Dose de cuivre (ppm)	biomasse fraîche racinaire (g)	Evolution %
200	56,519 \pm 7,008 A	35,97	200	9,086 \pm 1,407 A	14,50
100	47,886 \pm 1,374 B	15,20	50	8,408 \pm 1,174 A	5,96
400	44,558 \pm 1,897 BC	7,19	0	7,935 \pm 1,251 A	-
50	44,188 \pm 2,038 BC	6,30	100	6,828 \pm 0,171 AB	-13,95
300	43,907 \pm 3,378 BC	5,63	300	4,611 \pm 0,419 B	-41,89
0	41,568 \pm 3,201 BC	-	400	4,589 \pm 1,671 B	-42,17
500	35,549 \pm 6,058 C	-14,48	500	4,434 \pm 1,58 B	-44,12

Le poids frais de la partie aérienne le plus élevé est enregistré dans les plantes traitées à la dose de 200 ppm de cuivre soit 56,519 g, cependant les plantes qui subissent la dose de 500 ppm de cuivre ont produit le poids frais le plus faible avec une valeur de 35,549 g. Egalement, le poids frais des racines le plus élevé est marqué dans les plantes traitées à la dose de 200 ppm de cuivre soit 9,086 g, cependant les plantes traitées par la dose de 500 ppm de cuivre enregistrent le poids frais le plus faible (4,434 g). (Tableau 12)

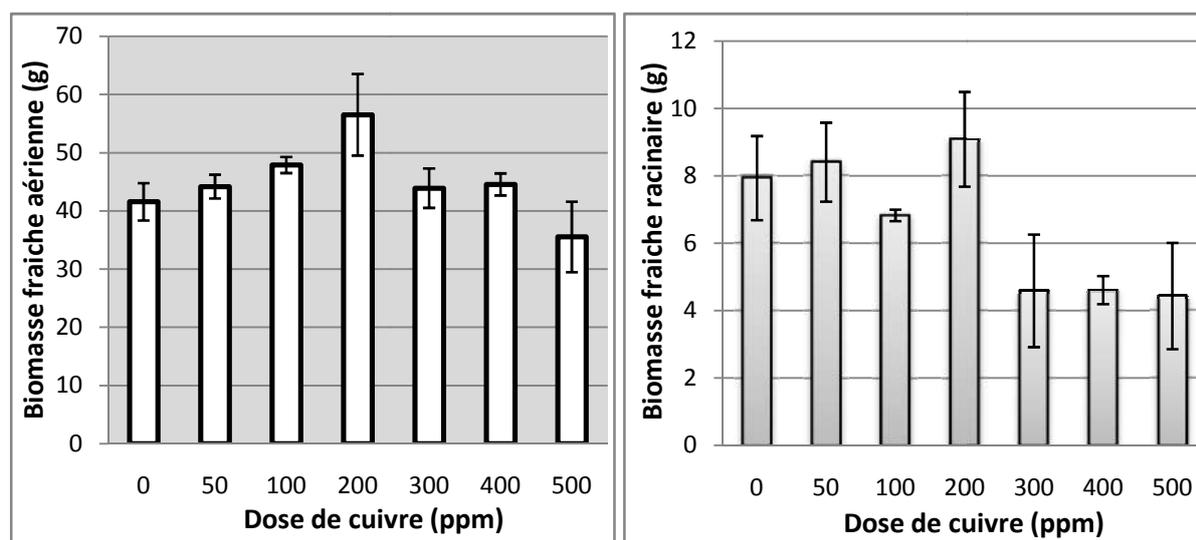


Figure 12: Effet du cuivre sur la biomasse fraîche aérienne et racinaire de *Lycopersicon esculentum*. Mill

1.2.2 La biomasse sèche des plantes :

L'analyse statistique à $P=5\%$ montre que le cuivre n'exerce aucun effet ($P>0,05$) sur le poids sec de la partie aérienne comparativement au témoin (0 ppm) (annexe 2). Néanmoins, l'étude des résultats obtenues indique que la biomasse sèche des racines est très hautement influencée ($P<0,005$) par les doses 400 et 500 ppm de cuivre apportées par rapport aux plantes non amendées (Tableau 13, annexe 2).

Tableau 13 : Poids sec de la partie aérienne et des racines chez *Lycopersicon esculentum* Mill en fonction de la dose de cuivre appliquée. Les résultats sont présentés en Moyennes \pm écart-type, selon le test de Newman-Keuls ($P= 5\%$).

Dose de cuivre (ppm)	biomasse sèche aérienne (g)	Evolution %	Dose de cuivre (ppm)	biomasse sèche racinaire (g)	Evolution %
200	9,027 \pm 1,434	17,97	50	1,058 \pm 0,07 A	2,72
50	7,998 \pm 0,647	4,52	200	1,038 \pm 0,119 A	0,78
100	7,825 \pm 0,231	2,26	0	1,03 \pm 0,079 A	-
0	7,652 \pm 0,437	-	100	0,989 \pm 0,127 A	-3,98
300	7,196 \pm 1,081	-5,96	300	0,727 \pm 0,196 AB	-29,42
400	7,087 \pm 0,677	-7,38	400	0,659 \pm 0,081 B	-36,02
500	6,01 \pm 1,6	-21,46	500	0,614 \pm 0,148 B	-40,39

L'examen de la figure 13 montre que la production de la matière sèche aérienne de la plante augmente suivant l'intensité cuprique jusqu'à un taux de 17,97 % chez les plantes soumises au traitement 200 ppm qui ont enregistré le poids sec aérienne le plus élevé soit 9,027 g par rapport au témoin, ensuite une régression remarquable jusqu'à un taux de 21,46 % provoquée par la dose 500 ppm qui représente le poids sec le plus faible (6,01 g) (Tableau 13)

Cependant, comparativement au témoin à 0 ppm, une faible augmentation de poids sec des racines est remarquée dans les traitements 50 et 200 ppm, soient 1,058 et 1,038 g respectivement, ensuite une baisse progressive jusqu'à la dose 500 ppm qui représente le poids sec le plus faible avec 0,614 g soit une diminution de 40,39 % (Tableau 13).

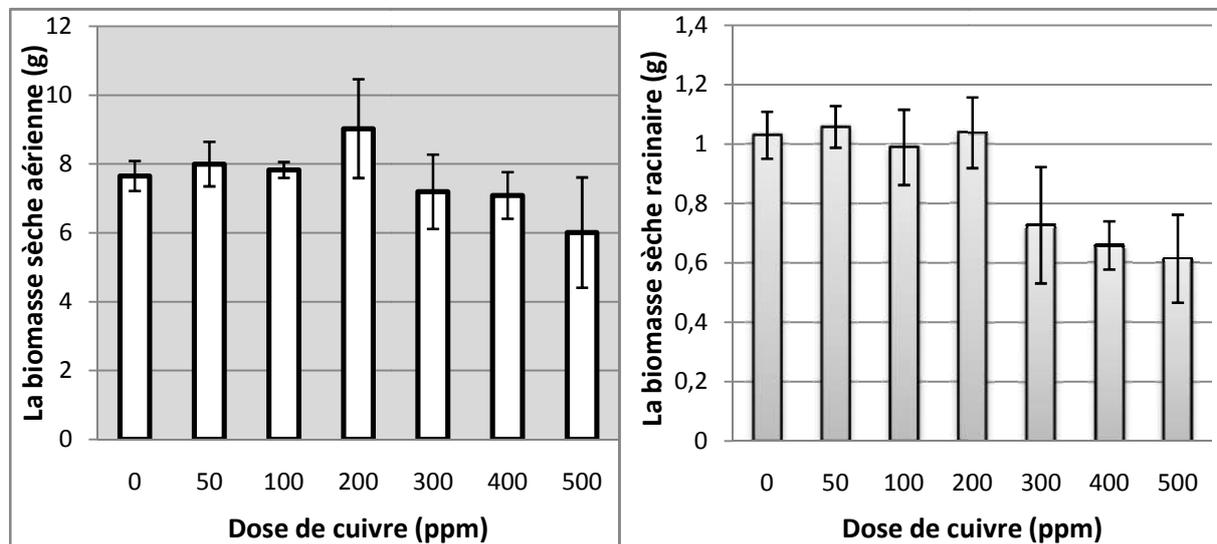


Figure 13: Effet du cuivre sur la biomasse sèche aérienne et racinaire de *Lycopersicon esculentum* Mill.

Discussion:

Les résultats obtenus procurent que l'effet de l'application du cuivre est très hautement significatif sur le poids frais de la partie aérienne et racinaire, ce dernier marque un coefficient de corrélation négatif et significatif ($r = -0,68$). La présence du cuivre n'exerce qu'une faible influence sur le poids sec de la partie aérienne, toutefois le poids sec des racines est très hautement influencé par l'apport du cuivre et sont corrélés significativement ($r = -0,79$).

Le poids sec est un paramètre indicateur de la production de la biomasse, toute faiblesse est signe d'un dysfonctionnement physiologique, il semble plus influencé par l'ampleur du stress en présence.

Le cuivre, un micro élément essentiel, joue un rôle vital dans le maintien de métabolisme normal des plantes supérieures. Cependant, le cuivre à des niveaux élevés devient fortement phytotoxique pour les cellules et cause l'inhibition de la croissance des plantes ou encore la mort (Mocquot et al., 1996; Weckx et Clijsters, 1996; Chen et al., 2000).

Des réponses similaires des plantes ont été observées en autre études. Vijayarengan et Deepthy (2014) ont conclu qu'un niveau de 50 mg/kg de cuivre dans le sol est bénéfique à la croissance de moutard, maïs, cotonnier et de la pastèque. Un niveau de cuivre

dans le sol plus de 100 mg/kg réputé toxique (**Vijayarengan et Deepthy, 2014**). **Ippolito et al (2011)** ont déclaré que le Cu conduit à une augmentation de la biomasse à des doses 50 et 100 ppm chez la luzerne (*Medicago sativa*).

Un apport élevé en Cu usuellement inhibe la croissance des racines avant d'affecter la production de la biomasse aérienne (**Lexmond et Vorm, 1981**). Cependant, ce ne signifie pas nécessairement que les racines sont plus sensible à des concentrations élevées du cuivre, mais probablement, due à la réalité que les racines sont dans un environnement où le cuivre est en excès.

Ceux-ci confirme aussi et rejoint les travaux de **Sonmez et al (2006)** qui ont montré que l'application du cuivre dans le sol conduit à la diminution de matière sèche des racines de la tomate. Les résultats de l'augmentation de l'application du Cu dans le sol sont ultérieurement reportés par **Sonmez, 2007**, et il indique que le poids sec des racines a été beaucoup plus faible que le poids sec des tiges et des feuilles, ce qui est en accord avec nos résultats. Également, la réduction du développement racinaire chez la vigne a été observée après l'addition de 400 mg/kg de cuivre ou plus aux deux types de sols (**Toselli et al, 2009**). La réduction de la croissance de la partie aérienne de la plante, nombre des feuilles et la chlorose des extrémités des feuilles sont détectés.

D'après **Kaplan, 2010**, la hauteur des plantes et la biomasse sèche des feuilles, tige et racines des plantes de tomate ont été affectés significativement par l'application de Cu au sol qui a causé un décroissement. Le poids sec de tige et des feuilles est diminué due à la réalité que le poids sec des racines est diminué avec les traitements de cuivre au sol.

1.3 Paramètres chimiques

1.3.1 L'accumulation du cuivre dans les plantes:

L'analyse de la variance procure qu'il existe une influence significatif de l'application de cuivre ($p < 0.05$) sur son accumulation dans les parties aériennes de la plante, cependant le contenu des racines en cuivre n'est pas affecté significativement ($p < 0.05$) par la présence de cuivre dans le substrat. (Annexe 2)

Tableau 14: Concentrations de cuivre dans les parties aériennes et des racines de *Lycopersicon esculentum* Mill en fonction de la dose de cuivre appliquée. Les résultats sont présentés en Moyennes \pm écart-type, selon le test de Newman-Keuls ($P = 5\%$).

Dose de cuivre (ppm)	Accumulation du cuivre dans la partie aérienne (ppm)	Dose de cuivre (ppm)	Accumulation du cuivre dans les racines (ppm)
500	282,665 \pm 43,905 A	300	1655,761 \pm 339,689
100	277,477 \pm 68,349 A	400	1632,146 \pm 119,531
200	263,947 \pm 55,221 AB	500	1534,882 \pm 332,509
300	218,775 \pm 39,114 AB	200	1463,332 \pm 490,399
400	216,193 \pm 50,575 AB	100	1378,444 \pm 159,52
50	206,027 \pm 35,662 AB	50	1152,614 \pm 315,301
0	133,913 \pm 23,154 B	0	863,685 \pm 107,492

L'analyse de la figure 14 indique évidemment que les niveaux de cuivre dans les tissus aériennes sont nettement inférieurs que dans les racines, en outre l'accumulation du cuivre dans chacun de ces parties de la plante augmente progressivement avec la grandeur de cuivre. Pour les feuilles, les échantillons témoins enregistrent des teneurs en cuivre de 133,913 ppm, qui passe à 282,665 ppm pour des concentrations cuivrée de 500 ppm, et pour la teneur de cuivre dans les racines on a 863,685 ppm aux substrats non traités (0 ppm), la valeur la plus élevée est 1655,761 ppm rencontrée chez le traitement 300 ppm. Il faut noter qu'il y a une diminution de teneur en cuivre dans les parties aériennes des plantes traitées par 300 et 400 ppm qui sont par ordre 218,775 et 216,193 ppm par rapport aux doses 100 et 200 ppm contenant des teneurs de 277,477 et 263,947 ppm respectivement. (Tableau 14).

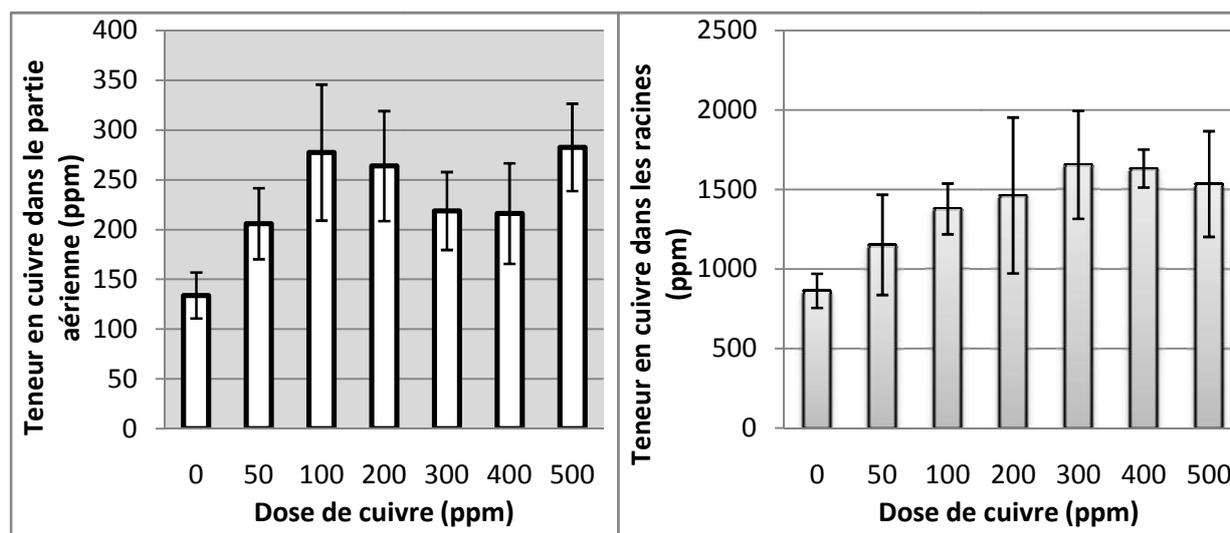


Figure 14: Effet du cuivre sur son accumulation dans la partie aérienne et racinaire de *Lycopersicon esculentum* Mill.

1.3.2 Teneur en phosphore et en potassium dans les plantes:

A travers le traitement statistique il est constaté qu'il existe une influence très hautement significatif de cuivre sur les teneurs des plantes en potassium et en phosphore soient $P=0,00024$ et $0,0009$ respectivement (annexe 2).

Tableau 15: Teneur en potassium et en phosphore dans la partie aérienne de *Lycopersicon esculentum* Mill en fonction de la dose de cuivre appliquée. Les résultats sont présentés en Moyennes \pm écart-type, selon le test de Newman-Keuls ($P= 5\%$).

Dose de cuivre (ppm)	Teneur en potassium (%)	Evolution %	Dose de cuivre (ppm)	Teneur en phosphore (%)	Evolution %
0	$3,197 \pm 0,05$ A	-	50	$0,222 \pm 0,026$ A	11,94
200	$2,592 \pm 0,351$ B	-18,92	200	$0,203 \pm 0,015$ A	10,45
100	$2,478 \pm 0,367$ B	-22,49	0	$0,201 \pm 0,011$ A	-
50	$2,173 \pm 0,129$ BC	-32,03	100	$0,177 \pm 0,02$ AB	0,99-
500	$2,112 \pm 0,068$ BC	-33,94	300	$0,149 \pm 0,017$ B	-25,87
400	$2,075 \pm 0,274$ BC	-35,09	400	$0,145 \pm 0,018$ B	-27,86
300	$1,577 \pm 0,185$ C	-50,67	500	$0,144 \pm 0,005$ B	-28,36

Les résultats moyens (figure 15) montrent que le contenu des plantes en potassium et en phosphore est inversement proportionnel aux concentrations de cuivre supplémenté aux substrats. L'impact du cuivre est plus sévère sur les taux de potassium que ceux de phosphore.

La teneur en potassium dans la partie aérienne passe de 3,197 % de MS chez le témoin à 2,112% de MS à la dose cuprique de 500 ppm soit une chute par 33,94%, mais le traitement

des plantes à 300 ppm a convoqué la teneur la plus faible soit 1,577 % de MS avec une diminution de 50,67 % en comparaison au témoin (Tableau 15).

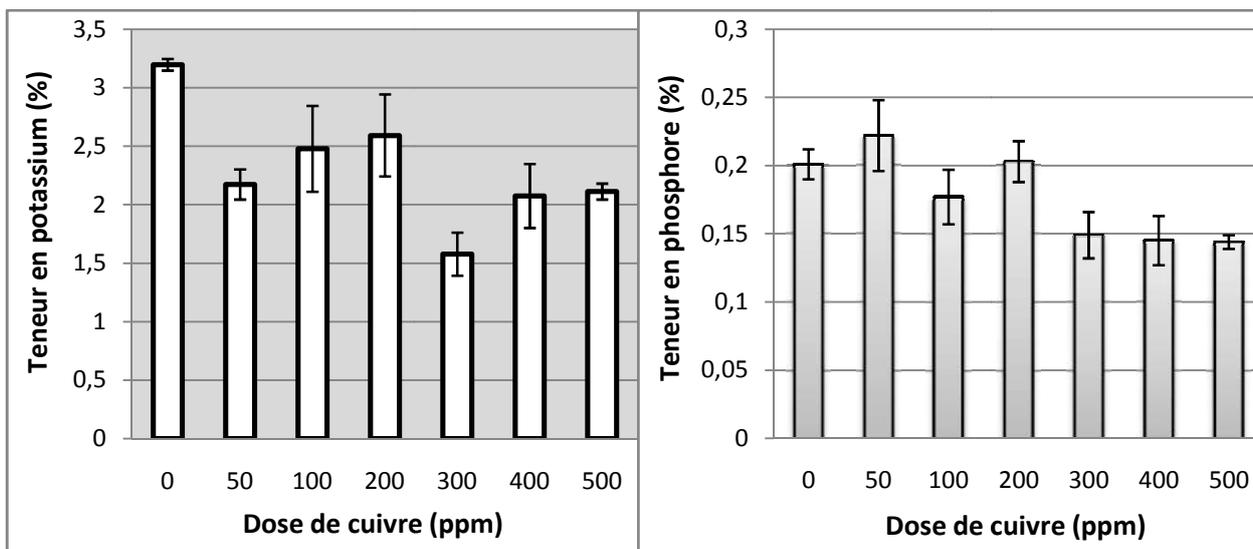


Figure 15: Effet du cuivre sur la concentration de potassium et de phosphore dans la partie aérienne de *Lycopersicon esculentum* Mill.

Presque de la même manière, la teneur en phosphore varie du témoin (0 ppm) avec 0,201 % de MS jusqu'à la régression la plus importante (réduction de 28,36 %) rencontrée chez les plantes ayant subi la dose 500 ppm de cuivre soit 0,144 % de MS, à l'exception de la dose 50 ppm qui a enregistré la concentration la plus élevée à savoir 0,222 % de MS (augmentation de l'ordre de 10,45 %) comparativement au témoin (Tableau 15).

Discussion

La quantité d'ions minéraux est influencée par la concentration en cuivre à laquelle est soumise la plante et l'effet des concentrations cupriques sur les variations des teneurs en éléments étudiés est significatif. Nous avons vu en ce qui concerne la teneur des plantes en potassium et en phosphore, des coefficients de corrélation significatifs et négatifs (**-0,57 et -0,74** respectivement) et nous constatons aussi, que les plantes traitées accumulent des teneurs croissantes de ce métal avec l'augmentation de sa dose apportée, mais la partie aérienne est le seul qui accumule des teneurs en cuivre d'une manière significative.

L'un des mécanismes de tolérance au cuivre est de l'immobiliser dans les racines. (**Burkhead et al, 2009; Yruela, 2009**). La rétention du cuivre par les racines limite la translocation du cuivre vers les parties aériennes via le xylème (**Liao et al, 2000b**).

Avec l'addition élevée du Cu, la concentration du Cu dans les racines augmente proportionnellement avec la concentration du Cu dans le substrat, mais le transport vers les feuilles reste hautement limité. Les concentrations critiques de toxicité du Cu dans les feuilles peuvent cependant -mais non nécessairement- refléter la tolérance des plantes au Cu. C'est une considération importante quand les génotypes sont comparés. À un apport élevé, jusqu'à 60% du Cu total dans les racines peut être joigne à la paroi cellulaire et à l'interface cellulaire paroi-membrane plasmique (Iwasaki et al, 1990). Kaplan (2010) déclare que le contenu en Cu de feuille, tige et racine est significativement affecté par l'augmentation des niveaux d'application de Cu et causent un accroissement. Quarilli et al (1997) ont reporté que l'accumulation du Cu a augmenté la concentration du Cu dans les plantules de tomate âgées de 17 jours cultivées dans des solutions nutritives contenant 0.5 μM de Cu. Brun et al (2001) ont étudié la croissance des racines et des parties aériennes du maïs (*Zea mays* cv. Gaúcho) cultivé dans des sols vignobles contaminés par le Cu (jusqu'à 251 mg/kg du Cu total). Les concentrations du Cu des racines (23 à 584 mg/kg) étaient supérieures aux concentrations dans les parties aériennes (7 to 17 mg kg⁻¹).

Toselli et al, 2009 ont annoncé que la concentration de Cu est augmentée en réponse à l'augmentation du Cu dans le sol. Inversement à la teneur de la feuille en Cu et en N, le contenu en P en K est diminué par l'enrichissement du sol par le Cu. D'après Kaplan (2010), le contenu des feuilles, tiges et racines en K est significativement affectée par les applications de Cu ceux-ci provoquent une diminution. Bujtas et Cseh (1981) ont reporté que l'absorption du potassium est diminuée avec les concentrations de Cu dans une céréale. Le Cu externe a une influence négative sur les concentrations de Ca, Fe, et K et une influence positive sur la concentration de Cu dans les tissus des plantes (Ouzounidou, 1994.)

Kaplan (2010) signale que le contenu en P des feuilles, tiges et racines est significativement affecté par applications de Cu. Selon l'étude de Sonmez (2007), le traitement du sol par le Cu tends vers à la diminution du contenu en P de la feuille et de tige. L'augmentation du taux de l'application du Cu a diminué l'absorption du P, Mg, Ca, and K dans les racines et les feuilles de *Swingle Citrumelo* (Alva et al, 2008). L'application de Cu a engendré une diminution du contenu en P dans les échantillons de feuilles et de tiges. La masse sèche de la feuille et de tige est diminuée due en réalité que le poids sec des racines diminue avec les traitements du Cu au sol (Kaplan, 2010). Par conséquent, une diminution du contenu en P de la feuille et de tige par les traitements de Cu apparemment due à la

diminution de l'absorption du P par les racines. Ces résultats sont aussi supportés par un autre auteur : **Zheng et al (2004)**.

1.4 Paramètres de la production

1.4.1 Le nombre et le poids total des fruits

Le test de la comparaison des moyennes Newman-Keuls (P= 5%) révèle des différences significatives dans la production de fruits de la tomate exprimé par trois groupes homogènes : le groupe **A** renferme la dose 200 ppm, le groupe **AB** englobe le témoin (0), 100, 300 et 400 ppm, et enfin le groupe **B** regroupe les doses 50 et 500 ppm (Tableau 16, Annexe 2). Toutefois, l'étude des résultats obtenus démontre que le poids de fruits de chaque plant n'est pas significativement influencée par l'application métallique ($p>0,05$) malgré sa diminution par rapport au témoin.

Tableau 16: Nombre et le poids total de fruits de *Lycopersicon esculentum* Mill en fonction de la dose de cuivre appliquée. Les résultats sont présentés en Moyennes \pm écart-type, selon le test de Newman-Keuls (P= 5%).

Dose de cuivre (ppm)	Nombre de fruits/plant	Evolution %	Dose de cuivre (ppm)	Poids de fruits/plant (g)	Evolution %
200	5 \pm 0,861 A	50	300	39,77 \pm 13,304	9,22
400	4 \pm 0,861 AB	20	50	39,377 \pm 7,44	8,14
0	3,333 \pm 0,515 AB	-	100	38,86 \pm 4,899	6,72
100	3 \pm 0,165 AB	-10	200	36,537 \pm 6,935	0,34
300	3 \pm 0,165 AB	-10	0	36,413 \pm 10,746	-
50	2,667 \pm 0,675 B	-20	400	35,183 \pm 5,28	-3,38
500	2,333 \pm 1,245 B	-30	500	25,493 \pm 10,419	-29,99

Les résultats moyens (figure 16) indiquent généralement que le nombre de fruits par plant diminue lorsque la dose de cuivre augmente, malgré que les doses 200 et 400 ppm donnent des meilleures productions de fruits comparativement au traitement témoin qui sont par ordre 5 et 4 fruits/plant à savoir des élévations par 50 et 20 % respectivement (Tableau 16). Cependant, le traitement 500 ppm représente la valeur la plus faible avec 2,333 fruits/plant (diminution par 30 %).

En revanche, on observe que le poids de fruits par plant varie d'abord un peu positivement avec l'apport de cuivre et atteint son pic chez la dose 300 ppm qui a donné un rendement de 39,77g soit un taux d'augmentation de 9,22 %, pourtant le traitement des plantes à 500 ppm a engendré une régression par 29,99 % à savoir 25,493 g par rapport au témoin (0 ppm) (Tableau 16).

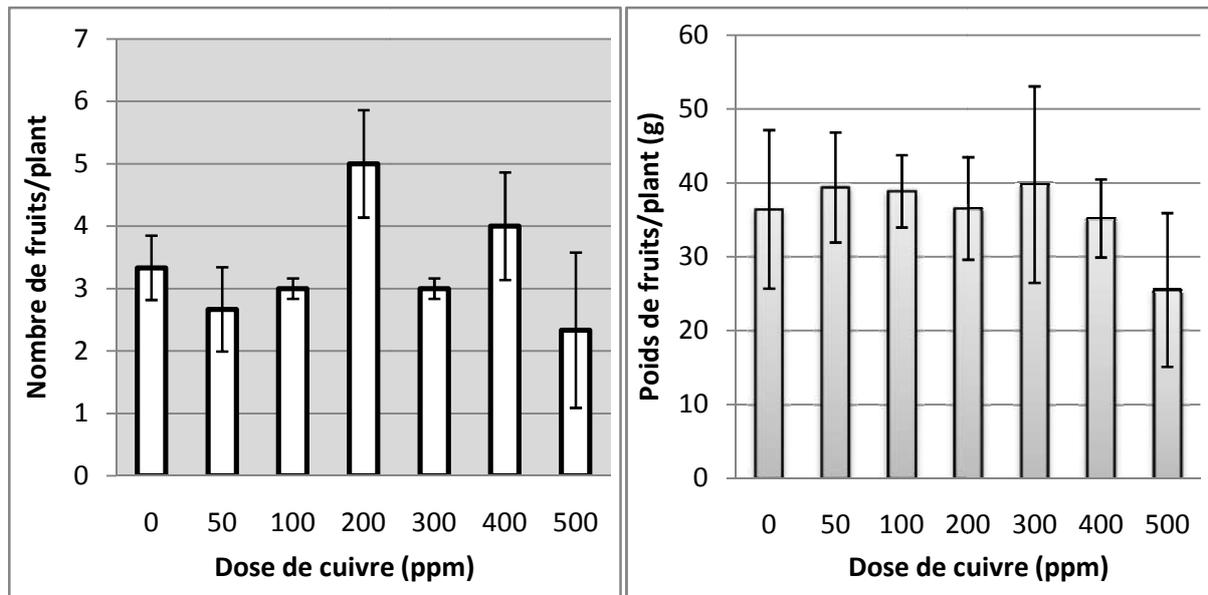


Figure 16: Effet du cuivre sur le nombre et le poids des fruits de *Lycopersicon esculentum* Mill.

Discussion

Cette étude nous démontre que l'application du cuivre agit significativement ($P < 0,05$) sur la production du nombre de fruits des plantes de tomate, cependant le poids de fruits n'est pas influencé suite à l'augmentation des doses du cuivre apportée.

Les informations sur les effets de l'application du cuivre sur la production des plantes sont rares.

Le succès de la production de tomate est normalement associé à une bonne santé végétative et une bonne croissance racinaire pendant la période de développement. L'application du Cu à des niveaux élevés dans le sol perturbe sérieusement la croissance normale des plantes. L'application du cuivre au sol diminue le rendement total, nombre de fruits, poids sec des racines et la hauteur des plantes (Sonmez et al, 2006). Egalement, Karataglis et Babalonas (1985) ont reporté que le nombre des fleurs et la production fruits diminue avec l'augmentation de la concentration de Cu.

Par contre, Kassaoui et al, 2009 annoncent que l'apport de doses croissantes de boue contenant des quantités élevées des métaux lourds augmente significativement le nombre et le poids des fruits.

-Corrélation entre le cuivre et les paramètres étudiés.

D'après la matrice de corrélation (Annexe 3), on remarque qu'il ya une relation significative entre la biomasse fraîche aérienne (par des coefficients de corrélations positifs r) et la biomasse fraîche des racines (**0,69**), le poids sec aérien (**0,85**), le poids sec des racines (**0,61**), la longueur des racines (**0,63**), le nombre de fruits (**0,64**) et la hauteur des plantes (**0,71**), c'est-à-dire l'augmentation de ces paramètres est liés avec l'augmentation de la biomasse fraîche aérienne.

Pour le poids frais racinaire, on constate qu'il est lié significativement (par des coefficients de corrélations positifs r) avec le poids sec aérien (**0,79**), le poids sec des racines (**0,91**), la longueur des racines (**0,94**), la teneur des plantes en potassium (**0,52**) et en phosphore (**0,74**), c'est-à-dire lorsque les paramètres cités augmentent le poids frais racinaire augmente, au contraire du teneur en cuivre dans les racines celle-là est corrélée négativement par un coefficient $r = -0,66$ et son augmentation diminue le poids frais des racines.

Concernant la biomasse sèche aérienne, on constate qu'elle est en relation positive et significative avec la biomasse sèche des racines ($r=0,76$), la longueur des racines ($r=0,71$), la teneur des plantes en phosphore ($r=0,43$), le nombre de fruits ($r=0,49$) et la hauteur des plantes ($r=0,49$), alors l'importance de la production de la biomasse sèche aérienne est accompagné avec la progression des paramètres précédentes. Cependant, l'accumulation du cuivre dans les racines est liée de façon inverse avec la production de la biomasse et corrélé significativement par un coefficient de $r = -0,45$ ou la biomasse sèche aérienne augmente avec la diminution de la teneur en cuivre dans les racines.

D'autre coté, le poids sec des racines s'interfère positivement par des coefficients de corrélations r avec la longueur des racines (**0,95**), la teneur en potassium (**0,56**) et en phosphore (**0,67**) et enfin la hauteur (**0,44**), donc lorsque ces dernières augmentent la biomasse racinaire progresse. En revanche, on constate qu'il ya une réaction négative du contenu des racines en cuivre avec leur poids sec avec un coefficient significatif ($r = -0,72$), plus le contenu des racines en cuivre progresse plus le poids sec racinaire est moins important.

L'élaboration de la longueur racinaire est conventionnée également au teneur en potassium, en phosphore et la hauteur des plantes avec des coefficients de corrélations positifs (r) : **0,58** ; **0,77** ; **0,49** respectivement, celles-ci s'élèvent en parallèle avec la

croissance des racines. Toutefois, cette dernière est inversement proportionnelle avec la concentration du cuivre dans les racines et corrélée par un coefficient significatif : $r = -0,65$.

Pour la teneur des plantes en potassium, on note une nette corrélation positif avec la teneur en phosphore par un coefficient de $r = 0,44$, ça veut dire que le potassium et le phosphore s'accumulent simultanément dans la plante, néanmoins le potassium s'oppose avec le cuivre des racines qui diminue quand la concentration du potassium augmente marquant un coefficient de corrélation de $r = -0,62$. Le phosphore est encore en contradiction à la présence du cuivre dans les racines et corrélé par un coefficient de corrélation négatif et significatif $r = -0,48$. En revanche, l'accumulation du cuivre dans les parties aériennes est en accord avec celle dans les racines à savoir un coefficient de corrélation significatif $r = 0,53$, c'est-à-dire le cuivre s'accumule au même temps dans chacun des parties de la plantes.

Enfin, le poids de fruits n'est pas lié significativement avec aucun des paramètres étudiés.

D'une manière générale, on observe que la majorité des paramètres étudiés sont reliés entre eux positivement avec des coefficients significatifs puisque ils évoluent ensemble, à l'exception de la teneur du cuivre dans les racines qui est en relations négatives avec la majorité des autres paramètres par des coefficients significatifs.

IV.2. L'effet de zinc

2.1 Paramètres morphologiques

2.1.1 L'évolution de la hauteur des plantes

L'étude des résultats obtenus (Annexe 2) montre que la hauteur des plantes n'est pas influencée par l'application du zinc ($P>0,05$) durant la première période (jusqu'à la 8^{ème} semaine). D'autre part, l'étude des résultats à partir de la 9^{ème}, 10^{ème}, 12^{ème} et 13^{ème} semaine montre que la hauteur des plantes est significativement influencée par la présence de zinc ($P<0,05$), celle-là devient fortement affectée ($P<0,01$) dans la 11^{ème} et 14^{ème} semaine (Tableau 17, Annexe 2).

Tableau 17: Evolution de la hauteur des plantes en cm de *Lycopersicon esculentum* Mill en fonction de dose de zinc et dans le temps (semaines).

Semaines	Dose de zinc (ppm)				
	0	50	100	200	300
S1	23 ± 1,206	23,5 ± 0,709	23 ± 1,002	22,333±1,05	22±1,804
S2	24±1,5	25,167 ± 0,289	24,833±1,155	24,167±1,258	23,333±1,528
S3	26±1,411	28 ± 0,625	27,833±1,405	26,5±1,744	25,167±1,35
S4	27,5±2,173	30,333 ± 2,095	29,667±1,65	30,333±3,747	27,333 ± 1,609
S5	30,667±2,587	35,167±1,758	32,667±1,8	34±4,356	30,333±0,473
S6	32±2,371	38,333±1,562	34,833±1,114	36,833±4,036	32,667±0,351
S7	33,333±2,312	39,167±0,862	36,667±0,737	39±3,537	35,333±0,379
S8	35,5±2,214	40,5±0,896	40±0,924	40±4,405	37,333±0,777
S9	36,167±2,797 B	41,5±0,624 AB	40,833±0,961 AB	43,167±3,837 A	37,833±0,723 AB
S10	37,333±2,621 B	42,333±0,608 AB	41,5±0,839 AB	45,333±3,118 A	39,167±0,808 B
S11	38±2,658 B	42,5±0,643 AB	43,667±0,981 AB	46,667±3,109 A	39,333±1,153 B
S12	38,5±2,406 C	43,667±0,961 ABC	44,333±0,611 AB	47,167±3,126 A	40,833±1,739 BC
S13	39,167±2,542 B	44,167±1,168 AB	44,333±0,513 AB	47,5±3,079 A	40,833±1,834 B
S14	39,5±2,651 B	44,667±0,751 AB	45±0,656 AB	48±2,921 A	40,833±1,721 B

Comme l'essai du cuivre, la figure 17 révèle deux périodes distincts:

La première période se prolonge de la 1^{ère} jusqu'à la 8^{ème} semaine, on ne remarque qu'une faible différence de croissance des plantes entre les différents doses par rapport au témoin, cette différence devient détectable après la 6^{ème} semaine où on signale une faible avantage de la hauteur des plantes chez les doses 50, 100 et 200 ppm, les plantes témoins (0 ppm) enregistrent la hauteur des plantes la plus bas. En effet, la 8^{ème} semaine procure la hauteur maximale des plantes obtenue chez le traitement 50 ppm soit 40,5 cm avec une augmentation par 14,08 % en comparaison aux plantes témoins, ces dernières présentent la hauteur la plus bas avec 35,5 cm (Tableau 18).

Tableau 18: Taux d'évolution (%) de la hauteur des plantes en fonction de l'application de zinc dans la 8^{ème} et la 14^{ème} semaine.

Dose de zinc (ppm)	0	50	100	200	300
Evolution % (S8)	-	14,08	12,68	12,68	5,16
Evolution % (S14)	-	13,08	13,92	21,52	3,37

La deuxième période commence à la 9^{ème} semaine et s'étale jusqu'à la fin de l'essai, et se caractérise par une croissance rapide des plantes dans les différents traitements notamment à 200 ppm de zinc en comparaison avec les plantes non traitées (0 ppm).

Les résultats moyens (Tableau 17) illustrent dans la 14^{ème} semaine que la dose 200 ppm de zinc participe à une meilleure croissance des plantes soit 48 cm d'hauteur avec un taux d'augmentation de 21,52 % par rapport au témoin à 0 ppm (Tableau 18), tandis que ce dernier garde les valeurs les plus faible soit 39,5 cm.

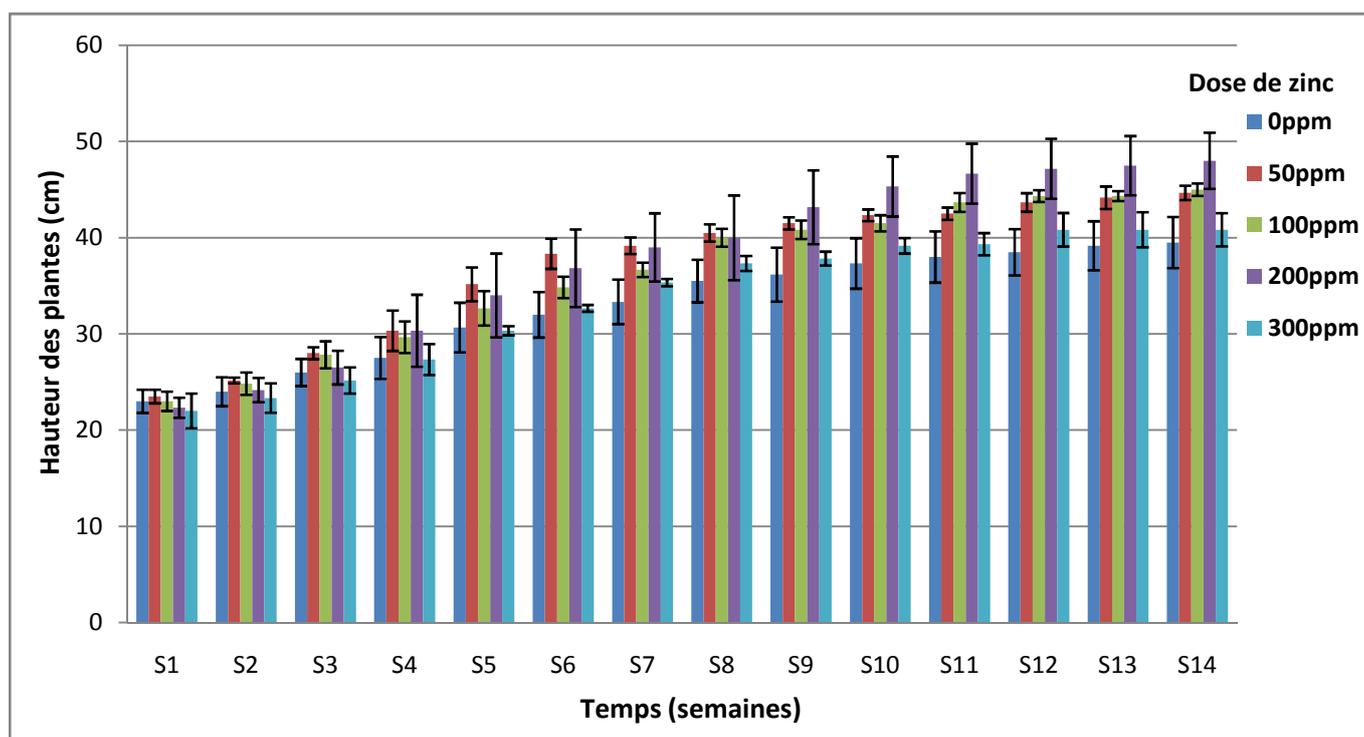


Figure 17: Effet du zinc sur la hauteur des plantes de *Lycopersicon esculentum* Mill. en fonction du temps (semaines).

2.1.2 La longueur des racines :

L'analyse statistique révèle un effet significatif de l'augmentation de l'apport de zinc sur l'élaboration de la longueur des racines de la tomate ($P=0,045$) (Annexe 2), mais le test de Newman et Keuls - Seuil = 5% n'exprime pas une différence significative entre les longueurs moyennes des racines (Tableau 19).

Tableau 19 : Longueur moyenne des racines des plantes de *Lycopersicon esculentum*. Mill en fonction de la dose de zinc appliquée. Les résultats sont présentés en Moyennes \pm écart-type, selon le test de Newman-Keuls ($P= 5\%$).

Dose de zinc (ppm)	Longueur des racines (cm)	Evolution %
200	13,3 \pm 0,63 A	25,08
100	12,867 \pm 1,149 A	21,01
50	12,833 \pm 1,536 A	20,69
0	10,633 \pm 1,147 A	-
300	10,367 \pm 0,571 A	-2,50

L'étude de la figure 18 indique que l'augmentation de la dose du zinc stimule légèrement la croissance des racines pour atteindre son pic de 13,3 cm chez la dose 200 ppm, enregistrant une progression par 25,08 % comparativement au témoin 0 ppm. Ensuite

l'élaboration de la longueur racinaire diminue sous le traitement 300 ppm soit une mesure de 10,367 cm avec un taux de réduction de 2,50 % par rapport au témoin (Tableau 19).

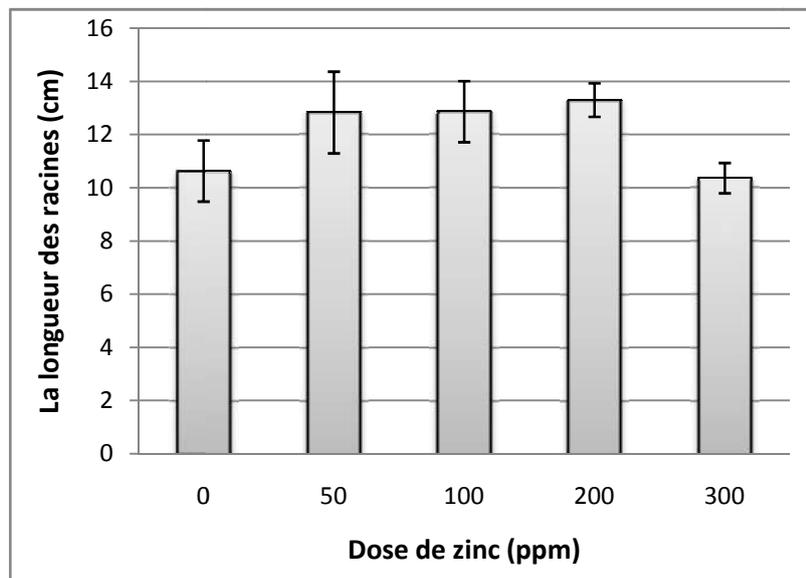


Figure 18: Effet du zinc sur la longueur des racines de *Lycopersicon esculentum* Mill.

Discussion

L'étude portée sur l'influence du zinc sur les paramètres morphologiques (Annexe 2) montre que la hauteur des plantes n'est pas affectée significativement par l'application du zinc durant les 8 premières semaines. Par contre, l'influence de la présence du zinc sur la hauteur des plantes est devenue significative à partir de la 9^{ème} semaine ($P < 0,05$) et celui est déclaré hautement significatif dans la 11^{ème} et enfin la 14^{ème} semaine ($P < 0,01$) (Annexe 2). Cela peut être expliqué par l'influence du froid pendant la première période (janvier, février) qui ralentit la croissance des plantes et inhibe l'absorption du zinc, ensuite il y a l'augmentation de la température en Mars donc une différence d'absorption selon la dose apportée.

Concernant l'élaboration de la longueur des racines, un effet positif et significatif est enregistré sur la longueur racinaire provoqué par l'accroissement de la dose de zinc appliqué (Annexe 2).

Grejtovsky (2006) a indiqué que le niveau d'addition du Zn avait un peu d'effet positif sur la hauteur de la plante et avec une croissance maximale significative observée chez les plantes traitées par 50 mg/kg du Zinc. Un effet similaire de l'apport du Zn sur ce paramètre est reporté également par **Misra (1992)** qui a observé ainsi un effet positif de cet élément sur la production des talles et les branches des plantes de *Mentha arvensis* L.

La hauteur des plantes et la longueur des racines de la tomate *Lycopersicon esculentum* sont augmentées à des concentrations de 50 et 100 mg/kg du zinc en 105 jours et sont diminués avec l'augmentation du niveau du zinc dans le sol (**Vijayarengan et Mahalakshmi, 2013**). Les mêmes résultats sont obtenus par **Vijayarengan, (2012)** dans un essai de 45 jours sur les plantes de radis. **Sivasankar et al (2012)** aussi ont conclu que les niveaux de 50-100 mg/kg du zinc dans le sol étaient bénéfiques pour la croissance des plantes de chilli, marigold, moutard et petit pois. Le niveau de zinc dans le sol plus de 150 mg/kg a été prouvé à être toxique.

L'augmentation significative dans la croissance des plantes de tomate *Lycopersicon esculentum* Mill en hauteur et en longueur racinaire suite à l'apport du zinc est probablement due à son utilisation à des quantités mineures. Sous l'application de faibles concentrations de ce métal, l'amélioration du système racinaire a aidé les plantes à mieux absorber de l'eau et les autres nutriments dissous dans le sol et en effet a amélioré la croissance de différents organes et de la plante entière (**Reichman, 2002**). Le Zinc à des niveaux élevés peut inhiber la croissance racinaire (dans notre étude à partir de 300 ppm).

Contrairement selon **Khudsar (2004)**, le traitement par le Zinc a apporté presque une diminution significative de paramètres de croissance aux différents stades de développement des plantes d'*Artemisia annua*. Le Zinc a causé une réduction significative de la hauteur des plantes d'*Artemisia annua* encore à 50 et 100 µg/g du sol. La longueur des racines aussi est diminuée significativement chez toutes les concentrations du Zinc, à l'exception à 50 µg/g.

2.2 Paramètres biométriques

2.2.1 La biomasse fraîche des plantes:

Le test de la comparaison des moyennes montre une différence significative concernant le poids frais de la partie aérienne, la dose 200 ppm se classe en tête (groupe A) (Tableau 20). Par contre l'apport du zinc ne déclenche aucun effet significatif ($P > 0,05$) sur le poids frais des racines par rapport au témoin (annexe 2).

Tableau 20: Poids frais de la partie aérienne et des racines chez *Lycopersicon esculentum* Mill. en fonction de la dose de zinc appliquée. Les résultats sont présentés en Moyennes \pm écart-type, selon le test de Newman-Keuls ($P = 5\%$).

Dose de zinc (mg/kg)	biomasse fraîche aérienne (g)	Evolution %	Dose de zinc (mg/kg)	biomasse fraîche racinaire (g)	Evolution %
200	43,939 \pm 2,421 A	35,21	200	10,465 \pm 1,403	56,73
50	37,494 \pm 2,007 B	15,38	50	9,381 \pm 0,555	40,50
300	35,186 \pm 2,136 B	8,28	300	9,167 \pm 1,185	37,29
100	32,56 \pm 2,456 B	0,20	100	8,41 \pm 0,927	25,95
0	32,496 \pm 2,946 B	-	0	6,677 \pm 2,101	-

Les résultats rapportés sur la figure 19 montrent que le poids frais de la partie aérienne est plus élevé comparativement au celui de la partie racinaire, mais contrairement à l'essai du cuivre, on constate d'une manière générale qu'il y a une augmentation de la biomasse fraîche aérienne et racinaire suivant le gradient du zinc. Il faut noter aussi que le taux d'augmentation du poids frais de la partie racinaire est plus important que celui de la partie aérienne. Le taux d'augmentation du poids frais de la partie aérienne par rapport aux plantes cultivées dans le substrat témoin à 0 ppm de zinc varie entre 0,20 et 35,21 %, par contre le taux d'augmentation chez la partie racinaire varie entre 25,95 et 56,73 % (Tableau 20).

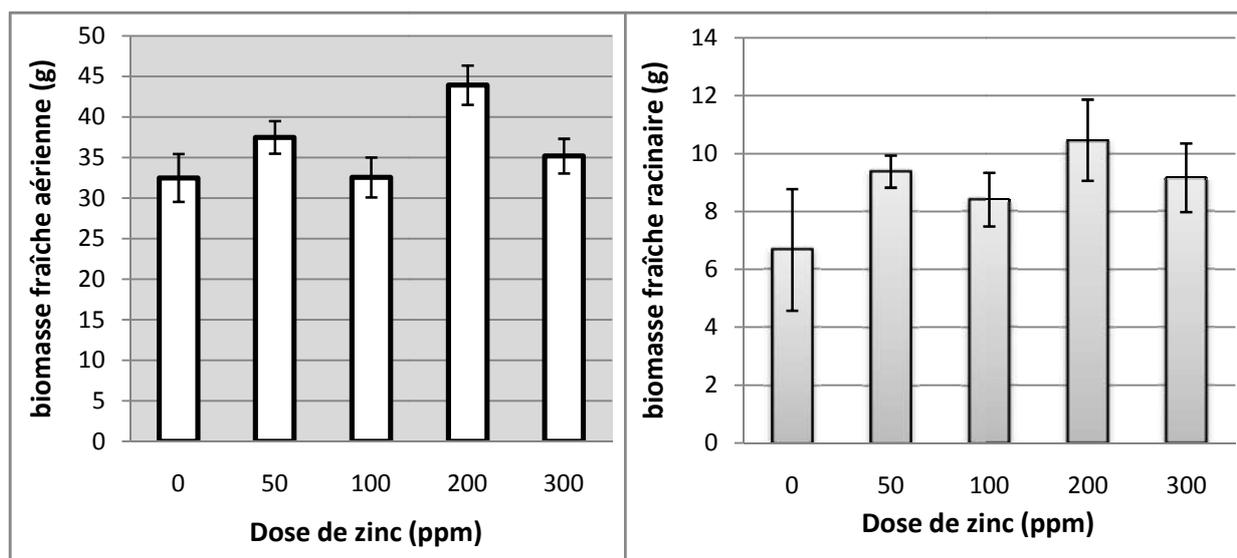


Figure 19: Effet du zinc sur la biomasse fraîche aérienne et racinaire de *Lycopersicon esculentum* Mill.

Le poids frais de la partie aérienne atteint sa valeur optimale à la dose de 200 ppm de zinc avec une valeur de 43,939 g, tant que les plantes témoins représentent le poids minimal soit 32,496 g. Les plantes soumises à la dose de 200 ppm de zinc présentent encore le poids frais des racines le plus élevé soit 10,465 g, au moment où le poids frais des racines le plus bas est enregistré chez les plantes témoins avec 6,677 g.

2.2.2 La biomasse sèche des plantes:

Selon l'analyse statistique des résultats obtenues, l'apport du zinc n'exerce qu'un effet minime ($P > 0,05$) sur le poids sec de la partie aérienne et celui des racines. (Tableau 21, annexe 2).

Tableau 21: Poids sec de la partie aérienne et des racines chez *Lycopersicon esculentum* Mill. en fonction de la dose de zinc appliquée. Les résultats sont présentés en Moyennes \pm écart-type, selon le test de Newman-Keuls ($P = 5\%$).

Dose de zinc (mg/kg)	biomasse sèche aérienne (g)	Evolution %	Dose de zinc (mg/kg)	biomasse sèche racinaire (g)	Evolution %
200	8,193 \pm 1,16	32,77	200	1,191 \pm 0,217	53,08
50	7,354 \pm 0,837	19,17	50	1,129 \pm 0,029	45,11
300	6,951 \pm 1,361	12,64	300	1,001 \pm 0,137	28,66
100	6,369 \pm 0,568	3,21	100	0,993 \pm 0,063	27,63
0	6,171 \pm 0,951	-	0	0,778 \pm 0,278	-

L'examen de la figure 20 indique que le poids sec aérien et racinaire des plantes varie de la même manière de leur poids frais et inversement à l'essai du cuivre, sachant aussi que le taux d'augmentation du poids sec des racines est beaucoup plus supérieur que celui de la partie aérienne. Le taux de progression du poids sec de la partie aérienne par rapport aux plantes témoins à 0 ppm de zinc varie entre 3,21 et 32,77 %, différemment du taux de progression chez celui des racines qui passe de 25,95 à 56,73 % (Tableau 21).

La dose 200 ppm de zinc conduit à une meilleure production de la matière sèche aérienne des plantes soit 8,193 g, au moment où le témoin représente la valeur la plus faible avec 6,171 g. Concernant la matière sèche racinaire, elle évolue à partir de plantes non traitées (0 ppm) avec 0,778 g vers une production maximale enregistrée chez les plantes traitées par 200 ppm de l'ordre de 1,191 g (Tableau 21).

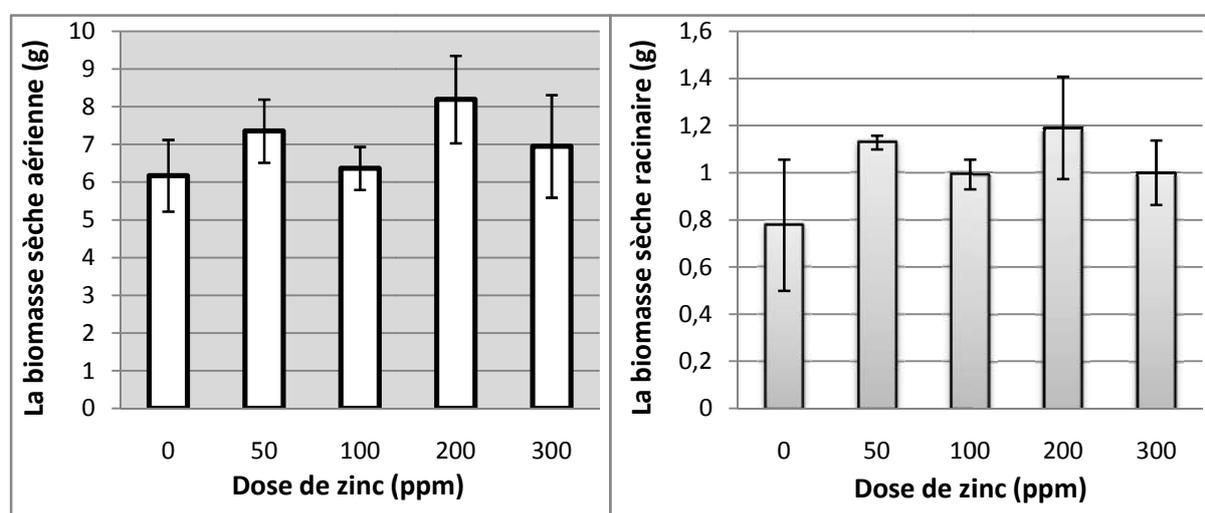


Figure 20: Effet du zinc sur la biomasse sèche aérienne et racinaire de *Lycopersicon esculentum* Mill.

Discussion

Le poids frais de la partie aérienne semble être très affecté par l'augmentation de la dose de zinc qui influe d'une manière positive et significative sur la production de la biomasse ($P=0,004$). Cependant, le poids frais des racines n'est pas affecté par l'augmentation de la dose de zinc, ce dernier facteur agit d'une manière non significative sur la production de la biomasse (Annexe 2). Le poids sec de la partie aérienne et racinaire ne sont pas affectés par l'augmentation de la dose de zinc qui influe de façon non significatif sur la production de la matière sèche (Annexe 2).

Dans notre expérimentation on a remarqué une nette augmentation de la production de la biomasse signe visible du bénéfice du zinc en particulier jusqu'à la dose de 300 ppm. L'application des différents traitements du zinc aux plantes a manifesté des progressions notables des paramètres biométriques, avec la mort des plantes à partir d'une concentration de 400 ppm signent d'une toxicité sévère.

Un effet faible, positif et non significatif du zinc a été observé également par **Grejtovsky (2006)** dans la production de la biomasse des plantes de camomille (*Matricaria chamomilla L.*). En outre, l'addition du Zn au sol (jusqu'à 300 ppm) a affecté positivement la production de la matière sèche des parties aériennes qui, comparativement au témoin, a été dans tous les traitements plus élevée par 12–17 %, ce qui coïncide avec nos résultats.

La matière sèche des racines, tiges, feuilles et toute la partie aérienne a été augmentée à des niveaux de 50 et 100 mg/kg de zinc, mais celle-ci procure une baisse graduelle à partir de 150 mg/kg et plus (**Vijayarengan et Mahalakshmi, 2013**). Ce qui rejoint encore notre résultat, il y avait des nombreux travaux qui suggèrent que les métaux lourds augmentent la production de la matière sèche de différentes parties de la plante à des niveaux inférieurs (**Vijayarengan, 2012, Shrikrishna et Singh, 1992**).

Le traitement du Zinc à 50 et 100 mg/kg du sol a été prouvé comme favorable pour le développement global des plantes de tomate. Sous l'application des doses faibles du zinc, l'amélioration du système racinaire aide la plante pour une meilleure absorption de l'eau et autres nutriments dissous qu'elle les contient et par conséquent améliore la croissance des différents organes et de la plante entière (**Reichman, 2002**). L'amélioration de l'efficacité de croissance des organes végétale pourrait également être due aux effets bénéfiques des traitements du zinc sur les activités physiologiques et autres réactions enzymatiques dans la transformation des carbohydrates et des activités de hexokinase de la plante qui sont responsables de la stimulation de la croissance de la plante et ses organes composants influençant finalement le développement relative des différentes parties de la plante et leur efficacité de croissance (**Vijayarengan et Mahalakshmi, 2013**). Une amélioration similaire de croissance et de la production due à l'application du zinc a été reportée par **Sivasankar et al (2012)**.

Au contraire, le travail de **Khudsar (2004)** montre que la masse sèche de la partie aérienne, racinaire et totale d'*Artemisia annua* diminue significativement avec le taux de zinc

appliqué (jusqu'à 400 ppm). La réduction de la production de la matière sèche des plantes à des concentrations élevées des métaux lourds a été observée aussi par **Kalyanaraman et Sivagurunathan, 1993** (cadmium, cuivre et zinc), **Murugesan, 1996** (cuivre) et **Vijayarengan, 2012** (zinc).

2.3 Paramètres chimiques

2.3.1 Accumulation du zinc dans la plante

L'analyse de la variance accompagnée du test de Newman-Keuls (Tableau 22) montrent qu'il s'agit d'un effet très hautement significatif ($P=0,00001$) de l'application de zinc sur son accumulation dans les parties aériennes de la plante, cependant le contenu des racines en zinc n'est pas affecté significativement ($p<0.05$) par la présence de zinc dans le substrat. (Annexe 2)

Tableau 22: Concentrations de zinc dans les parties aériennes et des racines de *Lycopersicon esculentum* Mill en fonction de la dose de cuivre appliquée. Les résultats sont présentés en Moyennes \pm écart-type, selon le test de Newman-Keuls ($P= 5\%$).

Dose de zinc (ppm)	Accumulation du zinc dans la partie aérienne (ppm)	Dose de zinc (ppm)	Accumulation du zinc dans les racines (ppm)
300	1171,817 \pm 23,718 A	300	1354,108 \pm 145,031
200	1070,385 \pm 64,57 A	200	1319,454 \pm 55,794
100	935,467 \pm 29,145 B	100	1279,477 \pm 64,842
50	836,976 \pm 77,742 B	50	1223,198 \pm 178,594
0	383,507 \pm 63,972 C	0	972,288 \pm 289,552

Ce qu'il apparait selon la figure 21, l'accumulation du zinc dans chacun des parties aérienne et racinaire de la plante augmente au fur et à mesure que la grandeur de zinc augmente, en outre la teneur en zinc accumulé dans les racines est plus important que celle dans les parties aériennes.

En effet, les teneurs en zinc les plus élevées dans les parties aériennes et dans les racines sont enregistrée chez la dose 300 ppm soit des concentrations 1171,817 et 1354,308 ppm respectivement, pendant que les plantes témoins présentent les valeurs les plus faibles sont par ordre : 383,507 et 972,288 ppm (Tableau 22).

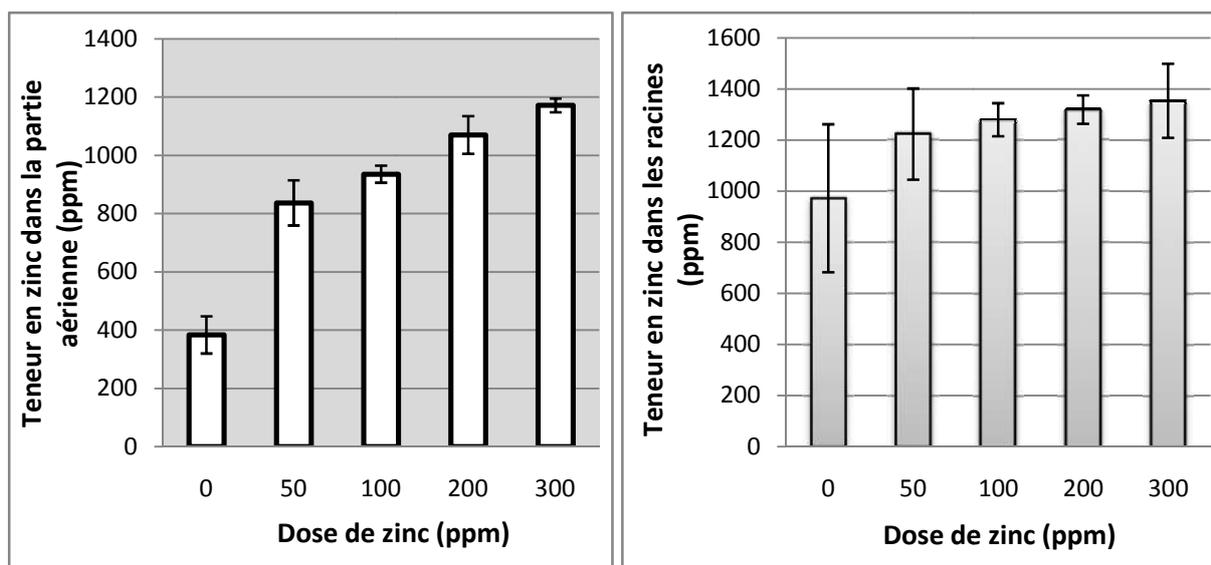


Figure 21: Effet du zinc sur son accumulation dans la partie aérienne et racinaire de *Lycopersicon esculentum* Mill.

2.3.2 Teneur en potassium et en phosphore

A travers les traitements statistiques il est constaté qu'il existe une influence hautement significatif de l'apport du zinc sur la teneur des plantes en potassium ($P < 0,01$), au moment où la teneur en phosphore n'est pas affectée par la présence du zinc ($P > 0,05$) (annexe 2).

Tableau 23: Teneur en potassium et en phosphore dans la partie aérienne de *Lycopersicon esculentum* Mill en fonction de la dose de zinc appliquée. Les résultats sont présentés en Moyennes \pm écart-type, selon le test de Newman-Keuls ($P = 5\%$).

Dose de zinc (ppm)	Dosage de potassium (%)	Evolution %	Dose de zinc (ppm)	Dosage de phosphore (%)	Evolution %
200	4,713 \pm 0,095 A	10,66	200	0,19 \pm 0,017	27,52
50	4,456 \pm 0,135 AB	4,62	100	0,181 \pm 0,025	21,47
0	4,259 \pm 0,265 B	-	50	0,162 \pm 0,016	8,72
300	4,116 \pm 0,091 B	- 3,36	300	0,15 \pm 0,024	0,67
100	4,068 \pm 0,05 B	- 4,48	0	0,149 \pm 0,014	-

La figure 22 nous traduit le cas où les niveaux d'addition du zinc agissent positivement sur le contenu de la plante en phosphore et en potassium par rapport au témoin, de plus le taux de progression de la teneur en phosphore est apparu mieux que celui de la teneur en potassium.

Le contenu en potassium passe d'une valeur de 4,259 % de MS chez le témoin (0 ppm) jusqu'à une teneur maximale de 4,713 % de MS chez la dose 200 ppm du zinc avec un taux d'évolution de 10,66 % comparativement au témoin, mais on note que la concentration du potassium la plus faible est 4,068 ppm chez le traitement 100 ppm du zinc induisant une diminution de l'ordre de 4,48 % (Tableau 23).

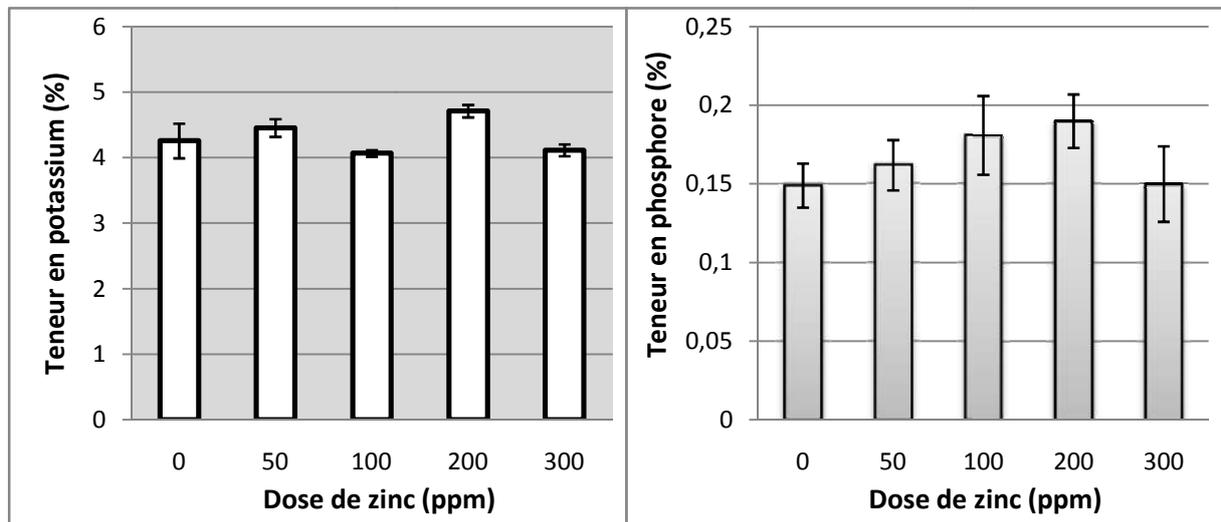


Figure 22 : Effet du zinc sur la concentration de potassium et de phosphore dans la partie aérienne de *Lycopersicon esculentum* Mill.

D'autre façon, la teneur de la plante en phosphore augmente suivant le niveau d'application du zinc, la teneur maximale enregistrée est 0,19 % de MS chez la dose 200 ppm c'est-à-dire 27,52 % plus important que chez les plantes témoins, puis on remarque une baisse du phosphore chez la dose 300 ppm avec 0,15 % de MS, en sachant que témoin montre le taux le plus faible de phosphore soit 0,149 % de MS (Tableau 23).

Discussion

L'accumulation du zinc dans chacun des parties aérienne et racinaire de la plante augmente au fur et à mesure que la dose de zinc dans le substrat augmente, néanmoins la teneur en zinc accumulé dans les parties aériennes est plus influencée et corrélée significativement par un coefficient ($r=0,87$), au moment où l'application du zinc n'a pas exercé un effet significatif sur la teneur en zinc dans les racines.

Nous avons conclu aussi dans cette étude que l'application du zinc se traduit par l'augmentation des teneurs du potassium et du phosphore dans les plantes de tomates, mais le premier semble être affecté significativement.

Parmi les éléments potentiellement toxiques étudiés généralement, le Zn apparaît avec les éléments trace les plus mobiles à une biodisponibilité et un transfert élevés vers les plantes (**Grejtovsky, 2006**), ce qui correspond complètement nos résultats de dosage du Zn dans les plantes de tomate. **Grejtovsky (2006)** a signalé que la camomille absorbe le Zn facilement et l'accumule dans tous ses organes. L'addition du Zn dans le sol a causé une augmentation significative dans sa concentration dans les parties aériennes de 14.9 mg/kg (plantes témoins) jusqu'à 271.0 mg/kg chez la dose du Zn la plus élevée 300 ppm. En comparaison avec le témoin le contenu en Zn dans les parties aériennes est augmenté 18 fois.

La compartimentation et l'accumulation d'un métal lourd s'effectue dans les vacuoles des cellules racinaire alors limitant le transport du métal lourd vers la partie aérienne, ce qu'il confirme nos résultats. Les métaux lourds sont stockés souvent dans les racines (**Sivasankar et al, 2012**). **Sbartai et al., 2011** ont trouvé que l'accumulation du zinc dans les racines et les feuilles de la tomate est augmenté avec l'augmentation de la concentration du métal (Zn) et que cette accumulation est plus élevée dans les racines que dans les feuilles ou ils sont enrichis par un maximum de 49,7-20,5 mg/g MS respectivement chez la plus haute concentration 500 µM.

La concentration maximale du Zn dans la partie aérienne de la tomate est 1171,817 ppm chez les plantes amendées par 300 ppm probablement a atteint le niveau phytotoxique puisque les plantes sont mort au-delà de cette dose, et cela peut confirmer les seuils limite qui entraînent la phytotoxicité du zinc proposés par plusieurs auteurs qui sont très différents:

Kabata-Pendias et Pendias, 1992 : Zn > 100 mg/kg ; **Lepoivre, 2003** : 500-800 ppm ; **Khudsar, 2004** : 100-400 ppm ; **WHO, 2001** : 200-300 ppm ; **Fageria et al, 2002** : 100-400 ppm ; **Macnicol et al, 1985** : 100-500 ppm ; **Chaney, 1993** : 300-1000 ppm.

Cayton et al. (1985) ont reporté que l'absorption et la translocation des nutriments de la plante dans le riz comme le Fe, Mg, K, P et Ca dépend de la concentration du Zn dans le sol. Ils ont reporté aussi que le zinc a été un antagoniste du cuivre dans le site d'absorption primaire, au contraire de son action sur le Fe, P, Mg, K et Ca, ce qui coïncide et rejoint nos résultats. L'absorption d'azote, phosphore, potassium et du soufre est augmenté significativement suivant l'apport du zinc jusqu'à l'application de 8 kg/ha du Zn dans le sol. (**Upadhyay, 2012**).

Mais **Orabi et al (1982)** annoncent que dans deux types du sol (calcaire et alluvial), aucun effet obtenu de l'application du Zn sur l'absorption du P par les plantes de tomate *Lycopersicon esculentum* Mill.

Cependant, chez **Zhao et al (2012)** la supplémentsions du zinc (jusqu'à 2000 $\mu\text{mol/L}$ en culture hydroponique) aux plantes perturbe l'homéostasie des éléments et diminue les concentrations des micros et macroéléments comme Fe, Mg, Mn, Ca et K. Ces résultats sont mentionnés également par **Wang et al (2009)**. Il y avait une diminution significative dans la concentration du P dans les feuilles de la tomate avec l'augmentation du Zn apporté et la concentration du Zinc dans la plante est augmentée avec l'augmentation du Zn apporté (**Kaya et al, 2000**).

2.4 Paramètres de la production

2.4.1 Nombre et poids de fruits

L'étude statistique des résultats obtenus démontre que le nombre et le poids de fruits de chaque plant de tomate ne sont pas significativement influencés par l'application du zinc ($p < 0,05$) malgré leurs augmentations par rapport au témoin (Annexe 2).

Tableau 24: Nombre et le poids total de fruits de *Lycopersicon esculentum* Mill. en fonction de la dose de zinc appliquée. Les résultats sont présentés en Moyennes \pm écart-type, selon le test de Newman-Keuls ($P = 5\%$).

Dose de zinc (ppm)	Nombre de fruits/plant	Evolution %	Dose de zinc (ppm)	Poids de fruits/plant (g)	Evolution %
300	4,667 \pm 1,637	74,99	300	40,76 \pm 7,027	17,67
100	3,667 \pm 0,529	37,49	100	37,737 \pm 5,131	8,94
50	3 \pm 1,102	12,48	50	36,073 \pm 6,914	4,14
0	2,667 \pm 1,039	-	0	34,64 \pm 8,619	-
200	2,333 \pm 0,115	- 12,52	200	33,587 \pm 4,868	- 3,04

L'examen de la figure 23 indique globalement que le nombre et le poids de fruits de la tomate est positivement proportionnel avec l'application du zinc.

On observe que le nombre de fruits augmente progressivement du témoin jusqu'au traitement 300 ppm qui présente le seuil d'amélioration de la production de fruits par un taux de 74,99 %, malgré que le nombre de fruits le plus bas est rencontré chez la dose 200 ppm induisant une diminution de 12,52 % comparativement au traitement 0 ppm (Tableau 24).

D'autre part, les différentes applications du zinc ont portées des élévations au poids de fruits dont le taux maximal est 17,67 % obtenu après l'application de 300 ppm en comparant au témoin (0), tandis que la dose 200 ppm a engendré une réduction par un taux de 3,04 % (Tableau 24).

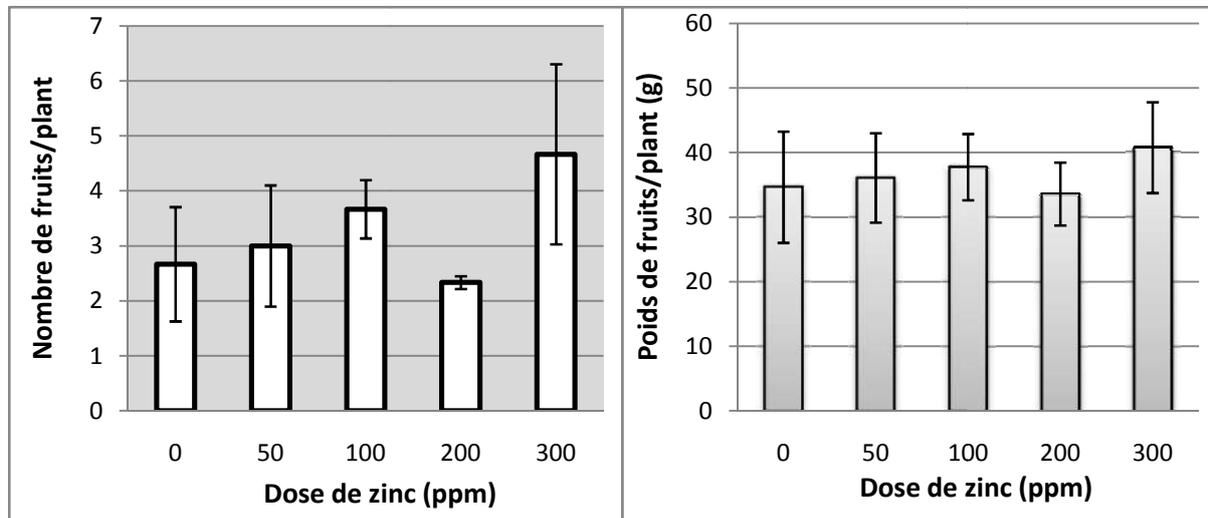


Figure 23: Effet du zinc sur le nombre et le poids de fruits de *Lycopersicon esculentum* Mill.

Par conséquent, l'apport de 300 ppm du zinc avait produit le meilleur nombre et poids de fruits de l'ordre respectif 4,667 fruits et 40,76 g par rapport au témoin, au même temps où la dose 200 ppm garde toujours la production la plus faible soit 2,333 fruits et 33,587 g (Tableau 24).

Discussion

On a obtenu d'après notre étude que la présence du zinc n'agit pas significativement sur le nombre et le poids de fruits des plantes de tomate malgré qu'ils enregistrent des progressions comparativement au témoin.

Cependant, **Grejtovsky (2006)** a signalé qu'un excès dans l'apport du Zn a réduis la production de la camomille; la production maximale est réalisée avec le traitement par 50 mg Zn/kg du sol (augmentation par 8%), au moment ou la dose de 300 mg Zn/kg du sol a provoqué une diminution significative de 17% du rendement d'anthodia.

-Corrélation entre le zinc et les paramètres étudiés :

D'après la matrice de corrélation (Annexe 3), on remarque qu'il ya une relation significative entre la biomasse fraîche aérienne (par des coefficients de corrélations positifs r)

et la biomasse fraîche des racines (**0,60**), le poids sec aérien (**0,67**), le poids sec des racines (**0,60**), la longueur des racines (**0,54**), la teneur des plantes en potassium (**0,69**) et en phosphore (**0,55**) et la hauteur des plantes (**0,64**), c'est-à-dire l'augmentation de ces paramètres est liés ou à une incidence directe sur l'augmentation de la biomasse fraîche aérienne.

Pour le poids frais racinaire, on constate qu'il est lié significativement (par des coefficients de corrélations positifs r) avec le poids sec aérien (**0,67**), le poids sec des racines (**0,93**), la longueur des racines (**0,53**), la teneur des plantes en potassium (**0,58**) et l'accumulation du zinc dans la partie aérienne (**0,60**), c'est-à-dire lorsque les paramètres cités augmentent le poids frais racinaire augmente.

Concernant la biomasse sèche aérienne, on constate qu'elle est en relation positive et significative avec la biomasse sèche des racines ($r=0,74$), la teneur des plantes en potassium ($r=0,59$), alors l'importance de la production de la biomasse sèche aérienne est accompagné avec la progression des deux paramètres précédents. D'autre part, le poids sec des racines s'interagit positivement par des coefficients de corrélations r avec la longueur des racines (**0,65**), la teneur en potassium (**0,62**), donc la biomasse sèche racinaire progresse que ces derniers paramètres développent.

La croissance des racines en longueur est conventionnée au teneur en phosphore et la hauteur des plantes avec des coefficients de corrélations positifs (r) classés respectivement: **0,57 ; 0,65**, ainsi les racines s'accroissent avec l'augmentation du phosphore et la hauteur.

Pour la teneur des plantes en phosphore, on note une corrélation positif avec la hauteur des plantes par un coefficient de $r= 0,66$, ça veut dire que le phosphore et la croissance en hauteur augmentent simultanément. L'accumulation du zinc dans les parties aériennes a une forte correspondance avec celle dans les racines à savoir un coefficient de corrélation significatif $r=0,72$, c'est-à-dire le zinc s'accumule au même temps dans chacun des parties de la plantes. Au sujet de la production, on remarque qu'il ya une liaison positif évidente entre le nombre et le poids de fruits avec coefficient de corrélation $r= 0,82$, alors le poids de fruits augmente quand leur nombre augmente.

En vue globale, l'essai de zinc n'a pas contribué à des interactions assez importantes entre les paramètres étudiés comparativement à l'essai du cuivre, de plus toutes les corrélations significatives existantes sont positives, par autre sens tous les paramètres s'accroissent collectivement avec des coefficients de corrélations positifs.

CONCLUSION

Conclusion

Les résultats obtenus dans le cadre de la présente étude ont révélé les principaux effets du cuivre et du zinc sur le comportement biologique de la tomate. Les différents paramètres testés sur *Lycopersicon esculentum* Mill ont permis de montrer que les deux éléments laissent des effets bénéfiques, au-dessous de certains seuils, aussi bien à l'échelle de la partie aérienne qu'au niveau des racines. Ce seuil est entre 200 et 300 ppm et au-dessus duquel la majorité des paramètres étudiés diminuent progressivement jusqu'à la mort à des doses de 1000 et 2000 ppm pour le cuivre, et cependant, à partir de 400 ppm pour le zinc ce qui pourrait être expliqué que le zinc est plus toxique pour la plante que le cuivre.

L'étude de l'effet des métaux lourds (cuivre et zinc) sur certains paramètres morphologiques de la tomate *Lycopersicon esculentum* Mill, comme la hauteur des plantes, a révélé qu'ils exercent une stimulation de la croissance jusqu'à la dose 400 ppm du cuivre et 300 ppm du zinc, les progressions atteignent respectivement 24% et 21,52%, mais une application supérieure à ces niveaux cause la mort dans le cas du zinc, et entraîne un ralentissement insignifiant de croissance en hauteur dans le cas du cuivre à la dose 500 ppm (réduction de 5,78%).

Les effets ressentis par le système racinaire sont d'une manière différente. L'élongation des racines semble être très sensible vis-à-vis des doses élevées du cuivre (à partir de 300 ppm) marquant des réductions qui atteignent 36,16%. Par contre, le zinc à la concentration 200 ppm stimule l'élaboration de la longueur des racines à un taux de 25,08%.

L'action fertilisante de ces deux métaux essentiels est apparue sur la production de la matière fraîche aérienne des plantes à la dose de 200 ppm à savoir des élévations d'environ 35% et encore 100 ppm du cuivre (15,2%), mais ce dernier devient toxique et préjudiciable à la dose 500 ppm et provoque une baisse significative de 14,48% du poids frais aérien. Par contre, le poids frais des racines est affecté négativement par le cuivre au-delà de 300 ppm et diminue par des taux allant jusqu'à 44,12%. Le poids sec aérien semble être non affecté significativement par la grandeur du cuivre, au moment où le poids sec racinaire s'affaiblit sous les fortes doses cupriques : 300, 400 et 500 ppm, cette faiblesse a atteint 40,39%.

D'autre part, malgré que le zinc stimule la production de la biomasse fraîche des racines et de la biomasse sèche aérienne et racinaire, cette stimulation reste insignifiante.

Concernant les paramètres chimiques, l'accumulation des deux métaux dans les parties aérienne et racinaire de la plante augmente au fur et à mesure que leur grandeur dans le substrat augmente, mais seul la partie aérienne qui les accumule de façon significative. On peut dire aussi que le cuivre est un antagoniste du K et du P, car il a induit un stress nutritionnel résultant de l'interférence de ses ions avec l'absorption de ces éléments physiologiquement essentiels. En effet, tel dose du cuivre diminue la nutrition potassique des plantes qui peut arriver à une réduction de 50,67%, néanmoins l'absorption du phosphore n'est pas ralentie qu'après l'application de 300 ppm du cuivre et plus causant une malnutrition en phosphore atteint un taux de 28,36%. Au contraire, l'application du zinc agit un peu positivement sur la teneur en K et en P. L'application du zinc à une dose de 200 ppm a favorisé l'absorption du K et a augmenté sa teneur par un taux de 10,66%, au même temps ou l'augmentation de la nutrition phosphorique est non significative.

La réponse de la production de fruits par la plante sous l'apport cuprique se manifeste d'abord par l'élévation du nombre produit jusqu'à 50% chez la dose de 200 ppm, ensuite on a une chute du rendement par 30% provoquée le traitement 500 ppm du cuivre. À l'inverse, le poids de fruits n'est pas varié significativement que le cuivre en présence. La présence du zinc amène à une augmentation remarquable de la production (nombre et poids) de fruits mais celle-là reste encore insignifiante.

En résumé, les observations réalisées durant notre travail ont révélé que la présence du cuivre et du zinc dans le milieu tant qu'éléments mineurs est une source intéressante pour l'amélioration de la croissance, la nutrition minérale et du rendement, cependant en cas d'excès ils engendrent des perturbations multiples sur le fonctionnement général des plantes testées, allant jusqu'à la mort. Sur le plan de toxicité, le zinc se trouve plus toxique que le cuivre car même si les deux ont le même seuil de phytotoxicité le zinc cause la mort plutôt que le cuivre.

Enfin, comme les conditions semi contrôlées ne sont pas fiables, il serait plus intéressant de mettre au point une étude approfondie *in situ* pour relever les observations principales en conditions optimales du terrain. Il serait donc nécessaire, de procéder à des analyses chimiques plus complètes sur le sol et la plante, pour vérifier l'action conjuguée finale de ces deux métaux sur la nutrition minérale des plantes afin d'augmenter les rendements de cette culture. Il conviendrait encore de suivre la dynamique du cuivre et du zinc au sein de la plante.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Abdou AS, Al-Darwish FH, Saleh ME, El-Tarabily KA, Azirun MS and Rahman MM, (2011). Effects of elemental sulfur, phosphorus, micronutrients and *Paracoccus versutus* on nutrient availability of calcareous soils. *Australian Journal of Crop Science*, 5(5):554-561.

Adriano DC (2001). Copper, In: Trace elements in terrestrial environment, biogeochemistry, bioavailability, and risks of metal. Springer Science+ Business Media, LLC, 2nd Edition, pp. 499–546.

Alam MN, Abedin MJ and Azad MAK (2010). Effect of micronutrients on growth and yield of onion under calcareous soil environment. *International Research Journal of Plant Science*, 1(3)056-061.

Ali NA, Bernal MP and Ater M (2002). Tolerance and bioaccumulation of copper in *Phragmites australis* and *Zea mays*. *Plant and Soil* 239, 103–111.

Allan DL and Jarrell WM (1989). Proton and copper adsorption to maize and soybean root cell walls. *Plant Physiology* 89, 823–832

Alloway BJ (1995). Heavy metals in soils. Blackie academic and professional, London. 368p.

Alva AK, Mattos DJR and Quaggio JA. (2008). Advances in Nitrogen Fertigation of Citrus. *Journal of Crop Improvement*, Vol. 22(1) (#43), 121-146

Anafide (2006). Impact de l'irrigation et de l'intensification agricole sur la qualité des eaux. IPTRID. Rome. 28 p.

Anfossi S., Billiard E., Bonnet M., Henriot F., Kraemer., Lechenne L., LE Herissier M. et Lorin S (1997). Les métaux lourds. Ecole des mines de Saint-Etoliennes. Paris. 49 p.

Anonyme (2000). Agronomie des bases aux nouvelles orientations. ENITA. Bordeaux. 205 p.

Anonyme (2002). Norme de qualité : eaux destinées à l'irrigation. S.E.E.E.

Anonyme (2003). Cultures horticoles. Programme National de Transfert et Technologies en agriculture (PNTTA). 9p.

Anonyme (2007). Variétés de tomate. Sarl CASAP. (PDF).3 p.

Aubert G. (1978). Méthode d'analyses des sols. C.R.P. Marseille.118 p.

Baize D. (1988). Guide des analyses courantes en pédologie. INRA. Paris.172 p.

Baize D. (1997). Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France). INRA. Paris. 410 p.

Baize D. (2009). Éléments traces dans les sols - Fonds géochimiques, fonds pédogéochimiques naturels et teneurs agricoles habituelles - Définitions et utilités. In: ADEME, 2ème Rencontres Nationales de la Recherche sur les Sites et Sols Pollués, Paris 9 p.

Baize D. et Tercé M. (2002). Les éléments traces métalliques dans les sols. Approches fonctionnelles et spatiales. INRA Editions, Paris, 565 p.

Baker DE and Senft JP (1995). Copper. In: Heavy metals in soils (Alloway Ed), 2nd Edition, Blackie academic & professional, 368 pp.

Bargagli R. (1998). Trace elements in terrestrial plants. An ecophysiological approach to biomonitoring and biorecovery. Springer. 324 p.

Blancard D., Laterrot H., Marchoux G. et Candresse T. (2009). Les maladies de la tomate. Éd. INRA. 210 p.

Bliefert C. et Perraud R. (2001). Chimie de l'environnement : Air, Eau, Sols, Déchets. De Boeck. Paris. 477p.

Boardman R. and McGuire D.O. (1990). The role of zinc in forestry. In: Zinc in forest environments, ecosystems and tree nutrition forest ecology. *Forest Ecology and Management*, 37:167-205.

Boulaine J. (1974). Hydropédologie. Masson.121p

Bourrelier P.H. et Berthelin J. (1998). Contamination des sols par les éléments traces: les risques et leur gestion. Rapport n°42. Ed. Technique et documentation. Paris. 438p.

Brun L. (1998). Etude de l'accumulation, de la biodisponibilité et de la phytotoxicité du cuivre dans des sols viticoles de l'Hérault. Thèse Doctorat, Biologie de l'Evolution et Ecologie, ENSA.M, 140 p.

- Brun, L.A., Maillet, J., Hinsinger P., and Pepin M. (2001).** Evaluation of copper availability to plants in copper-contaminated vineyard soils. *Environmental Pollution*, 111, 293-302.
- Bujtas C. and Cseh E. (1981).** Effect of heavy metals and chelating agents on potassium uptake of cereal roots. *Plant and Soil* 63:97-100.
- Burkhead JL, Gogolin RKA, Abdel-Ghany SE, Cohu CM and Pilon M. (2009).** Copper homeostasis. *New Phytol.* 182: 799–816.
- Bussler W. (1981).** Physiological functions and utilization of copper. In: Copper in soils and plants (Loneragan JF, Robson AD & Graham RD Eds). *Academic Press*, pp. 213–234.
- Cahurel J.Y. (2008).** Fertilisation de la vigne un point sur les préconisations. Institut Français de la vigne et du vin. Paris. 6 p.
- Cayton M.T.C., Reyes E.D., Neue H.U. (1985).** Effect of zinc fertilization on the mineral nutrition of rice differing in tolerance to zinc deficiency, *Plant and Soil* 87: 319–327
- Chaignon V, Bedin F and Hinsinger P. (2002a).** Copper bioavailability and rhizosphere pH changes as affected by nitrogen supply for tomato and oilseed rape cropped on an acidic and a calcareous soil. *Plant and Soil*: 243, 219–228.
- Chaignon V, Di Malta D and Hinsinger P. (2002b).** Fe-deficiency increases Cu acquisition by wheat cropped in a Cu-contaminated vineyard soil. *New Phytologist* 154, 121–130
- Chaignon V. (2001).** Biodisponibilité du cuivre dans la rhizosphère de différentes plantes cultivées – Cas de sols viticoles contaminés par des fongicides. Thèse Doctorat Aix Marseille III, Discipline Géosciences de l'environnement, 173 p.
- Chaney R.L. (1993).** Zinc phytotoxicity. In: Robson, A.D. (Ed.), Zinc in Soils and Plants. Developments in Plants and Soil Sciences. *Kluwer Academic Press*, New York, pp. 131–150.
- Chaux C.L. et Foury C.L. (1994).** Culture légumière et maraichère. Tome 3 : légumineuses potagères, légumes fruit. Tec et Doc. Lavoisier, Paris. 563 p.
- Chen L.M, Lin C.C and Kao C.H (2000).** Copper toxicity in rice seedlings: Changes in antioxidative enzyme activities H₂O₂ level and cell wall peroxidase activity in roots. *Bot. Bull. Acad. Sin.*, 41: 99-103.

Cheverry C. (1994). La dégradation chimique des sols en Bretagne. *Etude et gestion des sols*, 1, 7-21.

Cirad et 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. p 1045-1046.

Clemens S (2001). Molecular mechanisms of plant metal tolerance and homeostasis. *Planta* 212, 475–486

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

Clément M. et Françoise P. (2003). Analyse chimique des sols : méthodes choisies. Technique et conditionne. Lavoisier. Paris. 387 p.

Coppenet M, Golven J, Simon JC, Le Corre L, Le Roy M. (1993). Evolution chimique des sols en exploitations d'élevage intensif : exemple du Finistère. *Agronomie*, 13, 77-83.

Corbineau F. et Come D. (2006). Dictionnaire de la biologie des semences et des plantules. Éditions Tec. & Doc, Lavoisier, Paris (France). 226 p.

Cornu JY, Staunton S and 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*, 292, 63–77

Coïc Y. et Coppenet M. (1989). Oligo-éléments en agriculture et élevage. INRA. Paris. 114 p.

Cronquist A. (1981). An integrated system of classification of flowering plants. Columbia University: 1256p

Davis RD. and Beckett PHT. (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*, 80, 23–32

Diatta J.B., Chudzińska E. and Wirth S. (2008). Assessment of heavy metal contamination of soils impacted by a zinc smelter activity. *J. Elementol.* 13:5–16.

Dore C. et Varoqaux F. (2006). Histoire et amélioration de cinquante plantes cultivées. Ed. INRA, Paris. 698p.

Dučić T. and Polle A. (2005). Transport and detoxification of manganese and copper in plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology* 17, 103–112

Duthil J., 1973. Eléments d'écologie et d'agronomie .T III. Edit. Baillière. Paris. 656 p.

El Alaoui C.A. (2007). Fertilisations minérale des cultures: les éléments minéraux secondaires et oligo-éléments. Rapport n°156. Transfert de technologie en agriculture. Maroc. 4 p.

Estevez B. (2006). L'importance des éléments mineurs : des carences à la toxicité. Agriculture, pêche et alimentation. Québec. 7 p

Fageria NK, Baligar VC and Clark RB. (2002). Micronutrient in crop production. *Adv. Agron.* 77:185–268.

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

Favier J., Ireland-Ripert J., Toque C. et Feinberg. (2003). Répertoire générale des aliments. Ed. Ciqual : 40-48 p.

Flores-Velez LM, Ducaroir J, Jaunet AM and Robert M (1996). Study of the distribution of copper in an acid sandy vineyard soil by three different methods. *European Journal of Soil Science* 47, 523–532

Gallais A. et Bannerot H. (1992). Amélioration des espèces végétales cultivés objectif et critères de sélection. INRA, Paris. 765p.

Gaussen H., Lefoy J. et Ozenda P. (1982). Précis de Botanique. 2eme ed. Masson, Paris: 172p.

Gokhan H. (2002). Physiological and biochemical mechanisms underlying zinc efficiency in monocot and dicot plants. *Plant Physiology*, 131:595-602.

Graham RD. (1981). Absorption of copper by plant roots. In: Copper in soils and plants (Loneragan JF, Robson AD and Graham RD Eds). *Academic Press*, pp. 141–163

Grejtovský A., Markušová K. and Eliašová A. (2006). The response of chamomile (*Matricaria chamomilla* L.) plants to soil zinc supply. *Plant Soil Environ.* 52, (1): 1–7.

Grotz, N., Fox T., Connolly E., Park W., Guerinot M.L. and Eide D. (1998). Identification of a family of zinc transporter genes from *Arabidopsis* that respond to zinc deficiency. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 95, 7220–7224.

Guerinot M.L. (2000). The ZIP family of metal transporters. *Biochim. Biophys. Acta* 1465, 190–198.

Hasan SA, Fariduddin Q, Ali B, Hayat S. and Ahmad A. (2009). Cadmium: toxicity and tolerance in plants. *Journal of Environmental Biology*; 30: 165-174.

He ZL, Yang XE and Stoffella PJ. (2005). Trace elements in agroecosystems and impacts on the environment. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*; 19: 125-140.

I.T.D.A.S. (2006). Fiche technique : culture de tomate sous serre. Biskra .27 p

Institut de technologie agricole (1977). Laboratoire du sol. Méthodes d'analyses physiques et chimiques du sol. 3 Ed. I.T.A. Mostaganem. 105p.

Ippolito JA., Ducey TF and Tarkalson DD. (2011). Interactive Effects of Copper on Alfalfa Growth, Soil Copper, and Soil Bacteria. *Journal of Agricultural Science*; Vol. 3, No. 2; 138-148.

Iwasaki K., Sakurai K. and Takahashi E. (1990). Copper binding by the root cell walls of Italian ryegrass and red clover. *Soil Sci. Plant Nutr.* 36, 431–440.

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

Kabata-Pendias A. (2011). Trace Elements in Soils and Plants. Fourth ed. CRC Press, Boca Raton, Taylor & Francis Group, LLC. 505 p.

Kabata-Pendias A. and Pendias H. (1992). Copper. In: Trace elements in soils and plants, 2nd Edition, CRC Press, pp. 95–108

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

- Kalyanaraman S.B. and P. Sivagurunathan (1993).** Effect of cadmium, copper and zinc on growth of blackgram. *J. Plant Nutr.*, 16: 2029-2042.
- Kaplan M. Sonmez S., Sonmez NK. and Kaya H. (2010).** Influence of copper and sulphur applications on the growth and nutrient contents of tomato plants. *Journal of Food, Agriculture & Environment Vol.8 (3&4): 728-732.*
- Karataglis S. and Babalonas D. (1985).** The toxic effects of copper on the growth of *Solanum lycopersicum L.* collected from Zn and Pb soil. *Angewandte Botanik*, v.59, p.45-52.
- Kassaoui H., Lebkiri M., Lebkiri A., Rifi EH., Badoc A. et Douira A. (2009).** Bioaccumulation de métaux lourds chez la tomate et la laitue fertilisées par les boues d'une station d'épuration. *Bull. Soc. Pharm. Bordeaux*, 148, 77-92
- Kaya C. and Higgs D. (2002).** Improvements in physiological and nutritional developments of tomato cultivars grown at high zinc by foliar application of phosphorus and iron. *Journal of Plant Nutrition*, 25, 1881-1894.
- Kaya C., Higgs D. and Burton A. (2000).** Relationship between zinc supply and phosphorus nutrition/ phosphatase enzyme activity in a hydroponically grown tomato seedlings. *Tarlm Bilimler İ Dergisi*, 6 (1), 40-43.
- Khudsar T., Uzzafar Mahmood, Iqbal M. and Sairam R.K. (2004).** Zinc-induced changes in morpho-physiological and biochemical parameters in *Artemisia annua*. *Biologia Plantarum*, 48 (2): 255-260,
- Kopittke PM. and Menzies NW. (2006).** Effect of Cu toxicity on growth of cowpea (*Vigna unguiculata*). *Plant and Soil* 279, 287–296
- Kucuk O. (2001).** Phase II randomized clinical trial of lycopene supplementation before radical prostatectomy. *Cancer Epidem. Biom. Prev.*10:861-868.
- Lasat MM., Pence NS., Garvin DF., Ebbs SD. and Kochian LV. (1999).** Molecular physiology of zinc transport in the Zn hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*, *J. Exp. Bot.* 51, 71-79

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.

Laumonnier R. (1979). Cultures légumières et maraichère. Tome III. Ed. Bailliere, Paris. 279p

Lebourg A., Sterckeman T., Ciesielski H. and Proix N. (1996). Intérêt de différents réactifs d'extraction chimique pour l'évaluation de la biodisponibilité des métaux en traces du sol. *Agronomie*; 16: 201-215.

Lepoivre Ph. (2003). Phytopathologie. De Boeck et Larcier s.a. 1^{ère} édition, Bruxelles. p 341.

Lexmond T.M., Van Der Vorm P.D.J.. (1981).The effect of pH on copper toxicity to hydroponically grown maize. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, v.29, p.217-238.

Liao M.T., Hedley M.J., Woolley D.J., Brooks R.R. and 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* 223, 243–252.

Liao M.T., Hedley M.J., Woolley D.J., Brooks R.R. and Nichols M.A. (2000b). Copper uptake and translocation in chicory (*Cichorium intybus* L. cv. *Grasslands Puna*) and tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill. cv. Rondy) plants grown in NFT system. I. Copper uptake and distribution in plants. *Plant and Soil* 221, 135-142

Lidon FC. and Henriques FS. (1992). Copper toxicity in rice: Diagnostic criteria and effect on tissue Mn and Fe. *Soil Sci.* 154, 130–135.

Loneragan JF. (1981). Distribution and movement of copper in plants. In: Copper in soils and plants. Eds Loneragan JF, Robson AD and Graham RD. *Academic Press*, pp. 165–187

Loué A. (1993). Oligo-éléments en agriculture. SCPA. Nathan. 597 p.

Lundsgaard K., Prochazka V. et Fuchs N. (2006). Le cuivre est plus qu'un simple métal lourd. L'utilisation du cuivre comme produit phytosanitaire en viticulture biologique. *S.I.V.C.B.D.* 12 p.

- Macnicol R.D. and Beckett P.H.T (1985).** Critical tissue concentrations of potentially toxic elements. *Plant and Soil*, 85, 107–129
- Marcato C.E. (2007).** Origine, devenir et impact du cuivre et du zinc des lisiers porcins. Rôle de la digestion anaérobie. Thèse du doctorat, L'institut national polytechnique de Toulouse. 184 p.
- Marschner H. (1995).** Mineral Nutrition of Higher Plants. 2nd ed. London, UK. Academic Press. 889 p
- Marschner P. (2012).** Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants. Third Edition. Elsevier Ltd. p 651
- McBride MB (2001).** Cupric ion activity in peat soil as a toxicity indicator for maize. *Journal of Environmental Quality* 30, 78–84
- McBride MB. (1994).** Environmental Soil Chemistry. Oxford University Press, New York: 267 p.
- Mengel K. and Kirkby EA. (2001).** Soil copper. In: Principles of plant nutrition, 5th Edition, *Kluwer Academic Publishers*, pp. 599–611
- 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), 182p.
- Michel K. and Ludwig B. (2005).** Bioavailability and biogeochemistry of metals in the terrestrial environment. *Metal Ions in Biological Systems*; 44: 75-96.
- Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural (M.A.D.R) (2011).** Statistiques Agricoles, Algérie. 64 p
- Misra A. (1992).** Effect of zinc stress in Japanese mint as related to growth, photosynthesis, chlorophyll content and secondary plant products – the monoterpenes. *Photosynthetica*, 26: 225–234.
- Mocquot B, Vangronsveld J, Clijsters H and Mench M (1996).** Copper toxicity in young maize (*Zea mays* L) plants: Effects on growth, mineral and chlorophyll contents, and enzyme activities. *Plant and Soil*, 182, 287–300

Mousavi SR. (2011). Zinc in crop production and interaction with phosphorus. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5: 1503-1509

Munro B.D et Small E. (1997). Les légumes du Canada. NRC Research Press, Ottawa. 437 p

Murugesan K. (1996). Influence of copper on the growth and yield of groundnut under *Rhizobium sp.* and *Azotobacter sp.* *Geobios*, 23: 45- 49.

Nagajyoti P.C., Lee K.D. and Sreekanth T.V.M. (2010). Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review. *Environ Chem Lett*, 8:199–216.

Naika S., De Jeude J.V.L., De Goffau M., Hilmi M. et Van Dam B. (2005). La culture de la tomate : production, transformation et commercialisation. 5eme (ed). Foundation agromisa et CTA, Wageningen.105 p.

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.193 p

Nriagu JO. and Pacyna JM. (1988). Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals. *Nature* 333: 134-139.

Orabi AA, Ismail AS. and Mashadi H. (1982). Zinc-phosphorus relationship in the nutrition of tomato plants as affected both by the soil and by the rate of applied zinc. *Plant and Soil*, 69: 67-72.

Ouzounidou G. (1994). Root growth and pigment composition in relationship to element uptake in *Silene compacta* plants treated with copper. *Journal of Plant Nutrition*, v.17, p.933-943.

Pahlsson A.B. (1989). Toxicity of heavy metals (Zn,Cu, Cd, Pb) to vascular plants: A literature review. *Water Air and Soil Pollution*, 47, 287-319.

Pauwels J.M., Van Ranst E., Verloo M. et Mvondoze A. (1992). Manuel de laboratoire de pédologie : Méthodes d'analyses de sols et de plantes, équipement, Gestion de stocks de verrerie et de produits chimiques. Publications agricoles 28. AGCD. 265 p

Peterson HG. (1999). Water quality Fact Sheet: Irrigation and Salinity, Agriculture et Agroalimentaire Canada (http://www.agr.gc.ca/pfra/water/microirr_htm), 4p.

Pich A. and 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*, 47, 41–47

PNTTA (1999). Bulletin mensuel d'information et de liaison du PNTTA transfert de technologie en agriculture, Maroc. 4 p

Polese J.M. (2007). La culture de la tomate. Ed Artémis .95p.

Prasd K, Saradhi PP and Sharmila P (1999). Concerted action of antioxidant enzymes and curtailed growth under zinc toxicity in *Brassica juncea*. *Environmental and experimental Botany*, 42:1-10.

Publishers B. (2004). Ressources végétales de l'Afrique tropicale. Tome 2: Légumes. Ed. Dunod. 736p.

Puig S, Andres-Colas N, Garcia-Molina A and Penarrubia L (2007). Copper and iron homeostasis in Arabidopsis: response to metal deficiencies, interactions and biotechnological applications. *Plant Cell and Environment*, 30: 271–290

Quarili O, Boussama N, Zarrouk M, Cherif A and Ghorbal MH (1997). Cadmium and copper-induced changes in tomato membrane. *Phytochem.*45:1343-1350.

Raemaekers R. (2001). Agriculture en Afrique tropicale. DGIC, Bruxelles. 1634 p.

Redon P.O. (2009). Rôle de champignons mycorhiziens à arbuscules dans le transfert du cadmium (Cd) du sol à la luzerne (*Medicago truncatula*).Thèse doctorat. Université Nancy I en Sciences du Sol. France.198 p.

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, 54 p

Reuter DJ and Robinson JB (1997). Plant Analysis: an Interpretation Manual. CSIRO publishing, Australia. 572 p

Rey Y. et Costes C. (1965). La physiologie de la tomate, étude bibliographique. INRA .111p.

Robert M. and Juste C. (1999). Dynamique des éléments traces de l'écosystème sol. In Spéciation des métaux dans le sol, pp. 15–37, Les Cahiers des Clubs CRIN, (Eds), Paris.

Ruano A., Poschenrieder C.H. and Barcelo I. (1988). Growth and biomass partitioning in zinc toxic bush beans. *Journal of Plant Nutrient*, 11:577-588.

Sancenon V., Puig S., Mateu-Andres I., Dorcey E., Thiele DJ. and Penarrubia L. (2004). The Arabidopsis copper transporter COPT1 functions in root elongation and pollen development. *Journal of Biological Chemistry* 279, 15348–15355

Sbartai H., Djebbar M.R., Rouabhi R., Sbartai I. et Berrebbah H. (2011). Antioxidative Response in Tomato Plants *Lycopersicon esculentum L.* roots and leaves to Zinc. *American-Eurasian Journal of Toxicological Sciences* 3 (1): 41-46.

Sheldon A.R. and 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*, 278:341–349

Shrikrishna S. and Singh R. (1992). Effect of zinc on yield, nutrient uptake and quality of indian mustard. *J. Ind. Soc. Soil. Sci.*, 40: 321-325.

Sivasankar R., Kalaikandhan R. et Vijayarengan P. (2012). Phytoremediating capability of four plant species under zinc stress. *International Journal of Research in Environmental Science and technology* 2012; 2 (1): 1-9.

Sonmez S, Kaplan M, Sonmez NK, Kaya H and Uz I. (2006). High level of copper application to soil and leaves reduce the growth and yield of tomato plants. *Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)*, v.63, n.3, p.213-218

Sonmez S. (2007). Effect of copper applications to soil on growth and mineral contents of tomato plants. *Asian J. of Chem.* 19:2151-2160.

Teige M, Huchzermeyer B, Schultz G. (1990). Inhibition of chloroplast ATP senthase \ATP ase is a primary effect of heavy metal toxicity in spinach plants. *Biochemie und Physiologie der Pflanzen*, 186:165-168.

Templeton DM, Ariese F, Cornelis R, Danielsson LG, Muntau H, Van Leeuwen HP, Łobiński R. (2000). Guidelines for terms related to chemical speciation and fractionation of

elements. Definitions, structural aspects, and methodological approaches (IUPAC recommendations 2000). *Pure and Applied Chemistry*; 72: 1453-1470.

Tiller KG and Merry RH. (1981). Copper pollution of agricultural soils. In: Copper in soils and plants Eds Loneragan JF, Robson AD and Graham RD. *Academic Press*, pp. 25–45.

Toselli M., Baldi E., Marcolini G., Malaguti D., Quartieri M., Sorrenti G. and Marangoni B. (2009). Response of potted grapevines to increasing soil copper concentration. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 15, 85–92

Tremel-Schaub A. et Feix I. (2005). Contamination des sols : transferts des sols vers les plantes. EDP Sciences. 413 p.

United State Department of Agriculture (USDA) (1963). Composition of Foods. USDA Agricultural Handbook N° 7

Upadhyay Akhlesh Kumar (2012). Effect of sulphur and zinc on yield, uptake of nutrients and quality of mustard. *Ann. Pl. Soil Res* 14(1):42-45 (2012).

Ure AM, Davidson CM. (2007). Chemical speciation in soils and related materials by selective chemical extraction. In: Chemical Speciation in the Environment. Eds Ure AM, Davidson CM, Blackwell Science, London: 265-300.

US Salinity Laboratory Staff (1954). Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. U.S. Dept. Agric., Agric. Handb. 60

Vallee BL and Auld DS (1990). Zinc coordination, function, and structure of zinc enzymes and other proteins. *Biochemistry*, **29**, 5647–5659.

Van der Zaal BJ, Neuteboom LW, Pinas JE, Chardonens AN, Schat H, Verkleij JAC, Hooykaas PJJ. (1999). Over-expression of a novel *Arabidopsis* gene related to putative zinc-transporter genes from animals can lead to enhanced zinc resistance and accumulation. *Plant Phys.* 119:1047–1055.

Verolet J, Raffin R, Jagu L, Berry D. (2001). Tomato- Fiche technique en agriculture biologique, 9pp.

Vijayarengan P and Deepthy JM (2014). Changes in growth, pigments and phyto-remediating capability of four plant species under copper stress. *International Journal of Environmental Biology*; 4(2): 119-126.

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

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

Vitosh ML, Warncke DD, Lucas RE (1994). Secondary and micronutrients for vegetables and field crops. Michigan State University Extension, E-486, 18 p

Von Wirén N, Marschner H and Römheld V (1995). Uptake kinetics of iron-phytosiderophores in two maize genotypes differing in iron efficiency. *Physiologia Plantarum* 93, 611–616

W. H. O (2001). Environmental Health Criteria 221: ZINC. World Health Organization, Geneva, 360 p.

Wainwright SJ and Woolhouse HW (1977). Some physiological aspects of copper and zinc tolerance in *Agrostis tenuis* Sibth: Cell elongation and membrane damage. *Journal of Experimental Botany*, v.28, p.1029-1036

Walker CD and Webb J (1981). Copper in plants: forms and behaviour. In: Copper in soils and plants (Loneragan JF, Robson AD & Graham RD Eds). *Academic Press*, pp. 189-211.

Wang C, Zhang SH, Wang PF, Hou J, Zhang WJ, Li W, and Lin ZP. (2009). The effect of excess Zn on mineral nutrition and antioxidative response in rapeseed seedlings. *Chemosphere*; 75:1468–1476.

Weckx JEJ and Clijsters HMM. (1996). Oxidative damage and defense mechanism in primary leaves of *Phaseolus vulgaris* as result of root assimilation of toxic amounts of copper. *Physiol. Plant.*, 96: 506-512.

Weiss D.J., Rausch N., Mason T.F.D., Coles BJ, Wilkinson JJ, Ukonmaanaho L, Arnold T. and Nieminen TM. (2007). Atmospheric deposition and isotope biogeochemistry of zinc in ombrotrophic peat. *Geochim. Cosmochim. Acta* 71:3498–3517.

White P.J. and Broadley M.R. (2009). Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets – iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine. *New Phytol.* **182**, 49–84.

Wintz H, Fox T, Wu YY, Feng V, Chen W, Chang HS, Zhu T and Vulpe C. (2003). Expression profiles of *Arabidopsis thaliana* in mineral deficiencies reveal novel transporters involved in metal homeostasis. *J. Biol. Chem.* **27**, 47644-47653.

Woolhouse HW and Walkers S (1981). The physiological basis of copper toxicity and copper tolerance in higher plants. In: Copper in soils and plants (Loneragan JF, Robson AD & Graham RD Eds). *Academic Press*, pp. 235–262

Yruela I. (2009). copper in plants: acquisition, transport and interactions. *Funct. Plant Biol.* **36**, 409–430.

Zhao H., Wu L., Chai T., Zhang Y., Tan J. and Ma S. (2012). The effects of copper, manganese and zinc on plant growth and elemental accumulation in the manganese-hyperaccumulator *Phytolacca Americana*. *Journal of Plant Physiology* **169**: 1243–1252.

Zheng YB, Wang LP and Dixon M.A. (2004). Response to copper toxicity for three ornamental crops in solution culture. *Hort. Science* **39**:1116-1120.

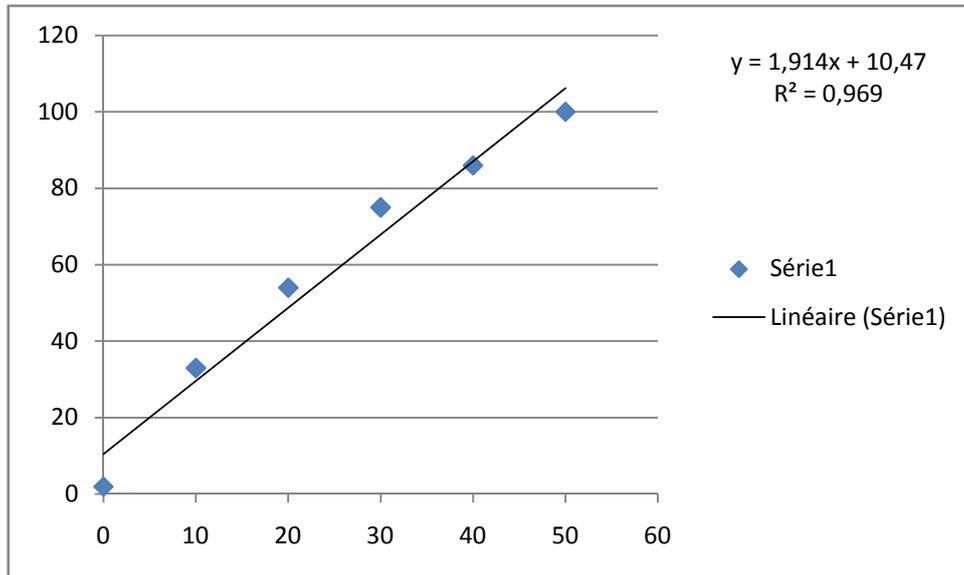
Zorrig W. (2010). Recherche et caractérisation de déterminants contrôlant l'accumulation de cadmium chez la laitue "*Lactuca sativa*". Thèse de doctorat. Université Montpellier II /SupAgro. 262 p.

Annexes

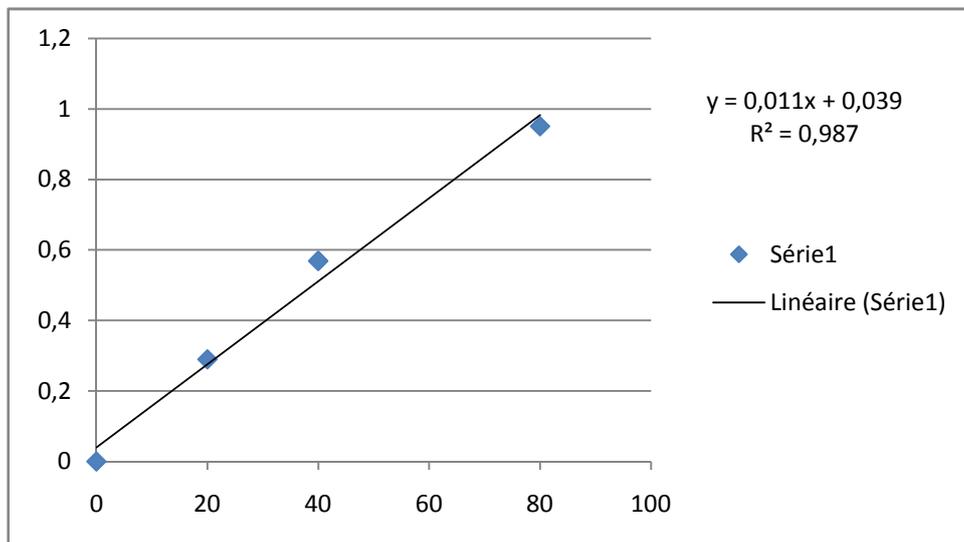
ANNEXES

Annexe 1 : Courbes d'étalonnages

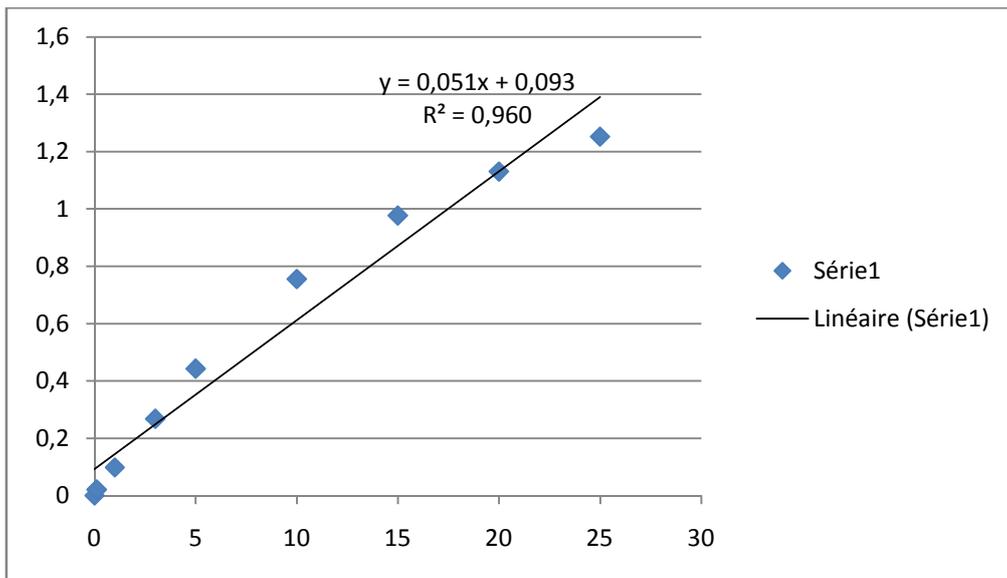
1-Potassium (K⁺)



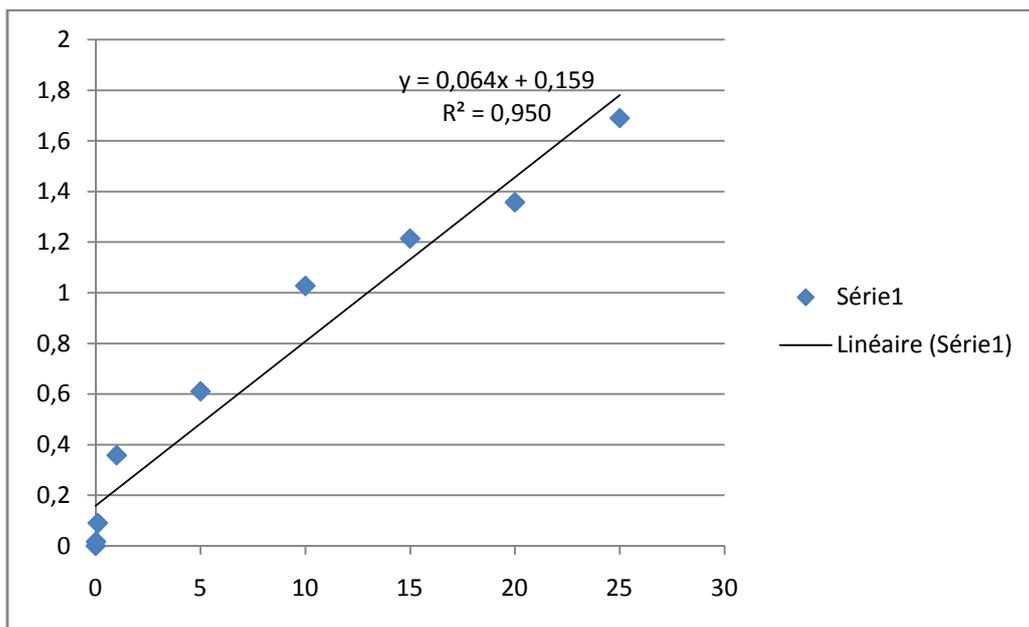
2-Phosphore (P)



3-Cuivre (Cu⁺⁺)



4-Zinc (Zn⁺⁺)



Annexe 2 : Analyse de la variance des paramètres étudiés (Stat Box 6.5).

1. L'effet d cuivre

-Biomasse fraîche de la partie aérienne

	S.C.E.	DDL	C.M.	TEST F	PROB	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	1015,831	20	50,792			4,418	9,84%
VAR.FACTEUR 1	732,21	6	122,035	6,252	0,00375		
VAR.BLOCS	49,383	2	24,691	1,265	0,31788		
VAR. RESIDUELLE 1	234,238	12	19,52				

-Biomasse fraîche de la partie racinaire

	S.C.E.	DDL	C.M.	TEST F	PROB	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	101,605	20	5,08			1,318	20,10%
VAR.FACTEUR 1	71,881	6	11,98	6,9	0,00251		
VAR.BLOCS	8,888	2	4,444	2,56	0,11736		
VAR. RESIDUELLE 1	20,836	12	1,736				

-Biomasse sèche de la partie aérienne

	S.C.E.	DDL	C.M.	TEST F	PROB	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	35,864	20	1,793			1,073	14,22%
VAR.FACTEUR 1	15,537	6	2,59	2,25	0,10906		
VAR.BLOCS	6,514	2	3,257	2,83	0,09727		
VAR. RESIDUELLE 1	13,812	12	1,151				

-Biomasse sèche de la partie racinaire

	S.C.E.	DDL	C.M.	TEST F	PROB	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	0,979	20	0,049			0,134	15,37%
VAR.FACTEUR 1	0,702	6	0,117	6,486	0,00323		
VAR.BLOCS	0,061	2	0,03	1,691	0,22462		
VAR. RESIDUELLE 1	0,216	12	0,018				

-Longueur racinaire

	S.C.E.	DDL	C.M.	TEST F	PROB	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	120,15	20	6,007			1,123	11,08%
VAR.FACTEUR 1	100,756	6	16,793	13,304	0,00014		
VAR.BLOCS	4,247	2	2,123	1,682	0,22624		
VAR. RESIDUELLE 1	15,147	12	1,262				

-Teneur en potassium

	S.C.E.	DDL	C.M.	TEST F	PROB	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	5,586	20	0,279			0,255	11,04%
VAR.FACTEUR 1	4,635	6	0,772	11,84	0,00024		
VAR.BLOCS	0,168	2	0,084	1,289	0,31143		
VAR. RESIDUELLE 1	0,783	12	0,065				

-Teneur en phosphore

	S.C.E.	DDL	C.M.	TEST F	PROB	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	0,025	20	0,001			0,019	10,59%
VAR.FACTEUR 1	0,019	6	0,003	8,794	0,0009		
VAR.BLOCS	0,002	2	0,001	2,563	0,11705		
VAR. RESIDUELLE 1	0,004	12	0				

-Teneur en cuivre dans la partie aérienne

	S.C.E.	DDL	C.M.	TEST F	PROB	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	84753,52	20	4237,676			50,899	22,28%
VAR.FACTEUR 1	48860,3	6	8143,383	3,143	0,04331		
VAR.BLOCS	4804,898	2	2402,449	0,927	0,42459		
VAR. RESIDUELLE 1	31088,33	12	2590,694				

-Teneur en cuivre dans la partie racinaire

	S.C.E.	DDL	C.M.	TEST F	PROB	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	2890393	20	144519,6			320,714	23,19%
VAR.FACTEUR 1	1466341	6	244390,1	2,376	0,09504		
VAR.BLOCS	189761	2	94880,5	0,922	0,42642		
VAR. RESIDUELLE 1	1234291	12	102857,6				

-Nombre de fruits

	S.C.E.	DDL	C.M.	TEST F	PROB	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	22,667	20	1,133			0,797	23,90%
VAR.FACTEUR 1	14,667	6	2,444	3,85	0,02261		
VAR.BLOCS	0,381	2	0,19	0,3	0,74931		
VAR. RESIDUELLE 1	7,619	12	0,635				

-Poids de fruits

	S.C.E.	DDL	C.M.	TEST F	PROB	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	1778,2	20	88,91			9,629	26,79%
VAR.FACTEUR 1	435,872	6	72,645	0,783	0,59992		
VAR.BLOCS	229,662	2	114,831	1,238	0,32504		
VAR. RESIDUELLE 1	1112,667	12	92,722				

-Hauteur des plantes : 1^{ère} semaine

	S.C.E.	DDL	C.M.	TEST F	PROB	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	28,81	20	1,44			0,929	6,03%
VAR.FACTEUR 1	5,143	6	0,857	0,993	0,47248		
VAR.BLOCS	13,31	2	6,655	7,71	0,0071		
VAR. RESIDUELLE 1	10,357	12	0,863				

-Hauteur des plantes : 2^{ème} semaine

	S.C.E.	DDL	C.M.	TEST F	PROB	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	40,286	20	2,014			1,364	7,92%
VAR.FACTEUR 1	4,452	6	0,742	0,399	0,86626		
VAR.BLOCS	13,5	2	6,75	3,627	0,05782		
VAR. RESIDUELLE 1	22,333	12	1,861				

-Hauteur des plantes : 3^{ème} semaine

	S.C.E.	DDL	C.M.	TEST F	PROB	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	54,786	20	2,739			1,342	6,78%
VAR.FACTEUR 1	5,952	6	0,992	0,551	0,76193		
VAR.BLOCS	27,214	2	13,607	7,553	0,0076		
VAR. RESIDUELLE 1	21,619	12	1,802				

-Hauteur des plantes : 4^{ème} semaine

	S.C.E.	DDL	C.M.	TEST F	PROB	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	78,452	20	3,923			2,068	9,24%
VAR.FACTEUR 1	4,119	6	0,687	0,161	0,98139		
VAR.BLOCS	23,024	2	11,512	2,692	0,10693		
VAR. RESIDUELLE 1	51,31	12	4,276				

-Hauteur des plantes : 5^{ème} semaine

	S.C.E.	DDL	C.M.	TEST F	PROB	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	92,31	20	4,615			2,287	9,37%
VAR.FACTEUR 1	8,31	6	1,385	0,265	0,94227		
VAR.BLOCS	21,238	2	10,619	2,03	0,17279		
VAR. RESIDUELLE 1	62,762	12	5,23				

-Hauteur des plantes : 6^{ème} semaine

	S.C.E.	DDL	C.M.	TEST F	PROB	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	86,238	20	4,312			2,472	9,05%
VAR.FACTEUR 1	3,905	6	0,651	0,107	0,99		
VAR.BLOCS	9,024	2	4,512	0,739	0,50193		
VAR. RESIDUELLE 1	73,31	12	6,109				

-Hauteur des plantes : 7^{ème} semaine

	S.C.E.	DDL	C.M.	TEST F	PROB	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	156,286	20	7,814			2,794	9,22%
VAR.FACTEUR 1	54,619	6	9,103	1,166	0,385		
VAR.BLOCS	8	2	4	0,512	0,61604		
VAR. RESIDUELLE 1	93,667	12	7,806				

-Hauteur des plantes : 8^{ème} semaine

	S.C.E.	DDL	C.M.	TEST F	PROB	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	172,571	20	8,629			2,437	7,47%
VAR.FACTEUR 1	92,071	6	15,345	2,583	0,07621		
VAR.BLOCS	9,214	2	4,607	0,776	0,48559		
VAR. RESIDUELLE 1	71,286	12	5,94				

-Hauteur des plantes : 9^{ème} semaine

	S.C.E.	DDL	C.M.	TEST F	PROB	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	331,81	20	16,59			2,86	8,19%
VAR.FACTEUR 1	205,476	6	34,246	4,186	0,01696		
VAR.BLOCS	28,167	2	14,083	1,722	0,21931		
VAR. RESIDUELLE 1	98,167	12	8,181				

-Hauteur des plantes : 10^{ème} semaine

	S.C.E.	DDL	C.M.	TEST F	PROB	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	451,81	20	22,59			3,11	8,58%
VAR.FACTEUR 1	296,476	6	49,413	5,107	0,00824		
VAR.BLOCS	39,238	2	19,619	2,028	0,17311		
VAR. RESIDUELLE 1	116,095	12	9,675				

-Hauteur des plantes : 11^{ème} semaine

	S.C.E.	DDL	C.M.	TEST F	PROB	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	415,571	20	20,779			2,962	7,87%
VAR.FACTEUR 1	260,905	6	43,484	4,955	0,00923		
VAR.BLOCS	49,357	2	24,679	2,812	0,09844		
VAR. RESIDUELLE 1	105,31	12	8,776				

-Hauteur des plantes : 12^{ème} semaine

	S.C.E.	DDL	C.M.	TEST F	PROB	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	435,31	20	21,765			3,065	7,81%
VAR.FACTEUR 1	275,81	6	45,968	4,892	0,00968		
VAR.BLOCS	46,738	2	23,369	2,487	0,12357		
VAR. RESIDUELLE 1	112,762	12	9,397				

-Hauteur des plantes : 13^{ème} semaine

	S.C.E.	DDL	C.M.	TEST F	PROB	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	447,738	20	22,387			2,94	7,29%
VAR.FACTEUR 1	299,571	6	49,929	5,777	0,00513		
VAR.BLOCS	44,452	2	22,226	2,572	0,11636		
VAR. RESIDUELLE 1	103,714	12	8,643				

-Hauteur des plantes : 14^{ème} semaine

	S.C.E.	DDL	C.M.	TEST F	PROB	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	468,81	20	23,44			3,067	7,41%
VAR.FACTEUR 1	302,976	6	50,496	5,368	0,00682		
VAR.BLOCS	52,952	2	26,476	2,815	0,09828		
VAR. RESIDUELLE 1	112,881	12	9,407				

2. L'effet du zinc

-Biomasse fraiche de la partie aérienne

	S.C.E.	DDL	C.M.	TEST F	PROB	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	335,7	14	23,979			2,7	7,43%
VAR.FACTEUR 1	268,409	4	67,102	9,204	0,00474		
VAR.BLOCS	8,969	2	4,485	0,615	0,568		
VAR. RESIDUELLE 1	58,322	8	7,29				

-Biomasse fraiche de la partie racinaire

	S.C.E.	DDL	C.M.	TEST F	PROB	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	47,769	14	3,412			1,496	16,96%
VAR.FACTEUR 1	23,706	4	5,927	2,648	0,1122		
VAR.BLOCS	6,157	2	3,079	1,375	0,30702		
VAR. RESIDUELLE 1	17,906	8	2,238				

-Biomasse sèche de la partie aérienne

	S.C.E.	DDL	C.M.	TEST F	PROB	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	18,353	14	1,311			1,132	16,15%
VAR.FACTEUR 1	7,91	4	1,977	1,543	0,27823		
VAR.BLOCS	0,191	2	0,096	0,075	0,92829		
VAR. RESIDUELLE 1	10,252	8	1,282				

-Biomasse sèche de la partie racinaire

	S.C.E.	DDL	C.M.	TEST F	PROB	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	0,68	14	0,049			0,192	18,90%
VAR.FACTEUR 1	0,302	4	0,076	2,038	0,18132		
VAR.BLOCS	0,081	2	0,041	1,094	0,38183		
VAR. RESIDUELLE 1	0,296	8	0,037				

-Longueur racinaire

	S.C.E.	DDL	C.M.	TEST F	PROB	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	35,1	14	2,507			1,196	9,96%
VAR.FACTEUR 1	23,013	4	5,753	4,025	0,04482		
VAR.BLOCS	0,652	2	0,326	0,228	0,80244		
VAR. RESIDUELLE 1	11,435	8	1,429				

-Teneur en potassium

	S.C.E.	DDL	C.M.	TEST F	PROB	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	1,172	14	0,084				
VAR.FACTEUR 1	0,845	4	0,211	7,813	0,00766		
VAR.BLOCS	0,11	2	0,055	2,032	0,1926		
VAR. RESIDUELLE 1	0,216	8	0,027			0,164	3,80%

-Teneur en phosphore

	S.C.E.	DDL	C.M.	TEST F	PROB	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	0,008	14	0,001				
VAR.FACTEUR 1	0,004	4	0,001	2,077	0,17559		
VAR.BLOCS	0,001	2	0	0,517	0,61904		
VAR. RESIDUELLE 1	0,004	8	0			0,022	13,31%

-Teneur en cuivre dans la partie aérienne

	S.C.E.	DDL	C.M.	TEST F	PROB	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	1152626	14	82330,43				
VAR.FACTEUR 1	1118508	4	279627	71,163	0,00001		
VAR.BLOCS	2683	2	1341,5	0,341	0,72366		
VAR. RESIDUELLE 1	31435	8	3929,375			62,685	7,13%

-Teneur en cuivre dans la partie racinaire

	S.C.E.	DDL	C.M.	TEST F	PROB	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	581096,9	14	41506,93				
VAR.FACTEUR 1	276941,7	4	69235,41	1,922	0,19981		
VAR.BLOCS	15978,94	2	7989,469	0,222	0,80711		
VAR. RESIDUELLE 1	288176,3	8	36022,04			189,795	15,43%

-Nombre de fruits

	S.C.E.	DDL	C.M.	TEST F	PROB	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	24,933	14	1,781				
VAR.FACTEUR 1	10,267	4	2,567	1,949	0,19525		
VAR.BLOCS	4,133	2	2,067	1,57	0,26595		
VAR. RESIDUELLE 1	10,533	8	1,317			1,147	35,13%

-Poids de fruits

	S.C.E.	DDL	C.M.	TEST F	PROB	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	1298,734	14	92,767				
VAR.FACTEUR 1	95,366	4	23,842	0,431	0,78438		
VAR.BLOCS	760,394	2	380,197	6,866	0,01851		
VAR. RESIDUELLE 1	442,974	8	55,372			7,441	20,35%

-Hauteur des plantes : 1^{ère} semaine

	S.C.E.	DDL	C.M.	TEST F	PROB	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	125,933	14	8,995			1,352	5,94%
VAR.FACTEUR 1	4,267	4	1,067	0,583	0,68541		
VAR.BLOCS	107,033	2	53,517	29,257	0,00029		
VAR. RESIDUELLE 1	14,633	8	1,829				

-Hauteur des plantes : 2^{ème} semaine

	S.C.E.	DDL	C.M.	TEST F	PROB	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	91,4	14	6,529			1,377	5,67%
VAR.FACTEUR 1	6,233	4	1,558	0,822	0,54747		
VAR.BLOCS	70	2	35	18,462	0,00117		
VAR. RESIDUELLE 1	15,167	8	1,896				

-Hauteur des plantes : 3^{ème} semaine

	S.C.E.	DDL	C.M.	TEST F	PROB	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	97,9	14	6,993			1,518	5,69%
VAR.FACTEUR 1	17,567	4	4,392	1,906	0,20255		
VAR.BLOCS	61,9	2	30,95	13,432	0,00301		
VAR. RESIDUELLE 1	18,433	8	2,304				

-Hauteur des plantes : 4^{ème} semaine

	S.C.E.	DDL	C.M.	TEST F	PROB	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	143,733	14	10,267			2,668	9,19%
VAR.FACTEUR 1	27,067	4	6,767	0,951	0,48392		
VAR.BLOCS	59,733	2	29,867	4,197	0,05633		
VAR. RESIDUELLE 1	56,933	8	7,117				

-Hauteur des plantes : 5^{ème} semaine

	S.C.E.	DDL	C.M.	TEST F	PROB	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	160,933	14	11,495			2,838	8,71%
VAR.FACTEUR 1	52,267	4	13,067	1,622	0,25916		
VAR.BLOCS	44,233	2	22,117	2,746	0,12276		
VAR. RESIDUELLE 1	64,433	8	8,054				

-Hauteur des plantes : 6^{ème} semaine

	S.C.E.	DDL	C.M.	TEST F	PROB	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	180,433	14	12,888			2,536	7,26%
VAR.FACTEUR 1	86,767	4	21,692	3,374	0,06742		
VAR.BLOCS	42,233	2	21,117	3,285	0,09021		
VAR. RESIDUELLE 1	51,433	8	6,429				

-Hauteur des plantes : 7^{ème} semaine

	S.C.E.	DDL	C.M.	TEST F	PROB	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	154,4	14	11,029			2,196	5,98%
VAR.FACTEUR 1	73,733	4	18,433	3,824	0,05063		
VAR.BLOCS	42,1	2	21,05	4,366	0,05192		
VAR. RESIDUELLE 1	38,567	8	4,821				

-Hauteur des plantes : 8^{ème} semaine

	S.C.E.	DDL	C.M.	TEST F	PROB	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	176,333	14	12,595			2,577	6,67%
VAR.FACTEUR 1	56,167	4	14,042	2,114	0,17028		
VAR.BLOCS	67,033	2	33,517	5,046	0,03809		
VAR. RESIDUELLE 1	53,133	8	6,642				

-Hauteur des plantes : 9^{ème} semaine

	S.C.E.	DDL	C.M.	TEST F	PROB	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	206,1	14	14,721			2,469	6,19%
VAR.FACTEUR 1	96,933	4	24,233	3,975	0,04618		
VAR.BLOCS	60,4	2	30,2	4,954	0,03966		
VAR. RESIDUELLE 1	48,767	8	6,096				

-Hauteur des plantes : 10^{ème} semaine

	S.C.E.	DDL	C.M.	TEST F	PROB	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	215,233	14	15,374			2,14	5,20%
VAR.FACTEUR 1	112,567	4	28,142	6,146	0,01506		
VAR.BLOCS	66,033	2	33,017	7,21	0,01639		
VAR. RESIDUELLE 1	36,633	8	4,579				

-Hauteur des plantes : 11^{ème} semaine

	S.C.E.	DDL	C.M.	TEST F	PROB	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	240,233	14	17,16			2,204	5,24%
VAR.FACTEUR 1	143,733	4	35,933	7,396	0,00896		
VAR.BLOCS	57,633	2	28,817	5,931	0,02635		
VAR. RESIDUELLE 1	38,867	8	4,858				

-Hauteur des plantes : 12^{ème} semaine

	S.C.E.	DDL	C.M.	TEST F	PROB	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	232,1	14	16,579			2,23	5,20%
VAR.FACTEUR 1	133,433	4	33,358	6,711	0,0118		
VAR.BLOCS	58,9	2	29,45	5,925	0,02642		
VAR. RESIDUELLE 1	39,767	8	4,971				

-Hauteur des plantes : 13^{ème} semaine

	S.C.E.	DDL	C.M.	TEST F	PROB	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	228,4	14	16,314				
VAR.FACTEUR 1	127,733	4	31,933	6,102	0,01536		
VAR.BLOCS	58,8	2	29,4	5,618	0,0299		
VAR. RESIDUELLE 1	41,867	8	5,233			2,288	5,30%

-Hauteur des plantes : 14^{ème} semaine

	S.C.E.	DDL	C.M.	TEST F	PROB	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	243,1	14	17,364				
VAR.FACTEUR 1	140,767	4	35,192	7,213	0,00963		
VAR.BLOCS	63,3	2	31,65	6,487	0,02128		
VAR. RESIDUELLE 1	39,033	8	4,879			2,209	5,07%

Annexe 3 : Matrices de corrélations (Corrélation de Pearson)

-Corrélation entre le cuivre et les paramètres étudiés.

	Cuivre	BFA	BFR	BSA	BSR	LR	K	P	Cu-PA	Cu-PR	NF	PF	Hauteur
Cuivre	1												
BFA	-0,30	1											
BFR	-0,68	0,69	1										
BSA	-0,45	0,85	0,79	1									
BSR	-0,79	0,61	0,91	0,76	1								
LR	-0,77	0,63	0,94	0,71	0,95	1							
K	-0,57	0,18	0,52	0,29	0,56	0,58	1						
P	-0,74	0,38	0,74	0,43	0,67	0,77	0,44	1					
Cu-PA	0,39	-0,01	-0,25	-0,30	-0,27	-0,23	-0,30	-0,26	1				
Cu-PR	0,58	-0,18	-0,66	-0,45	-0,72	-0,65	-0,62	-0,48	0,53	1			
NF	-0,05	0,64	0,28	0,49	0,18	0,31	0,24	0,17	-0,20	0,03	1		
PF	-0,34	0,09	-0,06	0,01	0,08	0,10	0,05	0,37	-0,14	0,13	0,34	1	
Hauteur	-0,30	0,71	0,43	0,49	0,44	0,49	0,02	0,28	0,04	-0,08	0,38	0,07	1

En gras, valeurs significatives (hors diagonale) au seuil $\alpha=0,05$ (test bilatéral).

-Corrélation entre le zinc et les paramètres étudiés.

	Zinc	BFA	BFR	BSA	BSR	LR	K	P	Zn-PA	Zn-PR	NF	PF	Hauteur
Zinc	1												
BFA	0,34	1											
BFR	0,44	0,60	1										
BSA	0,29	0,67	0,67	1									
BSR	0,28	0,60	0,93	0,74	1								
LR	-0,12	0,54	0,53	0,33	0,65	1							
K	-0,02	0,69	0,58	0,59	0,62	0,38	1						
P	0,07	0,55	0,19	0,35	0,35	0,57	0,30	1					
Zn-PA	0,87	0,40	0,60	0,36	0,46	0,18	0,06	0,22	1				
Zn-PR	0,57	0,12	0,09	0,04	-0,02	-0,14	-0,03	0,08	0,72	1			
NF	0,37	-0,39	-0,31	-0,26	-0,33	-0,46	-0,50	-0,18	0,29	0,49	1		
PF	0,15	-0,19	-0,48	-0,09	-0,43	-0,36	-0,38	0,05	0,09	0,43	0,82	1	
Hauteur	0,11	0,64	0,41	0,43	0,46	0,65	0,37	0,66	0,35	0,26	0,02	0,25	1

En gras, valeurs significatives (hors diagonale) au seuil $\alpha=0,05$ (test bilatéral).

Annexe 4 : Le calcul de la dose d'irrigation et des engrais

-Calcul de la dose d'irrigation :

Capacité de rétention	La réserve facilement utilisable	Dose d'irrigation
2400 ml	1000 ml	1000 ml

L'irrigation est à la réserve facilement utilisable (RFU), c'est-à-dire 40 % de la capacité de rétention à cause de la texture légère du mélange (50 % du volume est sable).

-Le poids des constituants du substrat :

Le volume du pot est 8,33 L donc : V sable= 4,17 L, V sol= 2,08 L, V fumier= 2,08

On a $P = V * Da$, Alors : P sable= 4,17*1,6= 6,67 kg, P sol= 2,08*1,1= 2,29 kg,

P fumier= 2,08*0,5= 1,04 kg

-Calcul de la dose des engrais :

Le substrat se compose d'un mélange (en volume) de 50 % du sable avec 25 % du sol et 25 % de la fumure organique, alors sa densité apparente Da sera :

$$\begin{aligned} Da \text{ de mélange} &= \frac{(Da \text{ du sable} * 50) + (Da \text{ de fumure organique} * 25) + (Da \text{ du sol} * 25)}{100} \\ &= \frac{(1,5 * 50) + (0,5 * 25) + (1,1 * 25)}{100} \end{aligned}$$

$Da \text{ de mélange} = 1,2 \text{ g/cm}^3$

Le poids du sol d'un hectare = la densité apparente de ce sol * la profondeur * la superficie d'un hectare, donc :

$$\begin{aligned} \text{Le poids d'un hectare} &= 1,2 \text{ g/cm}^3 * 25 \text{ cm} * 10000 \text{ m}^2 \\ &= 1200 \text{ Kg/m}^3 * 0,25 \text{ m} * 10000 \text{ m}^2 \\ &= 3000000 \text{ Kg} = 3000 \text{ tonnes} \end{aligned}$$

-Pour une dose d'engrais de 10 Qtx/ha de NPK 15-15-15:

$$1000 \text{ Kg de NPK 15-15-15} \rightarrow 3000 * 10^3 \text{ Kg du sol}$$

$$X \rightarrow 10 \text{ Kg du sol/pot, alors } X = 3,33 \text{ g de NPK à chaque pot.}$$

-L'engrais azoté utilisé en couverture est l'urée N= 46 %

$$100 \text{ Kg/ha d'urée} \rightarrow 46 \text{ Kg de N}$$

$$U \rightarrow 180 \text{ Kg de N, alors } U = 391,3 \text{ Kg/ha d'urée}$$

Donc 391,3 Kg/ha d'urée $\rightarrow 3000 * 10^3$ Kg du sol

U $\rightarrow 10$ Kg du sol/pot, alors U= 1,29 g/pot d'urée

-L'engrais potassique utilisé en couverture est le sulfate de potasse K= 50 % :

100 Kg/ha de sulfate de potasse $\rightarrow 50$ Kg de K

Y $\rightarrow 300$ Kg de K, alors Y= 600 Kg/ha de sulfate de potasse

Donc 600 Kg/ha de sulfate de potasse $\rightarrow 3000 * 10^3$ Kg du sol

Z $\rightarrow 10$ Kg du sol/pot, alors Z= 2,01 g/pot de sulfate de potasse

Résumé

L'objectif de notre travail est d'étudier séparément l'influence du cuivre et du zinc sous forme des sulfates CuSO_4 et ZnSO_4 à des doses de 0, 50, 100, 200, 300, 400, 500, 1000 et 2000 ppm, sur le comportement chimique, morphologique et biométrique des plants de tomate *Lycopersicon esculentum* Mill. L'application du cuivre et du zinc a été effectuée durant tout le cycle physiologique de la plante. Cette étude a permis de dégager les points suivants :

L'étude de l'effet des métaux lourds (cuivre et zinc) sur la hauteur des plantes, a révélé qu'ils exercent une stimulation de la croissance jusqu'à des doses entre 300 et 400 ppm, mais une application supérieure à ces niveaux entraîne un ralentissement de croissance en hauteur dans le cas du cuivre et cause la mort dans le cas du zinc. L'élongation des racines est très sensible à l'augmentation de cuivre et diminue dans les doses 300, 400 et 500 ppm, cependant le zinc à la concentration 200 ppm stimule l'élaboration de la longueur des racines.

L'action de ces deux métaux est fertilisante jusqu'à une dose de 200 ppm, améliorant la production de la matière fraîche et sèche notamment celle de la partie aérienne. Au dessus de cette dose l'effet de Cu et de Zn devient négatif et détrimement surtout sur les racines ou encore cause la mort.

Concernant les paramètres chimiques, l'accumulation des deux métaux dans chacun des parties aérienne et racinaire de la plante augmente au fur et à mesure que leur grandeur augmente dans le substrat. On peut dire aussi que l'application de Cu est un antagoniste de P et K à n'importe quelle dose. Par contre, l'application du zinc agit un peu positivement sur la teneur en K et en P et vise à améliorer leur absorption.

La réponse de la production de fruits par la plante sous l'apport cuprique se manifeste d'abord par l'élévation du nombre produit chez la dose de 200 ppm, ensuite on a une chute du rendement provoquée par le traitement 500 ppm du cuivre. À l'inverse, le poids de fruits n'est pas varié significativement par la présence ni du cuivre ni du zinc.

Mots clés: *Lycopersicon esculentum* Mill., cuivre, zinc, paramètres chimiques, paramètres morphologiques, paramètres biométriques.

Abstract

The objective of our work is to study separately the influence of copper and zinc as sulfates CuSO_4 and ZnSO_4 at doses of 0, 50, 100, 200, 300, 400, 500, 1000 et 2000ppm, on the chemical, morphological and biometrical behavior of tomato plants *Lycopersicon esculentum* Mill. Copper and zinc application was carried out during all the physiologic cycle of the plant. This study permitted to extract the following points:

The study of the heavy metals effect (Copper and Zinc) on plant height revealed that they exert growth stimulation up to doses between 300 and 400ppm, but an application over these levels induces growth relenting of plant height in case of copper and cause the death in case of zinc. Roots elongation is very sensitive to copper augmentation and decreased at doses 300, 400 and 500ppm, therefore zinc at concentration 200ppm enhanced root length elaboration.

The action of the two metals is a fertilizer up to the dose of 200ppm, ameliorating the fresh and the dry matter production particularly that of shoot. Over this dose the effect of Cu and Zn became negative and detrimental especially on the roots or also cause the death.

Concerning chemical parameters, the two metals accumulation in everyone of plant shoot and root increased in rate and measure that their concentration increased in the substratum. It can be said else that Cu application is an antagonist of P and K absorption at any dose. In contrast, Zn application affected positively the K and P content and vise to ameliorate their absorption.

The response of fruits production by plants under cupric application manifested first by elevation of the number product at dose 200ppm, and then there was a yield failure allowed by 500ppm copper treatment. At inverse, fruits weight did not vary significantly by copper or zinc presence.

Keywords: tomato, copper, zinc, chemical parameters, morphological parameters, biometrical parameters.

ملخص

إن الهدف من عملنا هو دراسة تأثير النحاس والزنك كل على حدة على شكل $ZnSO_4$ و $CuSO_4$ بتركيزات مختلفة 0، 50، 100، 200، 300، 400، 500، 1000 و 2000 ج.م.م على السلوك الكيميائي، المورفولوجي و البيومترى لنبات الطماطم. المعالجة بالنحاس والزنك نفذ أثناء كل الدورة الفسيولوجية للنبات. سمحت هذه الدراسة باستخراج النقاط التالية:

دراسة تأثير المعادن الثقيلة (النحاس والزنك) على طول النباتات استخلصت بأنهما يحفزان النمو بتركيز بين 300 و 400 ج.م.م، لكن تركيزا أعلى من ذلك يسبب نقص في النمو الطولي في حالة النحاس و الموت في حالة الزنك. إن استطالة الجذور كانت أكثر حساسية مع ارتفاع نسبة النحاس وتنقص عند التركيزات 300، 400، 500 ج.م.م، في حين أن الزنك عند التركيز 200 ج.م.م. يحفز نمو الجذور

إن تأثير كل من المعدنين يكون مثل السماد إلى غاية التركيز 200 ج.م.م، حيث أنه يحسن إنتاج المادة الطازجة والجافة وخاصة الجزء الهوائي للنبات. أكبر من هذا التركيز يصبح تأثير النحاس و الزنك سلبي وضار خاصة بالنسبة للجذور أو يسبب الموت أيضا.

بخصوص المعايير الكيميائية، لقد زاد تراكم المعدنين في كل من جزئي النبات الهوائي و الجذري مع زيادة تركيزهما في وسط الزرع. يمكن القول أيضا أن المعالجة بالنحاس عامل مضاد لامتصاص الفسفور و البوتاسيوم مهما كان التركيز. على العكس، الزنك يؤثر نوعا ما إيجابا على نسبة البوتاسيوم و الفسفور و يؤدي إلى تحسين امتصاصهما.

استجابة إنتاج الثمار بواسطة النبتة تبعا لإضافة النحاس ظهر أولا بارتفاع عدد الثمار المنتجة عند التركيز 200 ج.م.م، فيما بعد هناك انخفاض للإنتاج تسببت فيه المعالجة بواسطة 500 ج.م.م. على العكس، وزن الثمار لم يتغير فعليا لا بوجود النحاس و لا الزنك.

الكلمات المفتاحية: الطماطم، النحاس، الزنك، المعايير الكيميائية، المعايير المورفولوجية، المعايير البيومترية