

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLICUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة عبد الحميد بن باديس _
Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem

مستغانم

كلية علوم الطبيعة و الحياة

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie.

قسم البيولوجيا Département de Biologie

Mémoire présenté en vue de l'obtention du :

Diplôme de Master

Option

«Phytotechnologie appliquée aux sols pollués»

Présenté par :



MEDJAHED Wahiba

TIUORIRI Amina

Intitulé :

Effet du cuivre sur les paramètres morphologiques et la mobilité des éléments minéraux (sodium, potassium et calcium) chez la fève (*Vicia faba. L.*)

Laboratoire de biodiversité et conservation des eaux et des sols, université de Mostaganem.

Soutenue devant le jury:

<i>Nom et prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Appartenance administrative</i>
<i>NOURI Tayeb</i>	<i>MAA</i>	<i>Président</i>	<i>Centre Universitaire de Naama</i>
<i>BENOUIS Slimane</i>	<i>MAA</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Centre de recherches scientifiques et techniques sur les régions Arides de Biskra</i>
<i>BESSAFI Laïd</i>	<i>MAA</i>	<i>Examineur</i>	<i>U. Ibn Badis Mostaganem</i>

Année universitaire : 2015-2016

DEDICACE

Je dédie ce travail

*A la perle rare et précieuse, à ma source d'amour et d'affection, qui pense et prie tous les jours pour moi, à toi **maman**.*

Je leur devrai de les aimer encore plus, quoi que rien ne puisse égaler leur amour, leur tendresse et leur encouragement. Que dieu les gardent pour moi en bonne santé

A mon aimable sœur KAMLA qui ma procuré le réconfort et l'immense soutien par sa tendresse et amour.

A ma sœur ZOUBIDA, pour sa disponibilité aux moments les plus critiques et ses sacrifices faits de bon cœur afin que ce travail soit achever.

A ma grande mère MOKHTARIA et ma deuxième mère NACIRA et mon frère MECHRI "papi".

A mes frères MOUMEN, ABD AL KADAR et MEAMER en témoignage de mon affection.

A mes sœurs FATIHA, YAMINA, HOUDA, HABIBA, RAWDA, MOKHTARIA et ZOUBIDA.

A toute ma grande famille oncles, tantes, cousins, cousines.

-❧* LISTE DES TABLEAUX *❧-

Tableau 01: Propriété physico-chimique du substrat utilisé.....	15
Tableau 02 : probabilité « <i>p</i> » de l'analyse de la variance des paramètres morphologiques.....	22
Tableau 03: Variation de la longueur des tiges (Cm) en fonction de différentes doses du cuivre (ppm).....	22
Tableau 04: Variation de nombre des folioles en fonction de différentes doses du cuivre (ppm).....	23
Tableau 05 : Variation du volume racinaire (ml) en fonction de différentes doses du cuivre (ppm).....	24
Tableau 06: Variation de la longueur racinaire (cm) en fonction des différentes doses du cuivre (ppm).....	25
Tableau 07 : probabilité « <i>p</i> » de l'analyse de la variance des paramètres chimiques.....	27
Tableau 08 : Teneur de Sodium (ppm) dans les racines en fonction des doses de cuivre (ppm).....	28
Tableau 09 : Teneur de Sodium (ppm) dans les tiges en fonction des doses de cuivre. (ppm).....	29
Tableau 10 : Teneur de sodium (ppm) dans les feuilles en fonction des doses de cuivre. (ppm).....	30
Tableau 11 : Teneur en potassium en (ppm) dans les racines en fonction des doses cuivre (ppm).....	31
Tableau 12 : Teneur de potassium (ppm) dans les tiges en fonction des doses de cuivre (ppm).....	32
Tableau 13 : Teneur de potassium (ppm) dans les feuilles en fonction des doses de cuivre (ppm).....	33
Tableau 14 : Teneur en calcium (ppm) dans les racines en fonction des doses de cuivre.(ppm).....	35
Tableau 15: Teneur en Calcium (ppm) dans les tiges en fonction des doses de cuivre ppm).....	36
Tableau 16 : Teneur de calcium (ppm) dans les feuilles en fonction du des doses cuivre (ppm).....	37

-∞* LISTE DES FIGURES *∞

Figure1 : Courbe de croissance en réponse au statut nutritionnel de la plante (Reuter et Robinson, 1997).....	5
Figure 2 : Voies suivies pour l'absorption de l'eau et des sels minéraux dans les différents tissus de la racine (Lydie, 2014).....	10
Figure 3 : les différentes parties de la fève <i>Vicia faba L</i> (Thomé1885).....	12
Figure 4 : La Germination des graines de la fève <i>Vicia faba L</i>	14
Figure 5 : application du stress métallique.....	16.
Figure 6 : Le repiquage des graines germées de <i>Vicia faba L</i>	17
Figure 7 : Dispositif expérimental adopté à la serre.....	18
Figure 8 : Mesure de volume racinaire de <i>Vicia faba L</i>	19.
Figure 9 : Conduite expérimentale.....	21
Figure 10 : L'évolution des moyennes de la longueur des tiges (cm) en fonction des doses du cuivre (ppm).....	23
Figure 11 : Evolution de nombre des folioles en fonction des doses du cuivre (ppm).....	24
Figure 12 : Evolution du volume racinaire (ml) en fonction des doses du cuivre (ppm).....	25.
Figure 13 : Evolution de la longueur racinaire (cm) en fonction des doses du cuivre (ppm).....	26.
Figure 14 : l'évolution des moyennes du teneur de Sodium (ppm) dans les racines en fonction des doses du cuivre.....	28.
Figure 15 : l'évolution des moyennes du teneur de sodium (ppm) dans les tiges en fonction des doses du cuivre (ppm).....	29
Figure 16 : l'évolution des moyennes du teneur en sodium (ppm) dans les feuilles en fonction de la dose du cuivre (ppm).....	30
Figure 17 : l'évolution des moyennes du teneur en potassium (ppm) dans les racines en fonction de la dose du cuivre.....	31

Figure 18 : l'évolution des moyennes du teneur en potassium dans les tiges en fonction de la dose du cuivre.....32

Figure 19 : l'évolution des moyennes du teneur en potassium (ppm) dans les feuilles en fonction des doses du cuivre (ppm).....34

□ * TABLE DES MATIERES * □-

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Partie I : REVUE BIBLIOGRAPHIE

INTRODUCTION.....1

Chapitre I : Le cuivre comme polluant environnemental

I. 1 Généralité sur le cuivre.....	3
I .2. Le cuivre dans le sol.....	3
I .3. Niveaux de contamination dans le sol.....	4
I .4. Le cuivre dans la plante.....	4
I .4. 1. Le rôle physiologique du cuivre	5
I .4 .2. Absorption du cuivre.....	5
I .4 .3. Translocation du cuivre.....	6
I .5 .La plante et le stress.....	6
I .6. Le cuivre entre la carence et la phytotoxicité.....	6
I .6 .1. La phytotoxicité.....	6
I .6 .2. La carence	7
I .7. Les mécanismes de tolérance chez les végétaux.....	7

Chapitre II : La mobilité des éléments minéraux

II. 1. Généralité.....	8
II. 2. Les éléments minéraux et leurs fonctions	8
II 2.2. Le potassium	8
II. 2.3. Le calcium	9
II .3. Transport des éléments minéraux.....	9
II .3.1. Transport des ions à travers la membrane.....	9
II .3.2. Transport radial dans la racine.....	9.
II. 2.1. Le sodium	9
II .3.3. Transport axial vers les parties aériennes.....	10

Chapitre III : La fève (*Vicia faba* L) .

III.1. Généralité sur les légumineuses.....	11
III.2. La fève <i>Vicia faba</i> L.....	11
III.3. Aspects et particularités.....	11
III.4. Origine de <i>Vicia faba</i> L.....	12
III.5. Classification systématique	12
III. 6. Exigence de la culture de la fève.....	13
III .7. Intérêt en écotoxicologie.....	13

Partie II : MATERIEL ET METHODES

I. Le Matériel végétal.....	14
II. Méthodes.....	14
1. La germination.....	14
2. Préparation de substrat de culture.....	15
3. Calcul de poids secs du sol.....	15
4. Application du stress métallique.....	15
5. Dispositif expérimentale.....	16
6. Prélèvement des échantillons.....	17
7. Techniques d'analyse.....	18
A. Les paramètres morphologiques.....	18
a. Caractères morphologiques aériens.....	18
b. Caractères morphologiques racinaires.....	18
B. Les paramètres chimiques.....	19
a- Extraction des éléments minéraux.....	19.
b. dosage des éléments minéraux Na, K, .Ca.....	19.
8. Etude statistique	20

CHAPITRE IV : RESULTATS et DISCUSSION

- Discussion.....	22
Conclusion	38

Références bibliographiques

Annexes

Introduction

La pollution de l'environnement par les éléments métalliques a augmenté durant les dernières décennies ; les sources d'émission métalliques sont très nombreuses et difficiles à limiter. Les plus importantes sont d'origine anthropique (**D.Souguir et al, 2009**) ; 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 transfert dans la chaîne alimentaire par l'intermédiaire des animaux et plus encore des végétaux (**Adriano, 2001**).

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 20ème siècle entraînant des effets toxiques chez les êtres vivants et perturbant le bon fonctionnement des écosystèmes (**Nriagu et Pacyna, 1988**).

Parmi les éléments métalliques, certains sont des oligo-éléments indispensables à la croissance des plantes comme le Cuivre, mais deviennent toxique à fortes concentrations ; la phytotoxicité par ce métal engendre l'inhibition de la croissance des racines et entraîne une diminution de la biomasse aérienne des plantes. (**Vinit-Dunand et al, 2002**). Il perturbe l'homéostasie de façon indirecte en modifiant la perméabilité et l'intégrité membranaire et l'action des canaux et transporteurs de façon directe, il modifie les besoins de la plante ou entre en compétition avec d'autres ions ; en se liant avec des protéines, des groupements carboxyles et membranaires ou en induisant la peroxydation de leurs lipides et perturbe l'intégrité des membranes, l'entrée et la sortie des ions (**Cuypers, 2000**).

En Algérie, la fève reste la plus importante culture vivrière, couvrant une surface de 58000 hectares avec un rendement total de 254000 tonnes ; elle occupe la première place parmi les légumineuses en Algérie en raison de sa valeur nutritionnelle élevée et de ses divers usages. Elle est principalement cultivée dans les plaines et les régions sublittoral ; elle a un rôle important dans l'économie nationale et dans la production agricole (**Aouar-Sadli et al, 2008**).

Introduction

Dans ce cadre s'inscrit notre travail dont l'objectif majeur est de suivre le comportement de la fève *Vicia faba L* face au stress métallique induit par le cuivre ; en évaluant les paramètres morphologiques et l'effet de ce stress sur la concentration des éléments minéraux (sodium, potassium et calcium) dans les différents organes de la fève (Feuilles, tige et racine).

Notre travail a été réalisé en trois parties : La première présente la synthèse bibliographique ; la seconde est consacrée au protocole expérimental et la dernière partie regroupe les résultats obtenus ainsi que leurs discussions.

I.1. Généralité sur le cuivre

Le cuivre (Cu) est le premier minéral extrait dans le monde (**LME, 2008**). Il se présente sous forme des sels présents dans l'écorce terrestre.

Les sources de contamination des écosystèmes par le Cu ont trois principales origines : industrielle, agricole et domestique. Pour l'industrie, les activités sont surtout l'industrie métallurgique et minière, les lessivages des produits de protection du bois et du cuir, pour l'agriculture, ce sont les épandages de lisier, le cuivre étant utilisé comme additif alimentaire dans les élevages et l'utilisation de fertilisants, de fongicides et de bactéricides. Pour les sources domestiques, ce sont les épandages de boues de stations d'épuration ou la fertilisation organique avec des composts de déchets verts, d'ordures ménagères... (**Chen et al, 2005**) et par conséquent le sol est le milieu environnemental le plus exposé au cuivre ou se trouve 97% du cuivre libéré dans l'environnement contre seulement environ 3% dans les eaux et 0.04% dans l'air (**Jean-Claude Amiard, 2011**).

I.2. Le cuivre dans le sol

Dans les sols bien aérés, le cuivre est généralement disponible pour la plante sous la forme de l'ion bivalent Cu^{+2} ; forme facilement des chélats avec les acides humiques dans la fraction organique du sol (**Charles-Marie Evrard, 2003**).

Pour de nombreux auteurs, la biodisponibilité de Cu dans les sols est simplement définie comme la potentialité de Cu à être absorbé par une plante (**Thornton, 1999**).

Les variations des conditions physico-chimiques du milieu (pH, Eh, CEC, concentrations ioniques) gouvernent les multiples réactions d'adsorption/désorption, de précipitation/dissolution et d'oxydation/réduction qui contrôlent le devenir de Cu et par conséquent sa mobilité qui peut être définie comme l'aptitude de ce métal à être transféré vers des compartiments du sol où il est moins énergiquement retenu; le compartiment ultime est représenté par la solution du sol dans laquelle le cuivre est immédiatement assimilable par les plantes (**Juste et al, 1995**).

La contamination du sol en Cu s'accompagne souvent d'une mauvaise structure physique du sol (compaction, Tassement), d'une faible rétention de l'eau, d'une pauvreté en nutriments (**Whiteley & Williams, 1993**), d'une acidité du sol (**Simmonset al, 2008**), d'une sécheresse et d'une forte érosion (**Wong, 2003**).

I. 3. Niveau de contamination en cuivre des sols

Le fond pédogéochimique moyen de cuivre (Cu) s'élève à 15-30 mg/ kg (**Adriano, 2001**). Les émissions naturelles de Cu dans l'atmosphère provenant de poussières et d'aérosols produits par l'érosion éolienne, les éruptions volcaniques, les sels marins et les feux de forêts peuvent parvenir aux sols et modifier leurs teneurs en Cu (**Cetois et al, 2003**) ; certaines activités anthropiques sont à l'origine d'un enrichissement des sols en Cu.

I.4. Le cuivre dans la plante

Le cuivre est l'un des sept oligoéléments essentiels à la nutrition des plantes, 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 de matière sèche suivant le stade de développement et l'espèce considérés (**Figure 1**).

Au-delà du seuil de toxicité de 15-30 mg/ kg dans les parties aériennes, le Cu peut être phytotoxique (**Reuter et Robinson, 1997**).

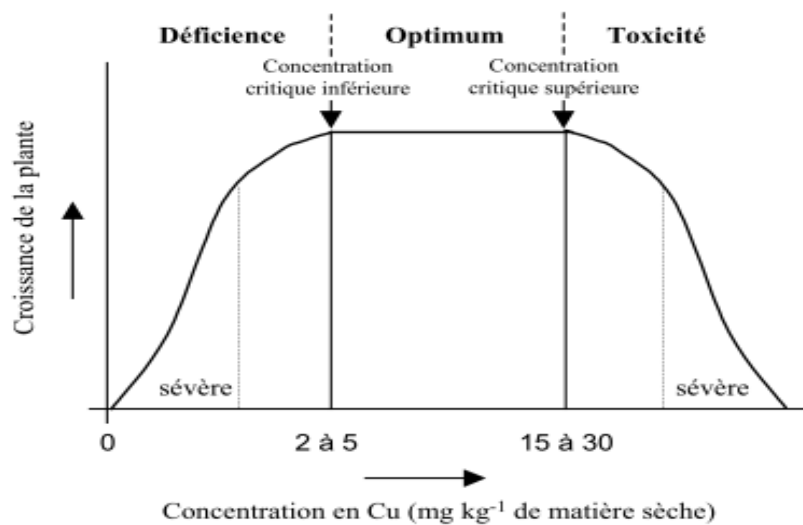


Figure1 : Courbe de croissance en réponse au statut nutritionnel de la plante (Reuter et Robinson, 1997).

I .4 .1. Rôle physiologique du cuivre

Le cuivre a un rôle important dans divers processus métaboliques. (Clemens, 2001). Il participe également au transfert d'électron en photosynthèse, qui est lié aussi au fonctionnement du cytochrome oxydase de la chaîne respiratoire et du super-oxyde dismutase ; enzyme de détoxification des formes active de l'oxygène (Jean François Mort-Gaudry, 2012).

Le cuivre est peut mobile au sein de la plante, ses déplacements dépendant étroitement de l'état nutritionnel général, et en particulier du métabolisme de l'azote (Loué, 1993).

I .4 .2. Absorption du cuivre

Le cuivre est presque totalement complexé dans l'environnement racinaire, mais selon certains auteurs ; il semble se dissocier de sa forme complexée avant l'absorption (théorie de l'ion libre). Il peut migrer à l'intérieur des cellules racinaires en traversant la membrane plasmique (passage de l'apoplasme vers le symplasme) : il s'agit alors du processus d'absorption (Marschner, 1995).

I .4 .3. Translocation du cuivre

Les racines ont en effet une forte capacité à immobiliser le cuivre, au niveau des parois cellulaires, et les mécanismes de translocation sont encore mal connus. Dans les feuilles, le cuivre semble principalement lié aux plastocyanines, tandis que dans le xylème et le phloème, où les concentrations sont de l'ordre de traces, les concentrations sont liées à celles d'amino- acides(Loué, 1993).

I .5. La plante et le stress

Le stress est une déviation significative des conditions optimales pour la vie. Il implique des réponses à tous les niveaux de l'organisme.

Les facteurs de stress sont les facteurs de l'environnement biotique ou abiotique qui déstabilisent l'organisme parce qu'ils représentent une carence, un excès, une action très rapide ou trop lente ou encore une atteinte à l'intégrité du végétal. Dans les conditions naturelles les fluctuations thermiques et hydriques ainsi que les agents pathogènes et les herbivores sont des facteurs de stress fréquents (Sylvie Meyer ,2013).

La pollution de l'environnement représente une source relativement nouvelle de stress pour les plantes. La pollution est surtout de nature chimique et comprend les effets toxiques exercés par les métaux lourds ; parmi lesquelles le cuivre, qui est un élément essentiel mais peuvent également être toxique, lorsqu'il est en excès(Charles Marie Evrard, 2003)

I .6.Le cuivre entre la carence et la phytotoxicité**I .6 .1.Laphytotoxicité**

Une contamination en Cu du sol entraîne une diminution de la biomasse aérienne des plantes. Ces diminutions seraient dues à des faibles niveaux de Ca dans les feuilles car Il affecte la division et l'élongation cellulaire (Vinit-Dunand et al, 2002).Il y apparition de symptômes tels que les chloroses, les nécroses sur limbe supérieur des feuilles (Demirevska-Kepova et al, 2004).

En excès de cuivre, la longueur des racines diminue ; il y a apparition de nécroses (Inaba&Takenaka 2005), de malformations (Cook et al, 1997), modification du sens de

croissance des racines qui poussent pour s'éloigner de la contamination (**Archambault et Winterhalder, 1995**) et modification de l'architecture du système racinaire (**Fuentes et al, 2007**). Elles sont rabougries, épaisses et deviennent marrons pour une concentration supérieure à $1\mu\text{M}$ dans la solution nutritive (**Michaud et al, 2008**).

I .6.2.La carence

Pour des plantes poussant sur des sols contenant une concentration en Cu total naturellement faible, ou en présence de Cu peu mobile, comme les sols calcaires et les sols riches en matière organique dans lesquels le Cu est fortement complexé aux substances organiques, la fourniture de Cu peut être insuffisante . La croissance de la plante est alors sévèrement réduite et des symptômes de déficience peuvent se manifester (**Figure I**). Dans ce cas, les concentrations en Cu dans la plante sont inférieures à un seuil de 2-5 mg /kg, suivant les espèces végétales et l'état de développement de la plante (**Marschner, 1995**).

I. 7. Les mécanismes de tolérance chez les végétaux

Les plantes disposent de nombreux mécanismes connus et possibles de tolérance aux métaux, cependant les mécanismes impliqués en fonction du métal sont différents. Dans le cas du Cu les mécanismes sont variables d'une espèce à l'autre.

Plusieurs stratégies sont possibles :

- Une diminution du prélèvement des contaminants ou de l'entrée dans les cellules,
- Une accumulation dans les racines, ce sont les « excluders », ou dans les parties aériennes, ce sont les accumulatrices (**Lou et al, 2004**).

La diminution de la translocation du Cu des racines vers les parties aériennes et le stockage dans des feuilles proches de l'abscission, permettent de protéger et de maintenir des métabolismes essentiels comme la photosynthèse qui n'ont lieu que dans les feuilles (**Cuypers et al, 2000**). Au niveau du prélèvement, les plantes peuvent diminuer la mobilité des contaminants dans leur rhizosphère en exsudant des ligands qui vont modifier la spéciation du cuivre ou le fixer (**Hall, 2002**).

II. 1.Généralité

Les nutriments organiques et inorganiques ainsi que l'eau sont transportés dans toute la plante. Cette capacité de transport est essentielle pour aboutir à la constitution finale et au fonctionnement des différentes parties de la plante, ainsi que pour son développement et sa morphologie. Les tissus qui interviennent dans le transport des substances à longue distance sont le xylème et le phloème (**Raven et al, 2008**).

II.2. Les éléments minéraux et leurs fonctions

Un des premiers objectifs de physiologistes de la nutrition minérale des plantes à été de préciser le statut essentiel ou non, des éléments identifiés par l'analyse chimique dans les tissus végétaux.

Un élément est essentiel si, en son absence, la plante ne peut pas réaliser un cycle de développement complet de la graine à la graine (**Jean François Mort-Gaudry, 2012**).

II.2.1.Le sodium :

Le sodium est généralement essentiel en tant que microélément chez les plantes qui possèdent voies photosynthétique particulière nommée voie en C4

Charles-Marie Evrard, 2003). IL active une enzyme le pyruvate phosphodikinase qui joue un rôle dans la fixation de l'azote (**Guignard, 98**).

II .2.2.Le potassium :

Le potassium (K^+) constitue le cation inorganique le plus abondant dans le cytosol de toute cellule végétale, qui joue un rôle important, à la fois au niveau cellulaire et au niveau de l'organisme entier (**Jean François Mort-Gaudry, 2012**), il n'entre pas dans la composition d'aucune substance organique (**DELAS, 2000**). Il contrôle les mécanismes d'ouverture et de fermeture des stomates, la régulation de la transpiration et du pH cellulaire. C'est un élément très mobile dans la plante, ce qui lui permet d'être facilement transporté vers les sites d'utilisation et ensuite redistribué. Son abondance et sa mobilité, font le cation le plus important pour la réaction de la pression osmotique et donc de la turgescence vacuolaire (**HELLER et al, 1998**). D'autre part, le potassium est un activateur enzymatique intervenant dans plusieurs réactions métaboliques de la plante.

II.2.3. Le calcium :

Le calcium est absorbé sous la forme du cation bivalent (Ca^{+2}), il est abondant dans la plupart des sols (**Raven et al, 2008**) ; quantitativement, le calcium (Ca^{+2}) est essentiellement présent dans la paroi cellulaire et dans la vacuole. Il joue un rôle de structuration du squelette pariétal, contrôlant sa plasticité. Dans le cytosol, il joue un rôle essentiel tant que messager secondaire (**Jean François et al, 2012**) ; dans certaines réponses hormonales ainsi que dans certaines réponses aux facteurs de l'environnement (**Raven et al, 2008**).

II.3. Transport des éléments minéraux

La nutrition minérale de la plante intègre les mécanismes assurant dans le prélèvement par les racines, le transport, le stockage et l'utilisation des ions minéraux nécessaires au métabolisme et à la croissance de la plante (**Jean François et al, 2012**).

Les plantes utilisent leur énergie métabolique pour concentrer les ions qui leur sont nécessaires. Le transport des ions du sol aux vaisseaux du xylème exige deux mécanismes actifs faisant appel à des transporteurs : l'absorption au niveau de la membrane plasmique des cellules épidermiques et la sécrétion dans les vaisseaux au niveau de la membrane plasmique des cellules parenchymateuses. (**Raven et al, 2008**)

II.3. 1. Transport des ions à travers la membrane

Les membranes sont néanmoins le siège de mouvements ioniques grâce à l'existence de protéines transmembranaires. Le transport est passif quand il est spontané et exergonique alors qu'il est actif dans la situation inverse, impliquant une dépense d'énergie pour la cellule (**Raven et al, 2008**)

II .3.2. Transport radial dans la racine

Le passage des ions dans le xylème est un mécanisme actif nécessitant de l'énergie fournie par l'ATP. D'une façon générale, les mouvements de l'eau et des sels minéraux dans les tissus racinaires impliquent divers mécanismes de transport qui en optimisent le prélèvement et le stockage. La sève brute est ensuite distribuée dans tout le végétal pour répondre à ses besoins nutritifs. Parmi les principaux cations absorbés par les racines sont le potassium K^+ , le calcium Ca^{+2} et le cuivre Cu^{+2} (**Lydie, 2014**).

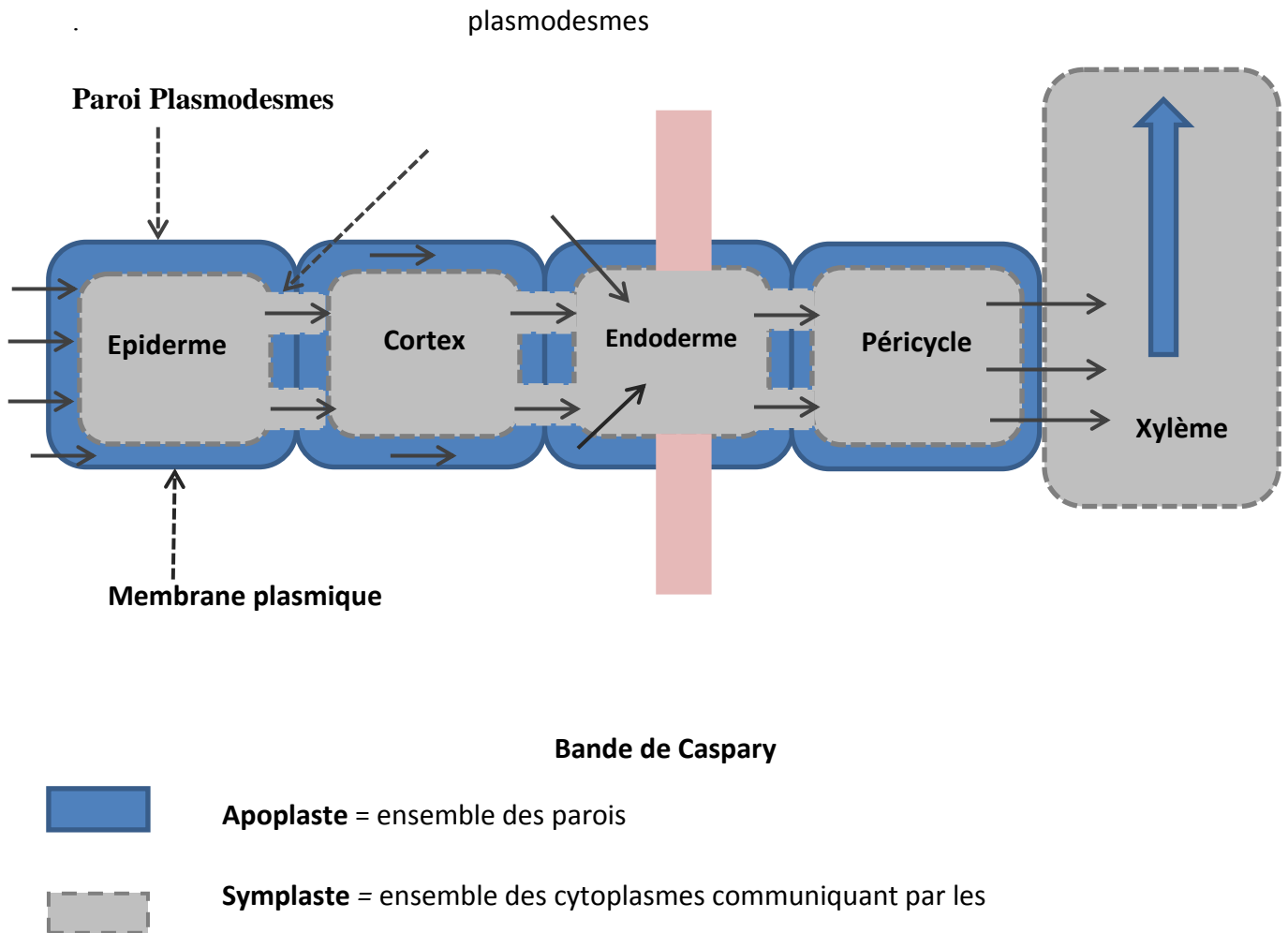


Figure 2 : Voies suivies pour l'absorption de l'eau et des sels minéraux dans les différents tissus de la racine (Lydie, 2014).

II .3.3. Transport axial vers les parties aériennes

À l'issue de leur transport radial dans la racine, après avoir franchi la endodermique, les ions sont sécrétés dans l'apoplasme de la stèle au voisinage du xylème ; puis diffusent dans les vaisseaux xylémiens où ils sont entraînés par le flux de sève pour être distribués à tous les organes aériens de la plante (Jean François et al, 2012).

III.1. Généralité sur les légumineuses

La famille des légumineuses est subdivisée en trois sous famille : Caesalpinieae, Mimosoideae et Papilionoideae, cette dernière inclue les légumineuses dont *Vicia faba L* (Geptsetal ,2005). Les légumineuses permettent à la fois, d'enrichir le sol en matière organique et d'épargner les engrais azotés par l'exploitation d'un processus naturel (Lazrek Ben- Friha ,2008).

Elles fournissent des avantages importants aux systèmes de culture et l'environnement en raison de la fixation symbiotique de l'azote (KAUR et al.2012).

III.2. La fève *Vicia faba L*

La fève *Vicia faba L*, est une plante diploïde ($2n = 12$ chromosomes) et partiellement allogame (Wang et al, 2012). Elle est formée d'un appareil végétatif et d'un appareil reproducteur. L'appareil végétatif comprend : les racines, les tiges et les feuilles. Sa superficie mondiale est estimée à 3 millions d'hectares dont plus de 50% se situent en Chine, 20% en Afrique du Nord et moins de 10% en Europe (Abu Amer et al, 2011). Elle se répandra ensuite à tout l'hémisphère nord (ZAIDI et MAHIOUT, 2012).

III.3. Aspect et particularités

L'aspect des feuilles, fleurs et fruits de *Vicia faba L* est représenté dans La Figure 3 Il s'agit d'une plante robuste, grimpante, qui peut atteindre plus d'un mètre. Ses feuilles, composées de 2 à 7 folioles, sont alternes sur la tige de section carrée. Ses fleurs, disposées en racème (grappe), sont blanches avec un point noir sur les ailes, zygomorphes (à symétrie axiale) et hermaphrodites, à pollinisation entomophile. Sa floraison dépend de la photopériode et de la température. Ses fruits sont des gousses, caractéristiques de la famille des Fabacées.

Comme chez tous les représentants de cette famille, connue sous le nom de légumineuses, les racines de la plante possèdent des nodules à l'intérieur desquelles les cellules géantes servent d'abri à une bactérie symbiotique, appartenant à l'espèce *Rhizobium leguminosarum*. Cette bactérie est capable de capter le diazote atmosphérique et le fixer dans le sol sous forme d'ions utilisables par les plantes (Foltete, 2010).



Figure 3 : les différentes parties de la fève *Vicia faba* L (Thomé1885).

III .4. Origine de *Vicia faba* L

La fève est une plante potagère de la famille des papilionacés cultivée depuis. Originaires d'Asie Centrale cultivait il y a près de 10.000 ans. Elle se répandra ensuite à tout l'hémisphère nord (ZAIDI et MAHIOUT, 2012).

III. 5. Classification systématique

Décrite par Linné en 1753, la fève *Vicia faba* L. (broadbean en anglais) est une plante Dicotylédone herbacée originaire d'Asie ou du Moyen-Orient. Sa culture est très ancienne et pratiquée dans le monde entier.

Sa classification systématique est la suivante :

- Règne : *Plantae*
- Sous-règne : *Tracheobionta*
- Division : *Magnoliophyta*
- Classe : *Magnoliopsida*
- Sous-classe : *Rosidae*
- Ordre : *Fabales*
- Famille : *Fabaceae*
- Genre : *Vicia*
- Espèce : *faba*

III.6. Exigence de la culture de la fève

La fève est localisée dans l'étage bioclimatique de 250 mm de pluie, tolère bien le froid (**Herzog, 1984**) et les hautes températures; nécessaires pour accomplir son cycle végétatif varie de 1900 à 2000 °C. Cette plante méditerranéenne est peut exigeante sur le plan type de sol, à condition que ce dernier soit bien ensoleillé et pas trop acide. Son pH optimal se situe aux environs de 6,75, mais elle tolère bien le pH compris entre 5,5 et 8. Sa température optimale de pousse se situe aux environs de 20°C.

Il s'agit d'une plante annuelle. Elle peut se semer sous des climats très cléments à l'entrée de l'hiver, en octobre ou novembre pour donner des fruits dès la mi-avril, dès février dans le sud de la France, mais sous des climats moins favorables il faudra attendre le mois de mars pour les semis et le mois de juin pour la récolte (**Foltete, 2010**).

III .7.Intérêt en écotoxicologie

Robuste, facile à se procurer et à faire germer, la fève permet, par la rapidité de sa germination et de sa croissance, de disposer très facilement des jeunes pousses ; dont les racines secondaires seront déjà utilisables pour les tests au bout d'une dizaine de jours seulement. De plus, cette plante, utilisée aussi en agriculture, peut pousser sur des sols de différentes natures, d'où son intérêt dans les expériences de terrain.

La fève est très sensible à la pollution du sol, ce qui en fait un modèle végétal très utilisé en écotoxicologie dans un grand nombre d'études (**Sang and Li ,2004**).

Objectif du travail

Afin de comprendre l'effet du cuivre sur les paramètres morphologiques et sur la mobilité des éléments minéraux Na, K, Ca ; chez la fève *Vicia faba L* ; notre conduite expérimentale a été faite dans une serre en verre de Mazaghran, et notre analyse a été fait dans le Laboratoire Biodiversité et Conservation des Eaux et des Sols.

I. Matériel végétal

Les graines de la fève utilisées dans cette étude sont d'une variété locale appelée Sidi Aïch, ces graines sont fournies par le Centre National de Contrôle et de Certification des Semences et plantes (CNCCSP), station El-Khroub (Constantine).

II. Méthodes

1. La germination

Les graines de *Vicia faba* ont été désinfectées par un lavage à l'eau de javel (10%) puis lavées abondamment à l'eau distillée pour éliminer les produits de conservation ayant adhérer à la graine. Pour faciliter et homogénéiser leur germination, les graines ont été placées dans l'eau distillée pendant deux jours. Elles ont ensuite été placées entre deux feuilles de papier filtre imbibé continuellement d'eau distillée. La germination s'est faite à l'obscurité à 25 °C (Souguir et al, 2009).



Figure 4 : La germination des graines de *Vicia faba L*.

2. Préparation de substrat de culture :

La culture est menée dans des pots d'une capacité de 3.5 Kg, le sol est utilisé comme substrat, prélevé de Mazaghran, tamisé pour éliminer les grosses particules, bien mélangé et homogénéisé. Les pots sont remplis d'une manière identique par ce substrat de culture. Un échantillon est prélevé pour déterminer la capacité de rétention de l'eau par la différence entre la quantité d'eau apportée avant l'arrosage et celle drainée après 24h qui est à l'ordre de 30%, et déterminer leur propriété physico - chimique (Tab1).

Tableau 1: Propriété physico-chimique du substrat utilisé.

Granulométrie (Pipette De Robinson)	
- $\varnothing < 2\mu\text{m}$	4.91
- $2\mu\text{m} < \varnothing < 20\mu\text{m}$	9.46
- $20\mu\text{m} < \varnothing < 50\mu\text{m}$	6.84
- $50\mu\text{m} < \varnothing < 200\mu\text{m}$	43.85
- $200\mu\text{m} < \varnothing < 2\text{mm}$	34.55
pH (AFNOR X31-103 Sol/Eau : 2/5)	8.59
Conductivité Electrique (dS/m) (Iso : 11265 Sol/Eau : 1/10)	162
Matière Organique (%) (Méthode De Walkley)1.78	
U.S.D.A Texture :	Sable Limoneux

3. Application du stress métallique

Les solutions du sulfate de cuivre $\text{Cu SO}_4, 5\text{H}_2\text{O}$ sont préparées et appliquées une fois avant la plantation. L'application du stress métallique se fait en fonction du poids sec de sol, et durant tout le cycle végétatif de la fève pendant 03 mois. Les doses du $\text{CuSO}_4, 5\text{H}_2\text{O}$ retenues sont, 200,400, 600, 800 et 1000 mg/kg du sol sec. Ces doses équivalentes respectivement à 700 mg, 1400 mg, 2100 mg, 2800 mg et 3500 mg de $\text{Cu SO}_4, 5\text{H}_2\text{O}$ appliquées dans chaque pot suivant le traitement concerné.



Figure 5 : application du stress métallique

4. Dispositif expérimental

Les pots sont répartis selon 06 lots. Un premier lot sert de témoin (D0) et cinq autres subissent un stress métallique, à des intensités croissantes, 200 ppm (D1), 400 ppm (D2), 600 ppm (D3), 800 ppm (D4) et 1000 ppm (D5). Ce traitement se compose de 24 pots, représentant quatre répétitions pour chaque niveau de traitement (lot de traitement). L'ensemble des pots sont maintenu à capacité au champ, d'une quantité d'eau estimée par pesée des pots, afin de les ramener à la capacité de rétention maximale. L'eau d'irrigation est substituée deux fois par semaine par une solution nutritive commerciale de type ACTIVEG. Les graines germées ont plantées soigneusement par pots qui sont déposés dans la serre.



Figure 6 : Le repiquage des graines germées de *Vicia faba L.*

5. Prélèvement des échantillons :

Après avoir déterré les plantes, les deux parties (racinaire et aérienne) sont soigneusement séparées, la partie souterraine rincée à l'eau de robinet pour nettoyer, et elles transférés au laboratoire pour déterminer et analyser les paramètres morphologiques et chimiques de la fève.



Figure 7 : Dispositif expérimental adopté à la serre

6. Techniques d'analyse

A. Les paramètres morphologiques

L'objectif principal est de rechercher les caractères morphologiques liés au stress métalliques chez *vicia faba*L. Au niveau de la partie aérienne et la partie racinaire.

a. Caractères morphologiques aériens :

Afin de comprendre ce phénomène, des mesures sont effectuées, elles concernent le nombre des folioles et la longueur des tiges.

b. Caractères morphologiques racinaires :

Les racines sont l'emplacement primaire de la perception et des dommages pour plusieurs stress, (**Jiang et Deyholos, 2006**).

Dans le but d'observer le comportement racinaire de *Vicia faba* L. Face à ce stress ; Les mesures effectuées ont concerné la longueur des racines (LR), le volume racinaire (VR) déterminé par immersion de chaque racine dans une éprouvette, il est représenté par le volume d'eau déplacé et établi en ml (**Figure 8**).



Figure 8 : Mesure de volume racinaire de *Vicia faba* L

B. Les paramètres chimiques

a. Extraction des éléments minéraux

Les procédés d'extraction et de dosage des éléments minéraux sont effectués sur les feuilles, et les racines des plantes stressées et témoins par la méthode analytique décrite par (LAFON et al, 1996) qui consiste à déterminer la composition en éléments d'une plante en procédant d'abord, par calcination et puis à la destruction complète de la matière organique ; le résidu est ensuite analysé.

Après séchage le matériel végétal à l'étuve à 70°C pendant 16 heures, et broyé à l'aide d'un mortier, 100 mg de matière sèche est incinérés à 450°C pendant 2 heures au four à moufle ; après refroidissement 2 ml de HNO₃ sont ajoutés, puis on remet au four moufle pendant 1heure. La cendre obtenue est dissoudre dans 3 ml d'HCl (6N) puis filtrée, et le volume est amené à 50 ml, ajustement par l'eau bidistillée jusqu'au ce volume, à partir de cette solution, les dosages de Na⁺, K⁺, Ca⁺ sont effectués par photométrie à flamme.

b. Dosage du sodium, potassium, calcium par le spectrophotomètre à flamme

Pour chaque élément minéral à doser, des solutions étalons à des concentrations connues doivent être préparer à partir d'une solution mère 01 g.l⁻¹ pour chaque élément, à partir de cette dernière, les solutions filles où solutions étalons peuvent être facilement reproduites.

7. Analyse statistique

L'analyse statistique se porte sur la variance à un seul facteur en Randomisation (le test est significatif quand $p < 0.05$), et sur la comparaison des moyennes par le test de NEWMAN-KEULS. Les différents traitements statistiques des données obtenues sont réalisées par StatBox version 6.40 et vérifiés par Statistica 8, les résultats sont présentés sous forme de moyenne \pm écartype (Mean \pm SD).

V.I.L'effet du cuivre sur les paramètres morphologiques

a- résultat

Tableau 02 : probabilité « *p* » de l'analyse de la variance des paramètres morphologiques.

Variables	Probabilité	
Longueur de tige	P=0,00099	***
Nombre des folioles	P=0,08771	Ns
Longueur des racines	P=0	***
Volume racinaire	P=0,15851	Ns

Ns non significatif

*significatif

** Hautement significatif

*** très hautement significatif

1. L'effet du cuivre sur la longueur des tiges

Les résultats moyens obtenus (Tab.03) montrent que la longueur des tiges a diminué significativement d'autant que la dose du cuivre augmente (Fig.10). La valeur la plus élevée est enregistrée chez les plantes qui ne reçoivent aucune dose du cuivre (D0) soit 53 cm. tandis que les plantes cultivées sous le traitement métallique enregistrent des valeurs moyennes inférieures à celle trouver au témoin, avec 46,75 cm et 47 cm respectivement pour D3 et D4, représentant des taux de diminution sensiblement identiques estimés à 11,79% et 11,32%. Ainsi pour les lots D1 et D5, la régression de ce paramètre affiche successivement 44,7 cm et 45,5 cm, exprimant également des évolutions régressives de l'ordre de 15,66% et 14,15%. Chez les plantes issues de traitement métallique D2, la valeur moyenne de la longueur des tiges n'affiche que 37,75 cm, soit un taux de diminution élevé par rapport aux autres niveaux de traitement (28,77%).

L'analyse de variance au seuil d'une probabilité $P=5\%$ montre un effet significatif du cuivre sur la longueur de tige de la plante ($P<0,05$) (Tab.02)

Tableau 03: Variation de la longueur des tiges (Cm) en fonction des différentes doses du cuivre (ppm).

Dose du cuivre (ppm)	Longueur de tige (cm)	Taux d'évolution (%)
D0 (0)	53 ± 0,81 ^A	/
D1 (200)	44,7 ± 5,5 ^B	-15,66
D2 (400)	37,75 ± 3,2 ^C	-28,77
D3 (600)	46,75 ± 4,75 ^{AB}	-11,79
D4 (800)	47 ± 1,41 ^{AB}	-11,32
D5 (1000)	45,5 ± 4,43 ^B	-14,15

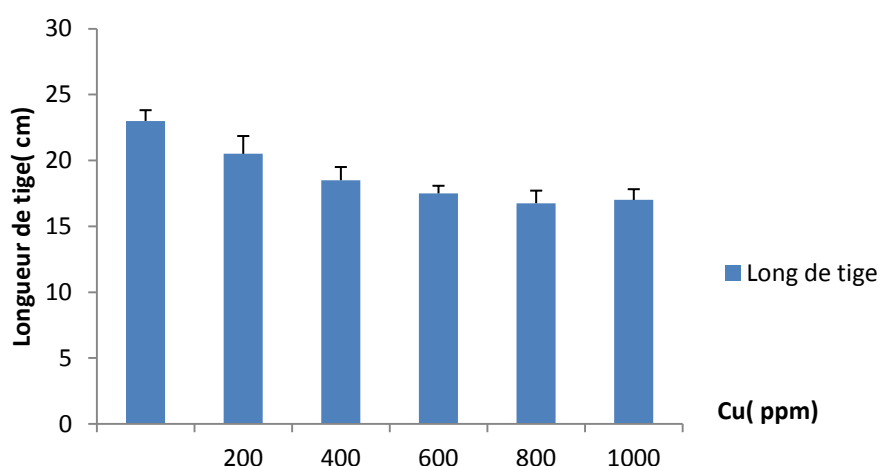


Fig.10 : L'évolution des moyennes de la longueur des tiges (cm) en fonction des doses du cuivre (ppm).

2. L'effet du cuivre sur le nombre des folioles

Les résultats obtenus à partir de l'estimation de cette caractéristique (Tab.04) (Fig .11), montrent que l'application croissante de cuivre entraîne une réduction des nombres des folioles chez les plantes stressées. Au niveau du traitement témoin, on signale une moyenne estimée à 51 folioles, au niveau des plantes issues des traitements D1, D2 et D5, les moyennes enregistrées sont sensiblement identiques et plus faibles par rapport au témoin, on assiste respectivement 36, 35 et 36,25 folioles, exprimant des taux régressifs de l'ordre de 29,41%, 31,37% et 28,92%.

L'analyse de variance au seuil d'une probabilité $P=5\%$ montre un effet non significatif du cuivre sur le nombre des folioles de la plante ($P>0,05$) (Tab.02)

Tableau 04: Variation de nombre des folioles en fonction des différentes doses du cuivre (ppm).

Dose de cuivre (ppm)	Nombre de folioles	Taux d'évolution (%)
D0 (0)	51 ± 5,29	/
D1 (200)	36 ± 10,68	-29,41
D2 (400)	35 ± 9,63	-31,37
D3 (600)	41 ± 5,03	-19,60
D4 (800)	45 ± 8,68	-11,76
D5 (1000)	36,25 ± 8,96	-28,92

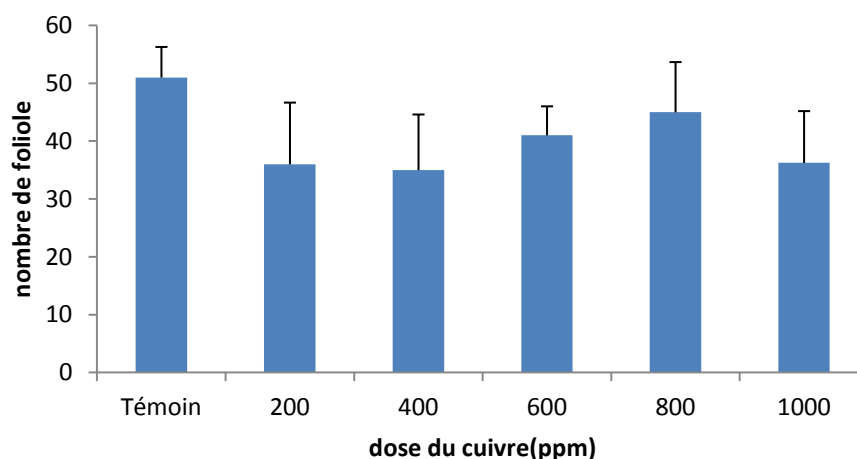


Fig. 11 : Evolution de nombre des folioles en fonction des différentes doses du cuivre (ppm).

3. Effet du cuivre sur le volume racinaire

L'étude des résultats obtenus (Tab. 05) indique que l'application des doses croissantes du cuivre provoque une diminution de volume racinaire (Fig.12), cette diminution est plus marquée au dose 1000 ppm avec un taux de régression qui atteint 31,81% par rapport au témoin.

Au lot témoin on enregistre 11 ml, alors qu'au niveau des doses 400 et 600 ppm on constat une chute de volume racinaire, on affiche respectivement 9 ml et 6,5 ml avec une tendance d'évolution respective de l'ordre de 18,18% et 13,63%. Ainsi pour les doses 200 et 800 ppm, on enregistre une faible diminution de ce paramètre avec 10 ml pour 200 ppm et 10,25 ml pour 800ppm, exprimant des évolutions successives estimées à 9,09% et 6,81%.

L'analyse de variance au seuil d'une probabilité $P=5\%$ montre un effet non significatif du cuivre sur le volume racinaire de la plante ($P > 0,05$) (Tab. 02)

Tableau 05: Variation du volume racinaire (ml) en fonction des différentes doses du cuivre (ppm).

Dose de cuivre (ppm)	Volume racinaire (ml)	Taux d'évolution (%)
D0 (0)	11± 0,81	/
D1 (200)	10±1,63	-9,09
D2 (400)	9±2,16	-18,18
D3 (600)	9,5 ±1,73	-13,63
D4 (800)	10,25 ±0,5	-6,81
D5 (1000)	7,5 ±1,29	-31,81

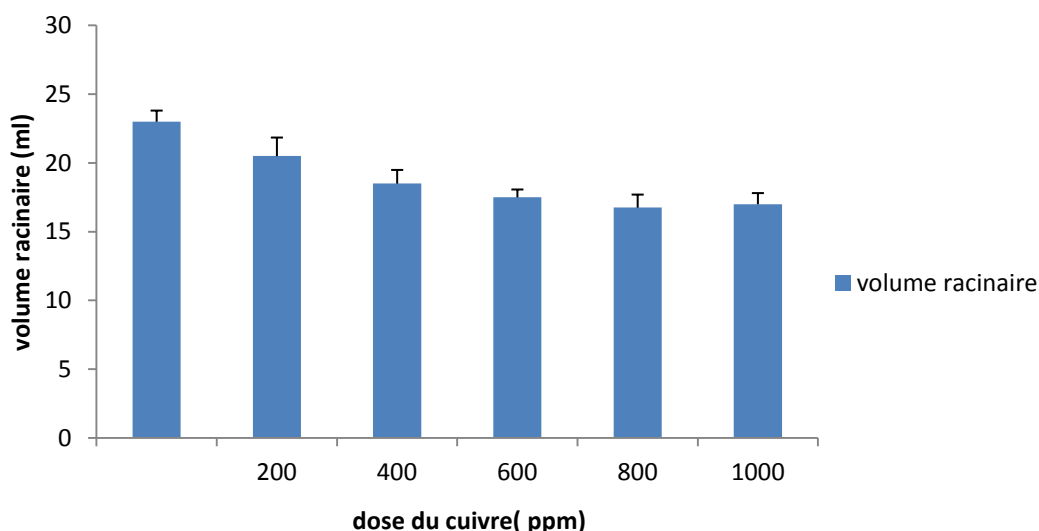


Fig.12 : Evolution du volume racinaire (ml) en fonction des doses du cuivre (ppm).

4. Effet du cuivre sur la longueur racinaire

Les résultats moyens (Tab.06) montrent que l'application des doses croissantes de Cu dans le substrat de culture induit une diminution de la longueur des racines. Cette variation est plus marquée au niveau des fortes doses (D4 et D5) (Fig.13), on affiche un taux de diminution de l'ordre de 26,08% pour D4 et 27,17% pour D5. Suite à l'application des doses D1, D2 et D3, on observe aussi un abaissement de la longueur des racines, on enregistre respectivement des taux de diminution de l'ordre de 10,86%, 19,56% et 23,91%.

L'analyse de variance au seuil d'une probabilité $P=5\%$ montre un effet significatif du cuivre sur la longueur racinaire de la plante ($P<0,05$) (Tab.02)

Tableau 06: Variation de la longueur racinaire (cm) en fonction des différentes doses du cuivre (ppm)

Dose de cuivre (ppm)	Longueur de racine (cm)	Taux d'évolution (%)
D0 (0)	$23 \pm 0,81^A$	/
D1 (200)	$20,5 \pm 1,35^B$	-10,86
D2 (400)	$18,5 \pm 1^C$	-19,56
D3 (600)	$17,5 \pm 0,57^C$	-23,91
D4 (800)	$17 \pm 0,95^C$	-26,08
D5 (1000)	$16,75 \pm 0,81^C$	-27,17

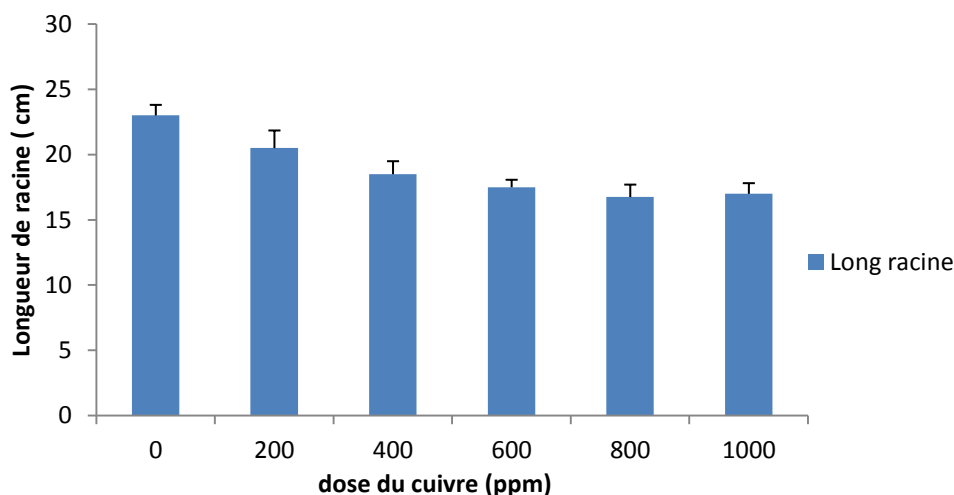


Fig.13 : Evolution de la longueur racinaire (cm) en fonction des doses du cuivre (ppm).

b- Discussion

La réduction de la morphologie aérienne et souterraine occasionnée par le cuivre, dépend étroitement des doses appliquées. En effet, le Cu a des effets dépressifs sur la partie racinaire, avec une diminution de l'ordre de 32% pour le volume racinaire dans le forte dose 1000 ppm (D5). Également pour la longueur racinaire, on observe une réduction dans les limites de 27% dans les traitements métalliques 800 et 1000 ppm (D4 et D5). Pour la partie aérienne, les résultats moyens obtenus montre que le cuivre a provoqué une diminution remarquable de la longueur de tige de l'ordre de 28, 77% au niveau de lot de traitement 400 ppm (D2), cette diminution est moins important au traitement métallique 1000 ppm (D5), on n'enregistre que 15%. Le nombre de folioles est également influencé par la présence de cuivre, et surtout dans les doses 200, 400 et 1000 ppm, on affiche une réduction qui varié entre 28 et 31%. Nos résultats sont d'accord avec celles trouvées par (**Benouis, 2012**), il est constaté que les plantes de la fève *Vicia Faba L* qui sont soumises à des doses croissantes du cuivre a présenté une diminution significative des paramètres morphologiques chez deux variétés (*Sidi Aich* et *Super Aguadulce*).

Chez des plantes cultivées en milieu contaminé en cuivre, on observe des inhibitions de la croissance racinaire, des malformations des racines, une diminution de l'élongation racinaire (**Inaba et Takenaka, 2005**). L'accumulation des métaux au niveau de la masse racinaire est favorable à l'apparition de phénomènes de rhizotoxicité qui se traduisent par une coloration brunâtre et un épaissement des racines, une diminution de l'élongation racinaire ainsi qu'une augmentation de leur ramification (**Kopittke et Menzies, 2006**)

V.II. Effet du cuivre sur la teneur des éléments minéraux Na, K, Ca dans les différents organes de la fève

a. résultat

Tableau 07 : probabilité « p » de l'analyse de la variance des paramètres chimiques.

Variables	Probabilité	
Teneur de Na dans les racines	P=0	***
Teneur de Na dans les tiges	P=0	***
Teneur de Na dans les feuilles	P=0	***
Teneur de K dans les racines	P=0	***
Teneur de K dans les tiges	P=0	***
Teneur de K dans les tiges	P=0	***
Teneur de Ca dans les racines	P=0	***
Teneur de Ca dans les tiges	P=0	***
Teneur de Ca dans les feuilles	P=0	***

*** très hautement significatif

V.II.1. La teneur de Sodium dans les racines, les tiges et les feuilles

1. Dans les racines

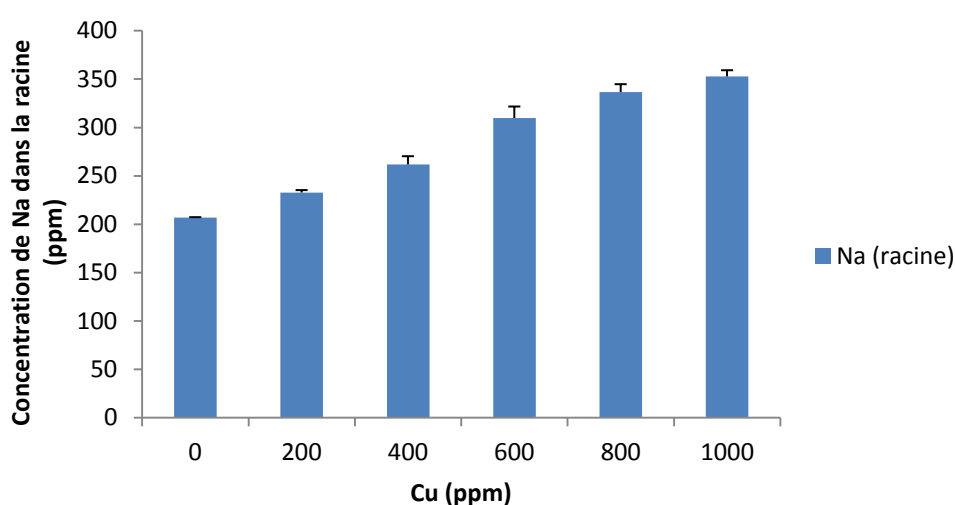
Les résultats moyens obtenus (Tab.08), montrent que l'application croissante du cuivre est à la source d'une progression des teneurs en sodium dans les racines des plantes traitées (Fig.14).

Dans les conditions optimales, le témoin exprime un moyen inférieur en comparaison avec celles enregistrées pour les autres niveaux de traitement, soit 206,75ppm. Au niveau de traitement D4 et D5, on assiste à une augmentation plus importante des teneurs en sodium des racines qui atteint 336,5 ppm (D4) et 352,5 ppm (D5) exprimant des élévations successives de l'ordre de 62,76% et 70,62%. À la dose D1, on observe une faible variation par rapport au témoin estimée à 12,58%.

L'analyse des résultats obtenus (Tab.07), montre que la variation des teneurs en potassium est très hautement significativement influencée par l'application du cuivre ($P < 0,05$).

Tableau 08 : Teneur de sodium (ppm) dans les racines de la fève exposée au cuivre.

Dose de cuivre (ppm)	Teneur en Na dans les racines (ppm)	Taux d'évolution (%)
D0 (0)	206,75±0,5 ^F	/
D1 (200)	232,75±2,5 ^E	12,58
D2 (400)	261,75±8,5 ^D	26,60
D3 (600)	309,75±11,87 ^C	49,82
D4 (800)	336,5±8,18 ^B	62,76
D5 (1000)	352,75±6,34 ^A	70,62

**Fig.14** : l'évolution des moyennes du teneur en sodium (ppm) dans les racines en fonction des doses du cuivre.

2. Dans les tiges

L'étude des résultats obtenus (Tab. 09) montre que l'application de cuivre à différentes concentrations provoque un abaissement des teneurs en sodium dans les tiges des plantes stressées. Cette diminution est plus marquée pour les plantes traitées avec les fortes doses (D4 et D5) (Fig.15).

Au niveau du témoin on enregistre 345,25 ppm, alors que les plantes soumises à la dose 200 ppm, on observe une diminution légère par rapport au témoin (275,5 ppm), avec un taux d'évolution égale à -13,11%. Au doses D2 et D3, la teneur de sodium dans la tige continuée sa diminution et on enregistre 275,5 ppm (D2) et 256,75ppm (D3) exprimant respectivement des taux de régression de l'ordre de 20,20% et 25,63%. Egalement pour les doses D4 et D5, ce paramètre atteint une diminution maximale, avec 233 ppm pour D4 et 207,25 ppm pour

D5, enregistrant des évolutions successives importantes par rapport aux autres doses avec 32,37% (D4) et 39,97% (D5).

L'étude statistique des résultats (Tab.07) montre que la variation des teneurs en potassium est très hautement significativement influencée par l'application du cuivre ($p < 0,05$).

Tableau 08 : Teneur de sodium (ppm) dans les tiges en fonctions des différentes doses du cuivre.

Dose de cuivre (ppm)	Teneur en Na dans la tige en ppm	Taux d'évolution (%)
D0(0)	345,25±1,25 ^A	/
D1(200)	300±9,41 ^B	-13,11
D2(400)	275,5±4,65 ^C	-20,20
D3(600)	256,75±2,98 ^D	-25,63
D4(800)	233,5±2,88 ^E	-32,37
D5(1000)	207,25±0,5 ^F	-39,97

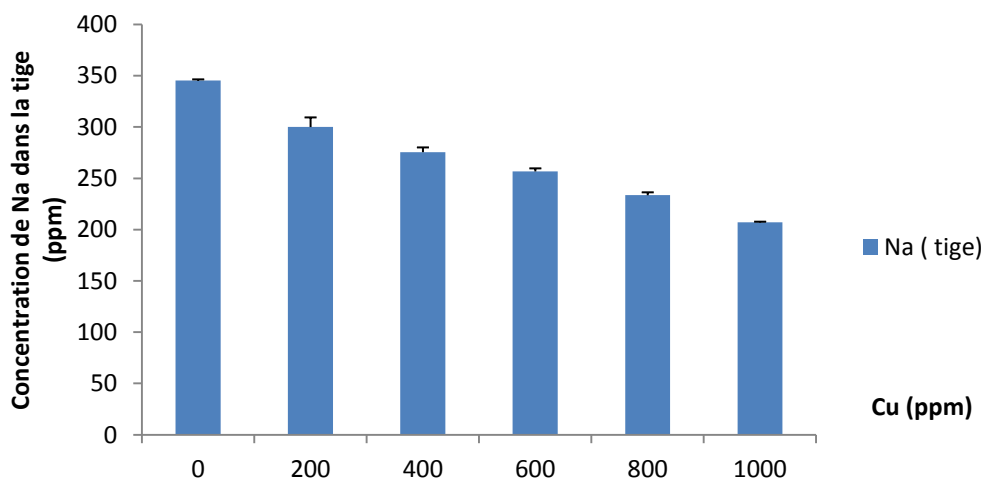


Fig.15 : l'évolution des moyennes du teneur de sodium (ppm) dans les tiges en fonction des doses du cuivre

3. Dans les feuilles

Les résultats moyens obtenus (Tab.10), indiquent que l'application du cuivre induit un abaissement des teneurs en sodium chez les plantes cultivées dans le milieu contaminé (Fig.16). Pour les doses D4 et D5, l'accumulation de sodium dans les racines est plus faible par rapport au témoin, on enregistre respectivement des taux de diminution atteignant à

50,61% et 62,45%. Egalement pour D1, D2 et D3 on assiste une même tendance d'évolution régressive avec 13,20% pour D1, 25,03% pour D2 et 37,28% pour D3.

L'étude statistique des résultats (Tab.07), montre que le traitement métallique induit par le cuivre provoque un effet très hautement significatif sur la teneur en sodium ($P < 0,05$).

Tableau 9 : Teneur de sodium (ppm) dans les feuilles en fonction des doses du cuivre

Dose de cuivre (ppm)	Teneur de Na dans les feuilles (ppm)	Taux d'évolution (%)
D0 (0)	183,75±0,5 ^A	/
D1 (200)	159,5±1,91 ^B	-13,20
D2 (400)	137,75 ±0,5 ^C	-25,03
D3 (600)	115,25 ±0,5 ^D	-37,28
D4 (800)	90,75 ±1,5 ^E	-50,61
D5 (1000)	69 ±0,81 ^F	-62,45

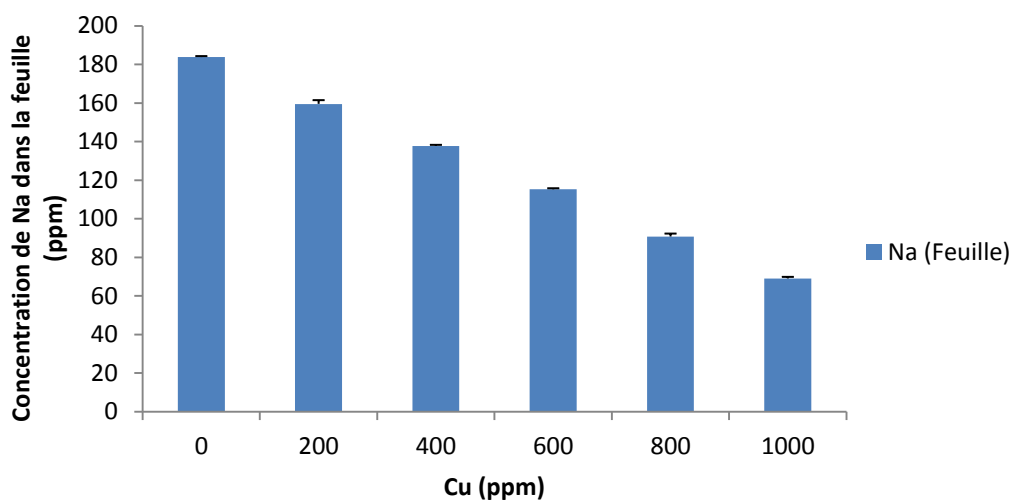


Fig.16 : l'évolution des moyennes du teneur de sodium (ppm) dans les feuilles en fonction des doses du cuivre.

V.II.2. La teneur de Potassium dans les racines, les tiges et les feuilles

1. Dans les racines

Les résultats moyens obtenus (Tab.11), affiche que la teneur en potassium diminue progressivement avec l'intensité du cuivre (Fig.17). Dans le lot témoin, la teneur en potassium s'évalue à 119,25 ppm. Dans les lots D1 et D2 ces taux arrivent successivement à 79 et 71,75 ppm représentant des régressions de l'ordre 33,75% de et 39,83%. L'augmentation de l'intensité de cuivre aux doses D3, D4 et D5, ont provoqué une réduction notable des teneurs en potassium, avec 38,25 ppm pour D3, 34 ppm pour D4 et 32,75 ppm pour D5. Inscrivants des taux des diminutions de l'ordre de 67,92%, 71,49% et 72,54%.

L'étude statistique des résultats (Tab.07), affiche que le traitement métallique induit par le cuivre provoque un effet très hautement significatif sur la teneur en potassium ($P < 0,05$).

Tableau 11 : Teneur de potassium (ppm) dans les racines en fonction des différentes doses du cuivre.

Dose de cuivre (ppm)	Teneur en K dans les racines (ppm)	Taux d'évolution (%)
D0 (0)	119,25±1,7 ^A	/
D1 (200)	79±1,82 ^B	-33,75
D2 (400)	71,75±4,27 ^C	-39,83
D3 (600)	38,25±1,5 ^D	-67,92
D4 (800)	34±4,69 ^D	-71,49
D5 (1000)	32,75±4,34 ^D	-72,54

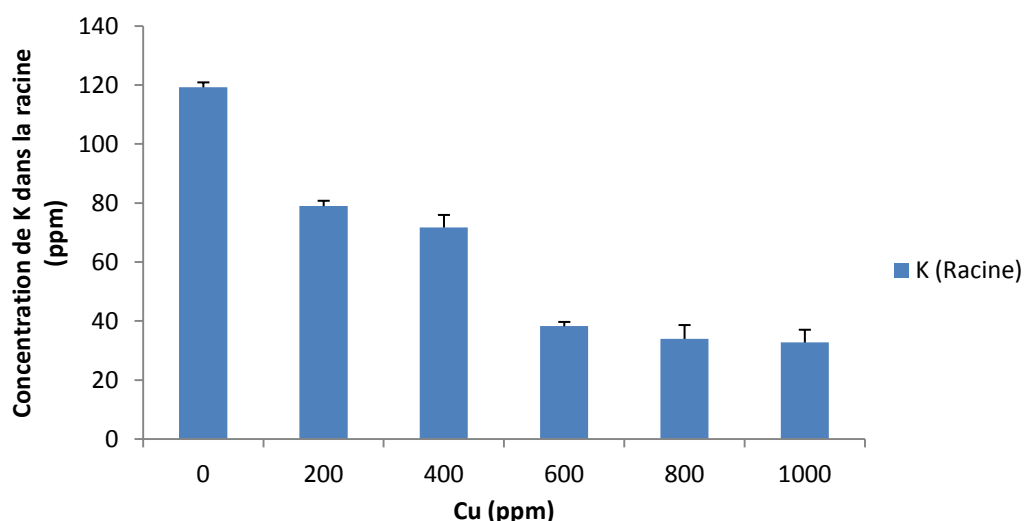


Fig.17 : l'évolution des moyennes du teneur de potassium (ppm) dans les racines en fonction des doses du cuivre.

2. Dans les tiges

Les résultats moyens (Tab.12), montrent que le teneur en potassium diminué en fonction de l'accroissement des doses du cuivre appliquées (Fig.18).

Dans les conditions optimales, le teneur en potassium est évalué à 156 ppm. Au niveau du traitement D1, la teneur moyenne enregistrée est de 113 exprimant un abaissement de l'ordre de 27,56% par rapport au témoin. Les lots D4 et D5 enregistrant les valeurs les plus faibles évaluées à 40,75 et 37,75 ppm avec des diminutions de l'ordre de 73,88 et 75,80%.

L'analyse des résultats obtenus (Tab. 07), montre que la variation des teneurs en potassium est très hautement significativement influencée par l'application du cuivre ($P < 0,05$).

Tableau 12 : Teneur de potassium (ppm) dans les tiges en fonction des doses du cuivre (ppm) .

Dose de cuivre (ppm)	Teneur en K dans la tige en ppm	Taux d'évolution (%)
D0 (0)	156 ±0,81 ^A	/
D1 (200)	113 ±2,94 ^B	-27,56
D2 (400)	77,25±0.957	-50,48
D3 (600)	73 ±0,95 ^C	-53,21
D4 (800)	40,75±3,36 ^D	-73,88
D5 (1000)	37,75±1,5 ^E	-75,80

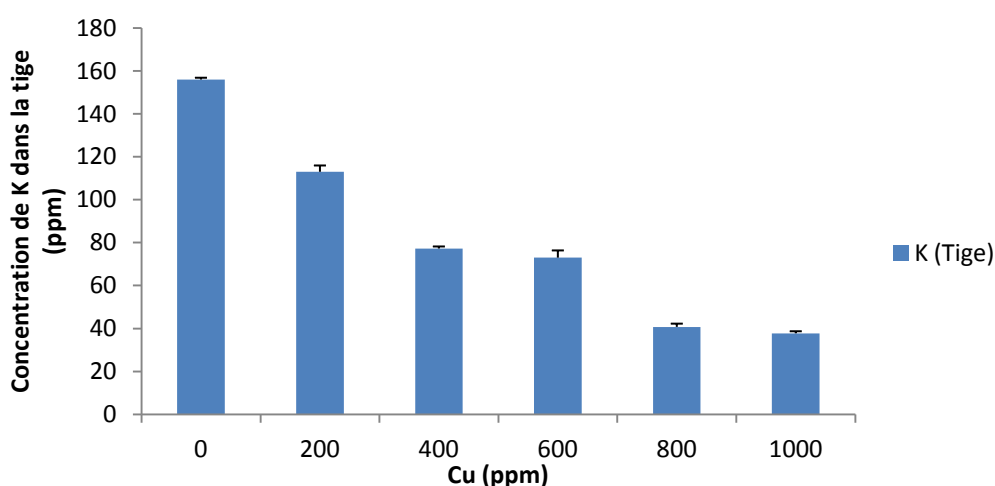


Fig.18 : l'évolution des moyennes du teneur de potassium (ppm) en fonction des doses du cuivre.

3. Dans les feuilles

L'analyse des résultats obtenus (Tab.13.) affiche, que l'application de cuivre à différentes concentrations provoque un abaissement des teneurs en potassium dans les feuilles des plantes stressées (Fig.19).

Au niveau du lot D0, on enregistre 154 ppm, alors que les plantes soumises à la dose 200 ppm, on observe la plus faible diminution par rapport au témoin (113,5 ppm), avec un taux d'évolution égale à 26,30%. Au doses D2 et D3, la teneur de potassium dans les feuilles continuée sa diminution et on enregistre 112 ppm (D2) et 77,5 ppm (D3) exprimant respectivement des taux de régression de l'ordre de 27,27 % et 49,68 %. Ainsi que pour les doses D4 et D5, ce paramètre atteint une diminution maximale, avec 41,5 ppm pour D4 et 37,5 ppm pour D5, enregistrant des évolutions successives importantes par rapport aux autres doses avec 73,05% (D4) et 75,65% (D5).

L'analyse de la variance (Tab .07) révèle que les variations de la teneur en potassium sont significativement influencées par l'application du cuivre ($P < 0,05$).

Tableau 12 : Teneur en potassium en (ppm) dans les feuilles en fonction des doses du cuivre.

Dose de cuivre (ppm)	Teneur de K dans la feuille (ppm)	Taux d'évolution (%)
D0 (0)	154±2,82 ^A	/
D1 (200)	113,5±3,10 ^B	-26,30
D2 (400)	112±3,82 ^B	-27,27
D3 (600)	77,5±1,73 ^C	-49,68
D4 (800)	41,5±3 ^D	-73,05
D5 (1000)	37,5±5,19 ^D	-75,65

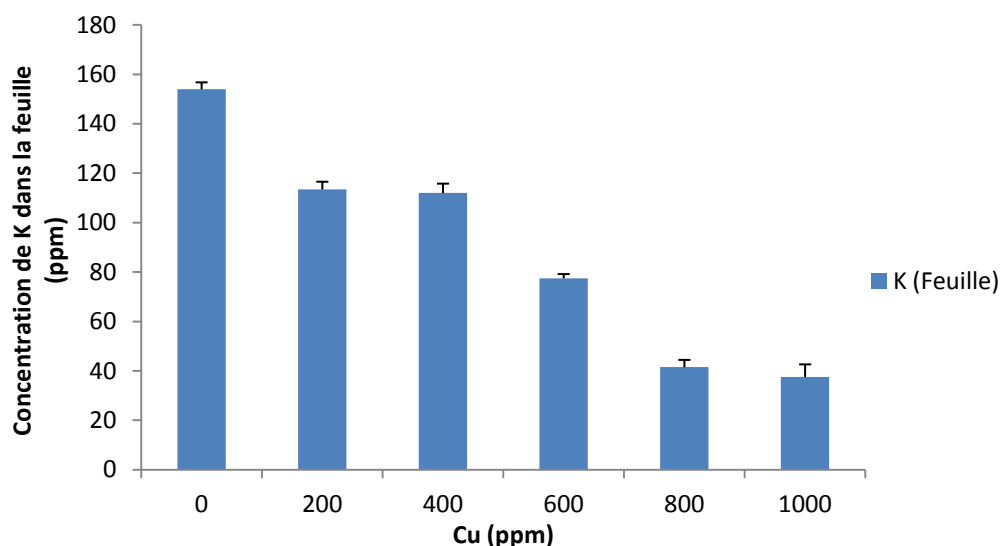


Fig.19 : l'évolution des moyennes du teneur de potassium (ppm) en fonction des doses du cuivre.

V.II.3. La teneur du Calcium dans les racines, les tiges et les feuilles

1. Dans les racines

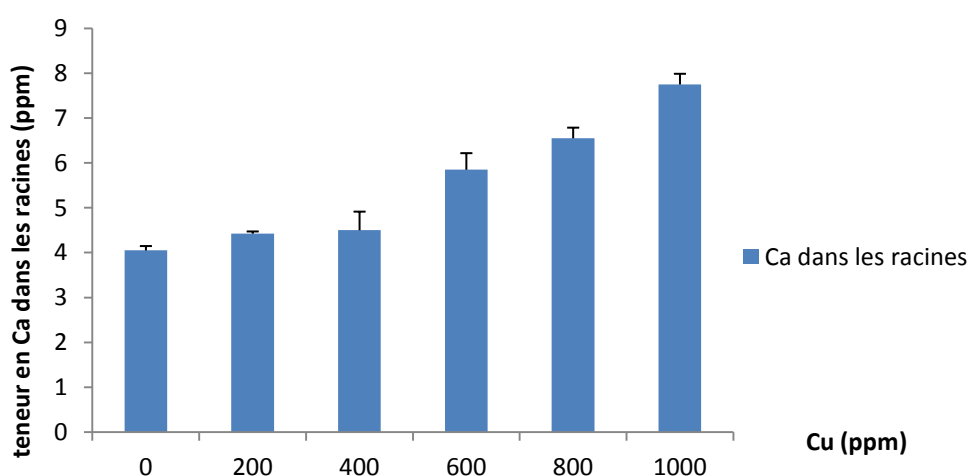
Les résultats moyens obtenus (Tab.14), montrent que l'application croissante du cuivre engendre une augmentation de la teneur en calcium chez les plantes stressées (Fig.20).

Dans les conditions optimales, la teneur la plus basse de cette dernière est de l'ordre de 1,25 ppm. Sous l'effet du cuivre, les teneurs moyennes enregistrées dans les lots D1 et D2, sont respectivement estimées à 2,825 ppm et 3,225 ppm, exprimant des augmentations très importantes de l'ordre de 66 % et 126 % par rapport au témoin. Egalement pour les doses D3, D4 et D5, ce paramètre atteint un accroissement notable, avec 3,225 ppm pour D3 et 5,55 ppm pour D4 et 3,56 ppm pour D5, enregistrant des évolutions successives importantes par rapport aux autres doses avec 158 % (D3) et 184 % (D4) et 192 % (D5).

Le traitement des résultats (Tab.07) indique que l'application du cuivre influe d'une manière très hautement significative sur la teneur en calcium ($P < 0,05$).

Tableau 14 : Teneur de calcium (ppm) dans les racines en fonction des doses du cuivre.

Dose de cuivre (ppm)	Teneur de Ca dans les racines en ppm	Taux d'évolution (%)
D0 (0)	1,25±0,11 ^E	/
D1 (200)	2,075±0,05 ^D	66,00
D2 (400)	2,825±0,05 ^C	126,00
D3 (600)	3,225±0,05 ^B	158,00
D4 (800)	3,55±0,11 ^A	184,00
D5 (1000)	3,65±0,05 ^A	192,00

**Fig.20** : l'évolution des moyennes du teneur de calcium (ppm) en fonction de la dose du cuivre.

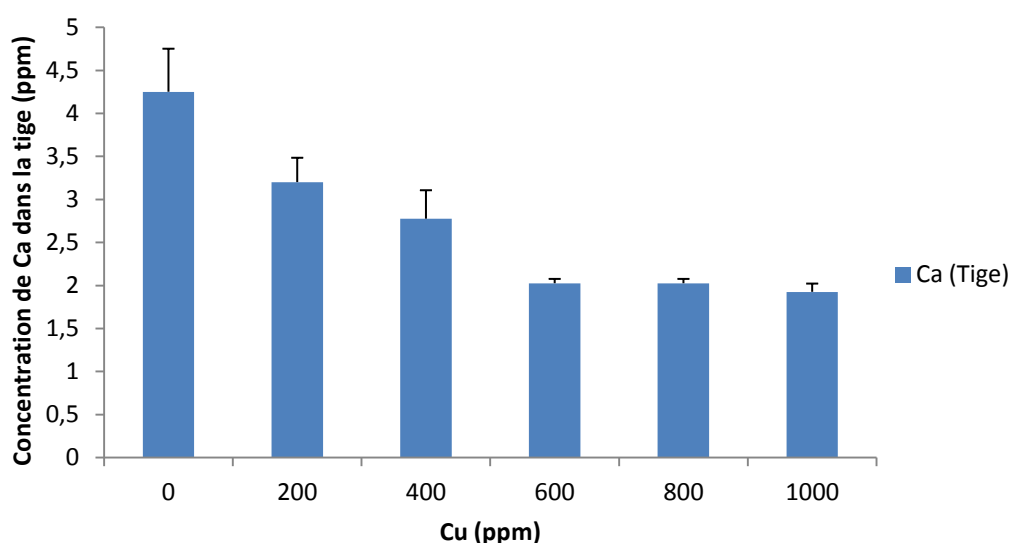
2. Dans les tiges

Les résultats moyens obtenus (Tab.15), affiche que la teneur en calcium diminue progressivement en fonction des doses de cuivre (Fig.21). Dans le lot témoin, la teneur en calcium affiche 4,25 ppm. Dans les lots D1 et D2, on assiste des réductions successives de l'ordre de 3,2 ppm et 2,77 ppm. Au traitements métalliques D3 et D4, les valeurs moyennes enregistrées sont identiques, égale à 2,02 ppm, exprimant un taux de régression estimé à 52,47%. A forte dose D5, l'accumulation de calcium dans les tiges n'affiche que 1,92 ppm, avec une diminution évaluée à 54,82% par rapport au lot témoin.

L'étude statistique des résultats (Tab .07), affiche que le traitement métallique induit par le cuivre provoque un effet très hautement significatif sur la teneur en calcium (P=0).

Tableau 14 : Teneur de calcium (ppm) dans les tiges en fonction des doses du cuivre.

Dose de cuivre (ppm)	Teneur en Ca dans la tige en ppm	Taux d'évolution (%)
D0 (0)	4,25±0,5 ^A	/
D1 (200)	3,2±0,28 ^B	-24,71
D2 (400)	2,77±0,33 ^C	-34,82
D3 (600)	2,02±0,05 ^D	-52,47
D4 (800)	2,02±0,05 ^D	-52,47
D5 (1000)	1,92±0,09 ^D	-54,82

**Fig.21** : l'évolution des moyennes du teneur de calcium (ppm) en fonction des doses du cuivre.

3. Dans les feuilles

Les résultats moyens montrent que l'intensité du cuivre à travers l'application croissante des doses, provoque une augmentation de la teneur en calcium chez les plantes soumises aux stress métalliques (Tab.16),(Fig.22). Dans le lot témoin, la teneur de Ca s'évalue à 4,05 ppm, au niveau des doses D1 et D2 on assiste une légère augmentation des teneurs de Ca, avec respectivement 4,42ppm et 4,5 ppm, soit des taux d'évolution de l'ordre de 9,14% et 11,11%. À partir de dose D3, on observe des élévations importantes de ce paramètre, avec 5,85 ppm pour D3, 6,55ppm pour D4 et 7,75ppm pour D5, exprimant des évolutions successives de l'ordre de 44,44%, 61,73% et 91,36%.

L'étude statistique des résultats (Tab .07), affiche que le traitement métallique induit par le cuivre provoque un effet très hautement significatif sur la teneur en calcium ($P < 0,05$).

Tableau 16 : Teneur de calcium (ppm) dans les feuilles en fonction des doses du cuivre.

Dose de cuivre (ppm)	Teneur de Ca dans les feuilles (ppm)	Taux d'évolution (%)
D0 (0)	4,05±0,1 ^D	/
D1 (200)	4,42±0,05 ^D	9,14
D2 (400)	4,5±0,41 ^D	11,11
D3 (600)	5,85±0,36 ^C	44,44
D4 (800)	6,55±0,23 ^B	61,73
D5 (1000)	7,75±0,23 ^A	91,36

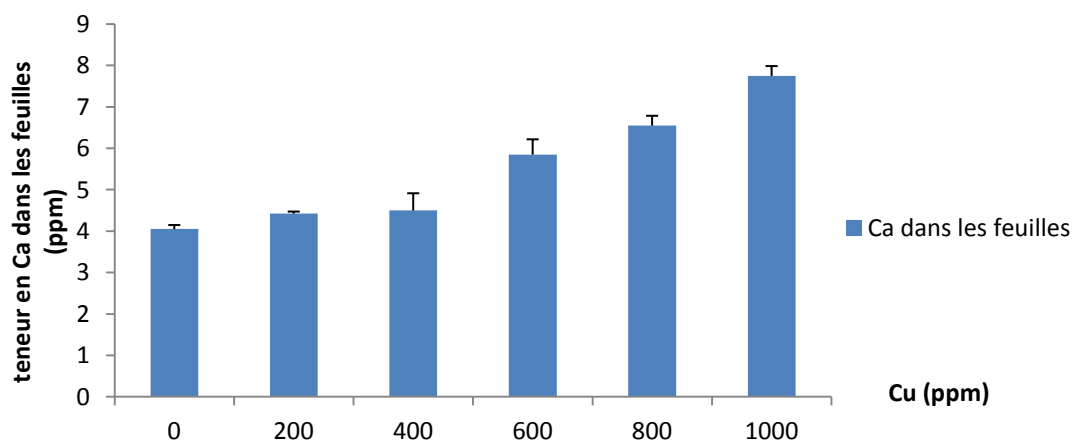


Fig.22 : l'évolution des moyennes du teneur de calcium (ppm) en fonction des doses du cuivre.

b. Discussion

A travers nos résultats et les analyses statistiques effectuées, il en ressort que :

L'accumulation de sodium dans les plantes de la fève est influencée par la présence de cuivre, et on observe une situation controversée de l'évolution de la teneur en Na entre la partie aérienne et la partie racinaire. En effet, l'application de stress métallique induit une diminution de teneur en Na, dans les feuilles et les tiges, cette diminution atteint 32,37% et 40% pour les traitements des doses 800 et 1000 ppm au niveau des tiges, et 50,61% et 62,45% dans les feuilles. Contrairement à ce qui a été trouvé dans la partie aérienne, l'application du cuivre engendre une accumulation importante de sodium dans les racines, cette accumulation

atteint son maximum au niveau des doses 800 et 1000 ppm, on affiche respectivement des taux élevés soit 62,76% et 70,62%.

L'étude de l'effet du cuivre sur l'accumulation de potassium dans la plante a permis de constater un abaissement très important des niveaux de K dans les différentes parties de la plante et surtout dans les fortes doses (800 et 1000 ppm), on enregistre respectivement des régressions de l'ordre de 71,49 et 72,54% pour les racines, 73,88 et 75,80% pour les tiges et 73,05 et 75,65% pour les feuilles.

L'exposition des plantes à différentes concentrations de cuivre induit une accumulation ascendante de la teneur en calcium dans la partie racinaire. Surtout au niveau de traitement 800 et 1000 ppm, on remarque respectivement une augmentation très importante de l'ordre de 184 et 192%. Au niveau de la partie aérienne, l'application croissante de cuivre a provoqué d'une part un abaissement de la teneur en calcium dans les tiges, en particulier en présence des concentrations de 800 et 1000 ppm, avec des taux successifs de l'ordre de 52,47 et 54,82%. Et d'autre part, l'action du cuivre se traduit par une accumulation importante de calcium au niveau des feuilles et surtout dans les mêmes doses (800 et 1000 ppm), on affiche respectivement des augmentations de l'ordre de 61,73 et 91,36 % par rapport au témoin. En comparaison de nos résultats avec celles trouvées par **(Kovacs et al, 2005)**. Il est constaté que dans les parties aériennes, le Ca décroît chez le haricot, le peuplier et le lotier ; K diminue chez le peuplier mais augmente chez le haricot. Et dans la partie racinaire, le Ca augmente chez l'haricot et peuplier. Et le Na augmente dans la partie aérienne de la tomate et diminue dans leurs parties racinaires. **(Arafet et Mona, 2013)**, ont trouvé aussi des modifications de concentration des K et Ca chez la fève (*Vicia faba.L*), la concentration de K augmente dans la partie aérienne et diminue dans la partie racinaire, tandis que le Ca diminue dans les deux parties de la fève. Ceci expliqué par l'effet antagoniste de cuivre sur l'absorption des éléments minéraux **(Bouazizi et al, 2010)**.

En présence de Cu, le prélèvement des nutriments est modifié ainsi que les concentrations dans les parties aériennes et les racines. Les effets sont variables en fonction de l'organe, de l'élément et de l'espèce **(Bes C et al, 2008)**.

Conclusion

La phytotoxicité par l'exposition au cuivre, constitue l'une des problèmes majeurs qui entravent le développement et la nutrition minérale des plantes. L'impact de ce stress se perçoit en particulier chez les plantes à utilisation agricole. Les résultats obtenus dans le présent travail, ont permis d'évaluer les effets engendrés par ce stress métallique sur le comportement morphologique et sur la mobilité des certains des éléments minérale (Na, K, Ca) chez la fève.

Les manifestations de la phytotoxicité du cuivre se résument par une diminution de la croissance de la fève, cette observation se fait progressivement avec l'augmentation de la concentration de cuivre. Pour la partie racinaire, l'effet procuré par ce stress touche beaucoup plus les plants subir la dose 1000 ppm, avec un taux de diminution qui varie entre 27% pour la longueur racinaire et 32% pour le volume racinaire. Dans la partie aérienne, les doses croissantes de Cu ont été à l'origine d'une réduction de la croissance des feuilles et des tiges, ces constatations ont été plus marquées dans la dose 400 ppm pour la longueur des tiges, soit un taux estimé à 28%. Le nombre de folioles diminue aussi 29% par rapport au témoin dans les doses 200 et 1000 ppm.

L'exposition des plantes de la fève à des doses élevées de cuivre perturbe le prélèvement des certains éléments minéraux et leurs distributions dans les différentes parties de la fève. En effet, l'intensité de stress imposé par le cuivre a provoqué une accumulation de sodium dans la partie racinaire jusqu'à un taux estimé à 70%, par contre dans la partie aérienne, le cuivre entraîne une diminution de Na dans les feuilles et les tiges, avec des taux régressifs de 62% enregistrés pour sa teneur dans les feuilles et 40% dans les tiges.

L'accumulation de potassium a été fortement inhibée suite à l'exposition au cuivre. Les résultats indiquent que l'application du cuivre s'accompagne d'une nette diminution des teneurs en K dans les racines, feuilles et tiges. Les observations indiquent que la régression de cet élément atteint jusqu'à 75% pour les tiges et les feuilles, et 72% pour les racines.

La teneur en calcium a subi une forte modification en fonction de l'accroissement des doses de cuivre appliquées. Dans la partie aérienne, on observe une situation controversée de l'accumulation de Ca entre les feuilles et les tiges, avec une élévation de sa teneur dans les limites de 91% dans les feuilles contre une diminution jusqu'à 54% dans les tiges. Dans la partie racinaire, le Ca accroit fortement pour atteindre un taux de 192%.

Enfin, il conviendrait de suivre cette étude par des travaux évaluant la localisation et la dynamique du cuivre au sein de la plante.

Référence bibliographique

(**Adriano ,2001** Copper. In: Trace elements in terrestrial environment, biogeochemistry, (**Demirevska-Kepova et al, 2004**). Biochemical changes in barley plants after excessive supply of copper and manganese. *Environmental and Experimental Botany* 52, 253-266.

Abu Amer JH ;Saoub HM,Akash MWet abdallat AM , 2011. Genetic and phenotypic variation among faba bean landraces and cultivars.international, journal of vegetable science, 17 :21-25 .

and on photosynthesis of mature and expanding leaves in cucumber plants. *PlantScience* 163, 53-58.

Aouar –Sadli M , Louadik,2008. Pollination of the broad bean (*vicia faba*L Var.major) by wild bees and honey bees and its impact on the seed production in the tizi –ouzou area (Algeria). *African journal of agricultural Research* 3 (4) : 266-272 .

Arafat et Mona , 2013.

Archambault DJ & K Winterhalder. 1995. Metal Tolerance in *Agrostis-Scabra* from the Sudbury, Ontario, Area. *Canadian Journal of Botany-Revue Canadienne De*

BENOUISS Sliman, 2012. Contribution à l'étude de l'effet des métaux lourds (Cuivre) sur les caractéristiques biométriques et chimiques de la fève (*Vicia faba.L*).

bioavailability of copper for lettuce sprouts. *Environment International* 31, 603-608.

bioavailability, and risks of metal, 2nd Edition, pp. 499–546

Biogeochemistry of Trace Elements, 11-15th July 1999, Vienna, Austria

*Botanique*73, 766-775

Cetois A, Quesnoit M and Hinsinger P, 2003 .Soil copper mobility and bioavailability

Charles Marie Evrard, 2003. *Physiologie végétale* édition de boeck.

CHAUX et FOURY, 1994. Productions légumière sec. Légumineuses potagère. Tome 3 .technique et documentation Lavoisier .p 7-13

Chen et al, 2005. Effect of copper-tolerant rhizosphere bacteria on mobility of copper in soil and copper accumulation by *Elsholtzia splendens*. *Environment International* 31, 861-866.

Cook CM ; A Kostidou ; E Vardaka & T Lanaras. 1997. Effects of copper on the growth, photosynthesis and nutrient concentrations of *Phaseolus* plants. *Photosynthetica* 34.

Cuypers A, 2000. Phytotoxic concentrations of copper and zinc induce antioxidative defence in *Phaseolus vulgaris*, cv. Limburgse vroege: a comparative study. *Limburgs*

Référence bibliographique

universitair centrum, Diepenbeek, Belgium.*it. Dehan., Montpellier, 153-198 p review, 110p .*

D. Souguir, P. Goupil, E. Ferjani et G. Ledoigt ,2009. *Étude et Gestion des*

DELAS J., 2000. Fertilisation de la vigne. *Édit. Féret., Bordeaux, 21-80 p.*

Demirevska-Kepova KL; Simova-Stoilova Z; Stoyanova R; Holzer U; Feller, 2004. Biochemical changes in barley plants after excessive supply of copper and manganese. *Environmental and Experimental Botany 52, 253-266*

Foltete AS, 2010. Effets génotoxiques et systèmes de détoxification chez *Vicia faba* (Fabaceae) dans le cadre de l'évaluation des sols pollués. Thèse de doctorat, Université Paul Verlaine – Metz, p245.

Fuentes D ; KB Disante, ; A Valdecantos ; J Cortina & VR Vallejo, 2007. Sensitivity of Mediterranean woody seedlings to copper, nickel and zinc. *Chemosphere 66, 412-420.*

Gallais A ; Bannerot H, 1992. Amélioration des espèces végétales cultivées: objectifs et critères de sélection. Paris: INRA.

Gepts P ,Young ND, 2005. Legumes as a model plant family.Genomics for food and feed report of the cross legume advances through genomics conference.plant physiologie.137 :1228-1235.

Guignard JL., 1998. Biochimie végétale, molécules de la croissance .p 234.

Hall, 2002. Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance. *Journal of experimental botany 53, 1-11.*

HELLER R., ESNAULT C. et LANCE C., 1998. Physiologie végétale 1. Nutrition. Édit. Dunod., Paris, 111 p.

HUIGNARD et al, 2011. Insectes ravageurs des graines de légumineuses : Biologie des Bruchinae et lutte raisonnée en Afrique.

Inaba S & C Takenaka, 2005. Effects of dissolved organic matter on toxicity

Jean François Mort - Gaudry, 2012. Biologie végétale Nutrition et métabolismes.

Jean-Claude Amiard, 2011. Les risques chimiques environnementaux édition Lavoisier

JIANG et DEYHOLOS, 2006. Comprehensive transcriptional profiling of NaCl-stressed *Arabidopsis* roots reveals novel classes of responsive genes. *BMC Plant Bio, p. 6-25.*

Juste C ; Chassin P ; Gomez A ; Linères M. ; Mocquot B., Feix I. and Wiart J, 1995. Les micropolluants métalliques dans les boues résiduaires des stations d'épuration urbaines, Ademe, Angers, 209pp.

KAURS; PAULJ, 2012. Transcriptome sequencing of field pea and faba bean for

Référence bibliographique

discovery and validation of SSR genetic markers, *BMC Genomics* 13 :104.

Kopittke PM; Asher CJ; Kopittke RA; Menzies; NW, 2007a. Toxic effects of Pb on growth of cowpea (*Vigna unguiculata*). *Environmental Pollution* 150, 280-287.

Kovacs et al, 2005. Protective effects of phosphonomethyl- sarcosine against the copper and poplar.

Lafon J.P., Tharaud ;Prayer C., Levy G, 1996. *Biologie des Plantes Cultivées.*

LAZREK BEN- FRIHA ,2008. Analyse de la diversité génétique et symbiotique des populations naturelles tunisiennes de *medicago truncatula* et recherche de QTL liés au stress salin. Thèse de doctorat en Biologie, université de Toulouse III.18p.

LME, 2008. London Metal Exchange. 2008. <http://lme.co.uk>.

Lou et al, 2004. The copper tolerance mechanisms of *Elsholtzia haichowensis*, a plant from copper-enriched soils. *Environmental and Experimental Botany* 51, 111-120.

Lydie Suty, 2014. Les végétaux évolution développement et reproduction.

Marschner, 1995. *Mineral Nutrition of Higher Plants*, 2nd edn. London, UK, Academic Press. 889 p.

Mc Bride, 1989. Reactions controlling heavy metal solubility in soils.- *Advances in*

Michaud et al, 2008. Copper phytotoxicity affects root elongation and iron nutrition in durum wheat (*Triticum turgidum durum* L.). *Plant and Soil* 310, 151-165.

nonmetal tolerant cultivars of *Agrostis capillaris* L. *Soil Technology* 6, 163-171.

PERONJ-Y, 2006. *Référence production légumière .2^{ème} ED .DUC, paris, 613p* publishing, Australia, 572pp.

Ratnikov AN ; DG Sviridenko ; TL Zhigareva & GI Popova, 2005. Effects of heavy metals and organic fertilisers on a biological activity of soddy-podzolic soil and yield of barley. In H.-K. Galazka, editor. *Current developments in remediation of. contaminated lands*, Pulawy, Poland

Raven et al, 2008. *Biologie végétale* édition de Boeck.

Reuter et Robinson, 1997. *Plant analysis : an interpretation manual.*- CSIRO

Sang and Li ,2004. . Genotoxicity of municipal landfill leachate on root tips of *Vicia faba*. *Mutat. Res.-Genet. Toxicol. Environ. Mutag.* 560(2):159-165.

Simmons JA ; WS Currie, KN Eshleman ; K Kuers, S Monteleone ; TL Negley, BR Pohlrad & CL Thomas. 2008. Forest to reclaimed mine land use change leads to altered ecosystem structure and function. *Ecological Applications* 18, 104-118.

Référence bibliographique

Soil Science, 10 : 1-56. *Sols*, Volume 16, 3/4, pages 339 à 347

Sylvie Meyer ,2013 . Botanique Biologie et physiologie végétale.

Thorntor I, 1999. *Bioavailability of trace elements in the food chain.*- In : Wenzel

Vinit-Dunand et al, 2002. Effects of copper on growth

Wang H-F ;Zong x ;,Yang T ,2012. Genetic diversity and relationship of global faba bean (*vicia faba.l*) germplasm revealed by ISSR markers. *Theor APPL Genet* .124 :789-797

Whiteley GM & S Williams. 1993. Effects of treatment of metalliferous mine spoil with lignite derived humic substances on the growth-responses of metal tolerant and

Wong MH, 2003. Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soils. *Chemosphere* 50, 775-780.

ZAIDIA et MAHIOUTB, 2012. Voyage au cœur des aliments. 200 p.

Annexe 1 :

Analyse de variance de la longueur des tiges.

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	731,958	23	31,824				
VAR.FACTEUR 1	480,708	5	96,142	6,888	0,00099		
VAR.RESIDUELLE 1	251,25	18	13,958			3,736	8,16%

Comparaison de moyennes de la longueur des tiges (Test de NEWMAN-KEULS-SEUIL=5%)

F1	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES		
1.0	F1n1	53	A		
5.0	F1n5	47	A	B	
4.0	F1n4	46,75	A	B	
6.0	F1n6	45,5		B	
2.0	F1n2	44,75		B	
3.0	F1n3	37,75			C

Analyse de variance de nombre des folioles.

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	2042,958	23	88,824				
VAR.FACTEUR 1	796,208	5	159,242	2,299	0,08771		
VAR.RESIDUELLE 1	1246,75	18	69,264			8,322	20,44%

Analyse de variance de volume racinaire.

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	79,833	23	3,471				
VAR.FACTEUR 1	26,833	5	5,367	1,823	0,15851		
VAR.RESIDUELLE 1	53	18	2,944			1,716	15,03%

Analyse de variance de la longueur des racines.

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	135,125	23	5,875				
VAR.FACTEUR 1	118,875	5	23,775	26,335	0		
VAR.RESIDUELLE 1	16,25	18	0,903			0,95	5,03%

Comparaison de moyennes de la longueur des racines (Test de NEWMAN-KEULS-SEUIL=5%).

F1	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES		
1.0	F1n1	23	A		
2.0	F1n2	20,5		B	
3.0	F1n3	18,5			C
4.0	F1n4	17,5			C
6.0	F1n6	17			C
5.0	F1n5	16,75			C

Annexe 2 :

Analyse de variance de la teneur en sodium dans les racines.

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	69911,63	23	3039,636				
VAR.FACTEUR 1	68930,88	5	13786,17	253,022	0		
VAR.RESIDUELLE 1	980,75	18	54,486			7,381	2,60%

Annexe

Comparaison de moyennes de la teneur en sodium dans les racines (Test de NEWMAN-KEULS-SEUIL=5%).

F1	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES						
6.0	F1n6	352,75	A						
5.0	F1n5	336,5		B					
4.0	F1n4	309,75			C				
3.0	F1n3	261,75				D			
2.0	F1n2	232,75					E		
1.0	F1n1	206,75							F

Analyse de variance de la teneur en sodium dans les tiges.

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	48538,96	23	2110,39				
VAR.FACTEUR 1	48150,71	5	9630,143	446,472	0		
VAR.RESIDUELLE 1	388,25	18	21,569			4,644	1,72%

Comparaison de moyennes de la teneur en sodium dans les tiges (Test de NEWMAN-KEULS-SEUIL=5%).

F1	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES						
1.0	F1n1	345,25	A						
2.0	F1n2	300		B					
3.0	F1n3	275,5			C				
4.0	F1n4	256,75				D			
5.0	F1n5	233,5					E		
6.0	F1n6	207,25							F

Analyse de variance de la teneur en sodium dans les feuilles.

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	36832	23	1601,391				
VAR.FACTEUR 1	36810	5	7362,001	6023,456	0		
VAR.RESIDUELLE 1	22	18	1,222			1,106	0,88%

Comparaison de moyennes de la teneur en sodium dans les feuilles (Test de NEWMAN-KEULS-SEUIL=5%).

F1	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES						
1.0	F1n1	183,75	A						
2.0	F1n2	159,5		B					
3.0	F1n3	137,75			C				
4.0	F1n4	115,25				D			
5.0	F1n5	90,75					E		
6.0	F1n6	69							F

Analyse de variance de la teneur en potassium dans les racines.

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	23658	23	1028,609				
VAR.FACTEUR 1	23455	5	4691	415,951	0		
VAR.RESIDUELLE 1	203	18	11,278			3,358	5,37%

Comparaison de moyennes de la teneur en potassium dans les racines (Test de NEWMAN-KEULS-SEUIL=5%).

F1	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES						
1.0	F1n1	119,25	A						
2.0	F1n2	79		B					
3.0	F1n3	71,75			C				
4.0	F1n4	38,25					D		
5.0	F1n5	34					D		
6.0	F1n6	32,75					D		

Analyse de variance de la teneur en potassium dans les tiges.

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	40852,96	23	1776,216				
VAR.FACTEUR 1	40778,71	5	8155,742	1977,15	0		
VAR.RESIDUELLE 1	74,25	18	4,125			2,031	2,45%

Annexe

Comparaison de moyennes de la teneur en potassium dans les tiges (Test de NEWMAN-KEULS-SEUIL=5%).

F1	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES			
1.0	F1n1	156	A			
2.0	F1n2	113		B		
3.0	F1n3	77,25			C	
4.0	F1n4	73				D
5.0	F1n5	40,75				E
6.0	F1n6	37,75				E

Analyse de variance de la teneur en potassium dans les feuilles.

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	41791,33	23	1817,014				
VAR.FACTEUR 1	41577,33	5	8315,467	699,432	0		
VAR.RESIDUELLE 1	214	18	11,889			3,448	3,86%

Comparaison de moyennes de la teneur en potassium dans les feuilles (Test de NEWMAN-KEULS-SEUIL=5%).

F1	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES			
1.0	F1n1	154	A			
2.0	F1n2	113,5		B		
3.0	F1n3	112		B		
4.0	F1n4	77,5			C	
5.0	F1n5	41,5				D
6.0	F1n6	37,5				D

Analyse de variance de la teneur en calcium dans les racines.

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	33,09	23	1,439				
VAR.FACTEUR 1	32,977	5	6,595	1055,274	0		
VAR.RESIDUELLE 1	0,112	18	0,006			0,079	3,05%

Annexe

Comparaison de moyennes de la teneur en calcium dans les racines (Test de NEWMAN-KEULS-SEUIL=5%).

F1	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES			
6.0	F1n6	3,65	A			
5.0	F1n5	3,55	A			
4.0	F1n4	3,225		B		
3.0	F1n3	2,825			C	
2.0	F1n2	2,075				D
1.0	F1n1	0,25				E

Analyse de variance de la teneur en calcium dans les tiges.

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	18,04	23	0,784				
VAR.FACTEUR 1	16,68	5	3,336	44,153	0		
VAR.RESIDUELLE 1	1,36	18	0,076			0,275	10,18%

Comparaison de moyennes de la teneur en calcium dans les tiges (Test de NEWMAN-KEULS-SEUIL=5%).

F1	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES			
1.0	F1n1	4,25	A			
2.0	F1n2	3,2		B		
3.0	F1n3	2,775			C	
5.0	F1n5	2,025				D
4.0	F1n4	2,025				D
6.0	F1n6	1,925				D

Analyse de variance de la teneur en calcium dans les feuilles.

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	43,48	23	1,89				
VAR.FACTEUR 1	42,172	5	8,434	116,114	0		
VAR.RESIDUELLE 1	1,307	18	0,073			0,27	4,88%

Comparaison de moyennes de la teneur en calcium dans les feuilles (Test de NEWMAN-KEULS-SEUIL=5%).

F1	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES			
6.0	F1n6	7,75	A			
5.0	F1n5	6,55		B		
4.0	F1n4	5,85			C	
3.0	F1n3	4,5				D
2.0	F1n2	4,425				D
1.0	F1n1	4,05				D

Abstract

Copper is an essential oligoelement for the plants nutrition, phototoxic at very high concentration. The contamination of soil by copper is present when anthropogenic inputs are important. It means that when its content in soil is higher at pedogeochemical bottom, it causes an increase of impacts risks to the environment.

The phytotoxicity of copper is translated by a decrease of the total biomass of the plant and a disturbance of the mineral nutrition of the plants by the modification of the mineral elements concentration in the aerial and root parts.

The aim of our work is to follow the behavior of the bean (*Vicia faba* L) in front of the metallic stress induced by copper, by the evaluation of the effects procured by this stress on the morphological settings and on the mobility of the mineral elements Na^+ , K^+ and Ca^{++} in different parts of the plant.

The study was conducted on variety of bean, Sidi Aich; the germinated seeds have been planted in pots containing soils contaminated by different concentrations of copper sulfate. (0, 200, 400, 600, 800, 1000 ppm).

The results show that the presence of copper at high concentrations causes a decrease of the morphological settings of bean and provokes modifications of the concentrations of Na^+ , K^+ and Ca^{++} in the different organs of the bean. These observations have been particularly reported on plants submitted to a dose of 1000 ppm.

Key words : phytotoxicity, copper, morphology, mobility, Na^+ , K^+ , Ca^{++} , *Vicia faba* L .

لمخص:

النحاس هو احد العناصر الأساسية في تركيب غني النباتات التي تحدثتس مفيد لتلقيح الفهرط لم يحدثتبل وتلوتب قبلنحاس عن استعمل مقلراط من طرف الانسان مملي عن أن مضوا فليلتتب فيكونكابر ممتض في ان سبالي دولي يظني العاية ، مما يؤدي الى تلوث اعني خطورتلوث البيئية .

تسهم النباتات يودي الى تلوث اضفيا كالتلوة لاجيوية وفضطراب في التغيمة المعني النباتات عن طريق تغني رتلوي العنصر المعني الوجود في لاجزاء الخضري ولجذري .

هدف عننا هو مراقبش لوك الفول (*Vicia faba.L*) التي تواجه الإجهادالعدني لالنتج عن النحاس وهذبتقويمن الآثار النتجة عن هذا الإجهاد لغني للضائص للورفول وحيوية وغي حركية العنصر المعني ، الصويوم ، النحاسيوم والظليسيوفي أجزاء ختفاقلهتة .

أجينا واسة لغني الفول من نوع " S cdchci A " لنتتمثل هذه الدرلن في زرع نورفي أولي ملوء قبلتظني فاختفة مكثب ريتات النحاس ($Cu SO_4 \cdot 5H_2O$) 0,000,000,000,000,0000 (جزء منال مليون .

وأظمرت التلج أن وجودالنحاس لتلقيح زيكي يودي الى تلوث اضفيا للضائص للورفول وحيوية الم دروسة لغني ونوع الفول " S cdchci A " واحدثغني راتفي تلقيح الصويوم ، النحاسيوم والظليسيوفي مضاف أعضاء الفول والألخص عن البهتاتال معروض لجرعات من 0000 جزء منال مليون .

الكلمات فحتحية: النحاس، الفول، تسهم النبات، للضائص للورفول وحيوية ، حركية المعدن، الصويوم ، النحاسيوم والظليسيوم

Résumé

Le cuivre est un oligoélément essentiel à la nutrition des plantes, phytotoxique en trop forte concentration. La contamination d'un sol par le cuivre est présente lorsqu'il y a des apports anthropiques importants. C'est-à-dire quand sa teneur dans le sol est supérieure au fond pédogéochimique, il entraîne une augmentation des risques d'impacts pour le milieu.

La phytotoxicité du cuivre se traduit par une diminution de la biomasse totale de la plante et une perturbation de la nutrition minérale des plantes par la modification de la concentration des éléments minéraux dans la partie aérienne et racinaire.

Notre objectif de travail est de suivre le comportement de la fève (*Vicia faba.L*) face au stress métallique induit par le cuivre, en évaluant les effets procurés par ce stress sur les paramètres morphologiques et sur la mobilité des éléments minéraux Na^+ , K^+ et Ca^{++} dans les différentes parties de la plante.

L'étude a été menée sur une variété de la fève, Sidi Aich ; les graines germées ont planté dans des pots contenus des sols contaminés par différentes concentrations du sulfate de cuivre ($\text{CuSO}_4, 5\text{H}_2\text{O}$), 0, 200, 400, 600,800 et 1000 ppm.

Les résultats montrent que la présence du cuivre en forte concentration entraîne une diminution des paramètres morphologiques de la fève, et provoque des modifications des concentrations de Na^+ , K^+ et Ca^{++} dans les différents organes de la fève. Ces observations sont touchées en particulier les plantes soumises a la dose 1000 ppm.

Mots clé : cuivre, *Vicia faba. L*, phytotoxicité, paramètres morphologiques, concentration de Na, K et Ca