

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Centre Universitaire – Salhi Ahmed – Naâma

Institut des Sciences et de Technologie

Département des Sciences de la Nature et de la Vie

Laboratoire de recherche :



Gestion durable des ressources naturelles dans les zones arides et semi-aride

## MEMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de

**MASTER Académique**

En Sciences Biologiques

Spécialité : **Biodiversité et physiologie végétale**

Présenté Par :

**M<sup>r</sup>. Bakirat Said Benziane**

**M<sup>r</sup>. Hanchour Abdel Aziz**

**Thème**

---

**Effet du cuivre sur le comportement de la fève**

**(*Vicia faba* L.)**

---

Soutenu le : 07-07-2022

Devant le jury :

Président : M<sup>r</sup>. Ferrah Nacer

MCA, Centre Universitaire de NAAMA

Examineur : M<sup>r</sup>. Benaradj Abdelkarime

MCA, Centre Universitaire de NAAMA

Encadreur : M<sup>r</sup>. Benouis Sliman

Attaché de recherche, Centre de recherche scientifique et technique sur les régions Arides de Biskra- Station de Naâma

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## Résumé

Le cuivre est un élément essentiel à la croissance des plantes. Il est impliqué dans de nombreuses fonctions physiologiques cellulaires de la plante, telles que le transport d'électrons, la respiration, la photosynthèse et le métabolisme des parois cellulaires. Un excès de cuivre dans le sol peut perturber la croissance des plantes et peut provoquer des effets négatifs sur la physiologie des plantes. L'objectif de ce travail est l'étude de l'effet du cuivre sur le comportement de la fève (*Vicia faba* L.). À cet effet, deux variétés de la fève (Boussabaa et Sidi Aich) sont cultivées dans un substrat composé de sable et de terreau (3v/1v) et contaminé par des différentes doses de cuivre (0, 300, 600 et 900 ppm) sous forme de  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ . Les plantes sont soumises au stress métallique pendant 70 jours.

Les résultats obtenus ont montré que l'excès de cuivre dans le substrat de culture affecte la croissance de la fève, provoquant une inhibition des processus de la germination (taux d'imbibition et élongation radiculaire), des diminutions sur les paramètres morphologiques (réduction du nombre des feuilles, hauteur des tiges et volume racinaires) et les paramètres physiologiques (teneur relative en eau et teneurs en chlorophylle). De plus, les comportements anatomiques ont montré une diminution du nombre de faisceaux cribro-vasculaires comparativement aux témoins.

L'excès de cuivre dans le milieu de culture provoque une phytotoxicité sur la fève, où les doses appliquées sont à l'origine des altérations morpho-physiologiques et anatomiques de la fève.

**Mots clé :** Cuivre, *Vicia faba*, sol, germination, morphologiques, physiologiques, anatomiques, phytotoxicité.

## Abstract

Copper is an essential element for plant growth. It is involved in many plant cellular physiological functions, such as electron transport, respiration, photosynthesis and cell wall metabolism. Excess copper in the soil can disrupt plant growth and can cause negative effects on plant physiology. The objective of this work is the study of the effect of copper on the behavior of the faba bean (*Vicia faba* L.). For this purpose, two varieties of faba bean (Boussabaa and Sidi Aich) were grown in a substrate composed of sand and potting soil (3v/1v) and contaminated with different doses of copper (0, 300, 600 and 900 ppm) in the form of  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ . Plants were subject to metal stress for 70 days.

The results obtained showed that the excess of copper in the culture substrate affects the growth of the faba bean, causing an inhibition of the germination processes (imbibition rate and root elongation), decreases on morphological parameters (reduction of the number of leaves, stem height and root volume) and physiological parameters (relative water content and chlorophyll contents). In addition, anatomical behaviors showed a decrease in the number of cribro-vascular bundles compared to controls.

Excess copper in the culture medium causes phytotoxicity on the faba bean, or the applied doses cause morpho-physiological and anatomical alterations of the faba bean.

**Key words:** Copper, *Vicia faba*, soil, germination, morphological, physiological, anatomical, phytotoxicity.

## ملخص

النحاس هو عنصر أساسي لنمو النبات. يدخل في العديد من الوظائف الفسيولوجية والخلوية للنبات، مثل عملية النقل الإلكتروني، التنفس، التمثيل الضوئي واستقلاب جدار الخلية. يمكن أن يعطل النحاس الزائد في التربة نمو النبات وأن يكون له آثار سلبية على فسيولوجيا النبات. الهدف من هذا العمل هو دراسة تأثير النحاس على سلوك الفول (*Vicia faba* L.). لهذا الغرض، تم زراعة صنفين من الفول (بوسبعة وسيدي عيش) في تربة مكونة من الرمل وسماد عضوي (3حجم/1حجم) وملوثة بجرعات مختلفة من النحاس (0، 300، 600 و900 جزء في المليون) على شكل  $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ . تعرضت النباتات لإجهاد معدني لمدة 70 يوماً.

أظهرت النتائج المتحصل عليها أن زيادة النحاس في الوسط الزراع يؤثر على نمو الفول، مما يؤدي إلى تثبيط عملية الإنبات (معدل التشرب واستطالة الجذر)، ونقص المعلمات المورفولوجيا (انخفاض في عدد الأوراق، طول الساق وحجم الجذر) والمعلمات الفسيولوجية (المحتوى النسبي للمياه والكلوروفيل). بالإضافة إلى ذلك، أظهرت السلوكيات التشريحية انخفاضاً في عدد حزم الأوعية الناقلة في الساق مقارنةً بالشواهد. تسبب زيادة النحاس في وسط الاستزراع في حدوث سمية نباتية للفول، إذ أن الجرعات المطبقة سببت تغيرات مورفولوجية-فيزيولوجية وتشريحية للفول.

**الكلمات المفتاحية:** نحاس، *Vicia faba*، تربة، إنبات، مورفولوجيا، فسيولوجية، تشريحية، سمية نباتية.

## *Remerciements*

*Avant tout, nous remercions "Allah" qui a illuminé notre chemin et qui nous a aidé et nous a donné le courage pour achever nos études.*

*Nous remercions plus particulièrement : Nos **parents** et notre **famille** de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience de réaliser ce modeste travail.*

*Nous remercions fortement notre encadreur **Mr. Benouis Sliman** qu'a accepté de nous encadrer, et aussi pour l'aide qu'il nous a offert durant la période de réalisation de ce travail et encore pour sa confiance et ses encouragements.*

*Nous remercions Les membres de jury **Mr. Ferrah Nacer** et **Mr. Benaradj Abdelkarime** pour avoir accepté d'évaluer notre travail.*

*Nous remercions chaleureusement mes enseignant(e)s : **Mr. Ziani, Mr. Dredour, M<sup>dm</sup>. Issaoui**, et mes collègues : **Sadok Soufiane, Reggad Lilia, Neki Manel, La Miff**, et Tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire.*



## Dédicace

Je dédie ce travail à : Mes très chers parents que Dieu les protège.

Papa Toumi, il m'a toujours encouragé et soutenu motivé dans mes études. Grâce à son effort et son don que je suis arrivé jusqu' ici.

Mama Fadila, qui est la lumière de ma vie, et qui a attendu avec Patience le fruit de sa bonne éducation. C'est grâce à elle et grâce à ses sacrifices que je suis là aujourd'hui.

Merci pour votre soutien continu.

À Mes chers et adorables frères surtout Mohammed, Ali, Adel, Baker, Moustapha, T. Ibrahim, Soufiane, Saïd et mes sœurs surtout Sabah, Nadjat, Houria, Aïcha, Malika, R. Yousra, N. Manel.

À toute la famille HANCHOUR TAIB.

À tous Mes amis, À mes collègues

À tous ceux qui me sont chères sans exception.

Aziz



## Dédicace

*Je dédie ce modeste travail à mes chers parents pour la patience et l'encouragement qu'ils ont constamment montré.*

*Merci ma très chère mère et mon très cher père.*

*A tout ma famille.*

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

*Mes très chères frères et sœurs : Mohammed 'Sofi 'Lilya' Manel ' et mon binôme Aziz.*

*Mes très chères et meilleures amies : La miff (Aziz'*

*Soufiane 'Abelfettah 'Abdelwahab 'Yacine 'Walid'*

*Ibrahim 'Sekoura 'Hassna 'Ikram). Et Groupe Vu : (Ali' Baker 'Mustapha 'Adel).*

*A tous ceux que j'aime, ceux qui m'aiment et me respectent de près ou de loin. A tous ceux qui j'ai omis involontairement de citer.*

*En souvenir des moments heureux passés ensemble, avec mes vœux sincères de réussite, bonheur, santé et de prospérité.*

*Said*



## Liste des figures

- Figure 01** : Classification périodique des éléments.
- Figure 02** : Source naturel et anthropique du cuivre dans l'environnement.
- Figure 03** : Phases porteuses de cuivre dans le sol.
- Figure 04** : Mobilité de cuivre dans le sol.
- Figure 05** : Facteurs chimiques gouvernant la disponibilité environnementale de Cu.
- Figure 06** : Croissance des plantes en fonction des différents niveaux de cuivre.
- Figure 07** : Différentes parties morphologiques de la fève *Vicia faba* L.
- Figure 08** : Cycle de développement de la fève.
- Figure 09** : Serre automatisée de centre universitaire de Naama.
- Figure 10** : Deux variétés locales de la fève (*Vicia faba* L.) (A) **Boussabaa**, (B) **Sidi Aich**.
- Figure 11** : Germination des graines de *Vicia faba* dans différentes concentrations de cuivre.
- Figure 12** : Stades de germination des grains de *Vicia faba* L.
- Figure 13** : Préparation de substrat de culture utilisé dans l'expérimentation. (A) Tamisage, (B) lavage, (C) séchage, (D) préparation de substrat de culture.
- Figure 14** : Installation des cylindres dans la serre.
- Figure 15** : Plantation des graines germées.
- Figure 16** : Application du stress métallique.
- Figure 17** : Dispositif expérimental.
- Figure 18** : Chlorophylle mètre CCM-200plus.
- Figure 19** : Coupe anatomique sur la tige de la fève (faisceaux cribro-vasculaires) (A) **Boussabaa**, (B) **Sidi Aich**.
- Figure 20** : Schéma général de protocole expérimental.
- Figure 21** : Effet du cuivre sur l'évolution du taux d'imbibition en fonction du temps (heures) chez les deux variétés de la fève.
- Figure 22** : Effet du cuivre sur l'évolution de la longueur des racicules en fonction du temps (jours) chez les deux variétés étudiées.
- Figure 23** : Effet du cuivre sur la longueur de racicule finale des deux variétés de la fève.
- Figure 24** : Effet du cuivre sur le nombre de feuilles des deux variétés de la fève.
- Figure 25** : Effet du cuivre sur la hauteur de la tige des deux variétés de la fève.
- Figure 26** : Effet du cuivre sur le volume racinaire des deux variétés de la fève.
- Figure 27** : Effet du cuivre sur la teneur relative en eau (%) des deux variétés de la fève.
- Figure 28** : Effet du cuivre sur la teneur en chlorophylle des deux variétés de la fève.

**Figure 29 :** Effet du cuivre sur le nombre de faisceaux cribro-vasculaires des deux variétés de la fève

## Liste des tableaux

**Tableau 01** : Principales caractéristiques physiques du cuivre.

**Tableau 02** : Concentrations du cuivre dans l'environnement

**Tableau 03** : Valeurs nutritives de la fève (*Vicia faba* L.) pour 100 g de graines sèches.

**Tableau 04** : Classification de la fève (*Vicia faba* L.).

**Tableau 05** : Composition chimique de la fertilisante « Actifeg ».

**Tableau 06** : Dispositif expérimental adopté.

**Tableau 07** : Analyse de la variance des paramètres étudiés.

**Tableau 08** : Longueur des racicules finales (cm) deux variétés de *Vicia faba* L. exposés au cuivre.

**Tableau 09** : Nombre de feuilles des deux variétés de *Vicia faba* L. exposés au cuivre.

**Tableau 10** : Hauteur de la tige (cm) des deux variétés de *Vicia faba* L. exposés au cuivre.

**Tableau 11** : Volume racinaire (ml) des deux variétés de *Vicia faba* L. exposés au cuivre.

**Tableau 12** : Teneur relative en eau en (%) des deux variétés de *Vicia faba* L. exposés au cuivre.

**Tableau 13** : Teneur en chlorophylle des deux variétés de *Vicia faba* L. exposés au cuivre.

**Tableau 14** : Nombre de faisceaux cribro-vasculaires des deux variétés de *Vicia faba* L. exposés au cuivre.

## Liste des abréviations

|  |   |
|--|---|
| <b>B:</b> Bore.  | <b>Mn:</b> Manganèse.   |
| <b>B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:</b> Trioxyde de bore.                       | <b>Mo:</b> Molybdène.   |
| <b>Cd :</b> Cadmium.   | <b>N°:</b> Numéro.  |
| <b>Cd(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> :</b> Nitrate de cadmium.                | <b>N:</b> Azote.  |
| <b>Cl :</b> Chlore.  | <b>ng/m<sup>3</sup>:</b> Nano gramme par mètre cube.              |
| <b>COPT :</b> Copper Transporter.  | <b>P:</b> Phosphore.  |
| <b>CTR :</b> Conserved Copper Transporter.                                 | <b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:</b> Pentoxyde de phosphore.        |
| <b>Cu :</b> Cuivre.  | <b>PF:</b> Poids frais.   |
| <b>CUN :</b> Centre Universitaire de Naâma.                                | <b>PH :</b> Potentiel hydrogène.                                  |
| <b>Cu SO<sub>4</sub> :</b> Sulfate de cuivre.                              | <b>Ppm, p.p.m :</b> Partie par million.                           |
| <b>CuSO<sub>4</sub>.5H<sub>2</sub>O :</b> Sulfate de cuivre penta hydraté. | <b>PS :</b> Poids sec.  |
| <b>ETM :</b> Eléments traces métalliques.                                  | <b>PS I :</b> Photosystème I.                                     |
| <b>Fe :</b> Fer.   | <b>PS II :</b> Photosystème II.                                   |
| <b>Fig. :</b> Figure.  | <b>PT :</b> Poids de la pleine turgescence.                       |
| <b>g/l:</b> Gramme par litre   | <b>ROS, ERO :</b> Réactives dérivées de l'oxygène.                |
| <b>g.mol<sup>-1</sup> :</b> Gramme par mol.                                | <b>RWC, TRE :</b> Relative water content, contenu relatif en eau. |
| <b>g/cm<sup>-3</sup> :</b> Gramme par centimètre cube.                     | <b>S:</b> Soufre.   |
| <b>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> :</b> Peroxyde d'hydrogène.                  | <b>S.M<sup>-1</sup> :</b> Siemens par mètre.                      |
| <b>HPO<sub>4</sub><sup>2-</sup>:</b> Hydrogène phosphate.                  | <b>T° :</b> Température.  |
| <b>IB:</b> Numéro 11 dans le tableau périodique.                           | <b>Zn :</b> Zinc.   |
| <b>K :</b> Potassium.  |   |
| <b>m<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup> :</b> Watt par mètre-kelvin.               |   |
| <b>µg.l<sup>-1</sup>:</b> Microgramme par litre.                           |   |
| <b>µMol :</b> Micromole.   |   |
| <b>µmol / m<sup>2</sup> :</b> Micromole par mètre carré.                   |   |
| <b>µm:</b> Micromètre.   |   |
| <b>mg.kg<sup>-1</sup> :</b> Milligramme par kilogramme.                    |   |
| <b>Mg :</b> Milligramme.   |   |
| <b>MgO :</b> Oxyde de magnésium.   |   |
| <b>Mm :</b> Millimètre.  |   |
| <b>mM :</b> milli molaire.   |   |

# Sommaire

|                            |   |
|----------------------------|---|
| Résumé                     |   |
| Abstract                   |   |
| ملخص                       |   |
| Remerciements              |   |
| Dédicace                   |   |
| Dédicace                   |   |
| Liste des figures          |   |
| Liste des tableaux         |   |
| Liste des abréviations     |   |
| Introduction générale..... | 1 |

## Partie I Synthèse bibliographique

### Chapitre I Généralité sur le cuivre

|   |           |
|---|-----------|
| <b>I.1. Généralité .....</b>                                | <b>3</b>  |
| <b>I.3. Caractéristiques physico-chimiques.....</b>         | <b>4</b>  |
| <b>I.4. Origine .....</b>                                   | <b>5</b>  |
| I.4.1. Origines naturelles .....                            | 5         |
| I.4.2. Origines anthropiques .....                          | 5         |
| <b>I.5. Niveau du cuivre dans l'environnement .....</b>     | <b>6</b>  |
| <b>I.6. Cuivre dans le sol.....</b>                         | <b>7</b>  |
| I.6.1. Mobilité du cuivre dans le sol.....                  | 8         |
| I.6.2. Biodisponibilité du cuivre.....                      | 9         |
| I.6.3. Facteur de biodisponibilité.....                     | 9         |
| <b>I.7. Cuivre dans la plante.....</b>                      | <b>10</b> |
| I.7.1. Absorption du cuivre .....                           | 11        |
| I.7.2. Translocation du cuivre .....                        | 11        |
| I.7.3. Rôle du cuivre .....                                 | 12        |
| I.7.4. Carence du cuivre .....                              | 12        |
| I.7.5. Toxicité du cuivre .....                             | 13        |
| I.7.6. Effet du cuivre sur la morphologie des plantes.....  | 13        |
| <b>a) La partie racinaire .....</b>                         | <b>13</b> |
| <b>b) La partie aérienne .....</b>                          | <b>13</b> |
| I.7.7. Effet du cuivre sur la physiologie des plantes ..... | 14        |
| I.7.8. Effet du cuivre sur la germination des plantes.....  | 14        |
| I.7.9. Production des ROS.....                              | 14        |

## Chapitre II généralité sur *Vicia faba* L.

|  |           |
|--|-----------|
| <b>II.1. Généralités .....</b>                   | <b>16</b> |
| II.1.1. Production mondiale.....                 | 16        |
| II.1.2. Valeurs nutritives.....                  | 16        |
| <b>II.2. Classification.....</b>                 | <b>17</b> |
| <b>II.3. Caractéristique morphologique .....</b> | <b>18</b> |
| a) Racines .....                                 | 18        |
| b) Tige.....                                     | 18        |
| c) Feuilles .....                                | 19        |
| d) Fleur.....                                    | 19        |
| e) Fruits.....                                   | 19        |
| <b>II.4. Cycle de développement .....</b>        | <b>19</b> |
| <b>II.5.Exigences de la culture.....</b>         | <b>20</b> |
| II.5.1.Exigences pédologiques .....              | 20        |
| II.5.2.Exigences climatiques .....               | 20        |
| <b>II.6.Intérêts de la fève .....</b>            | <b>20</b> |
| II.6.1.Intérêt agro-economique.....              | 20        |
| II.6.2.Intérêt en écotoxicologie .....           | 21        |

## Partie II Matériels et méthodes

|   |           |
|---|-----------|
| <b>I.1. Objectif .....</b>  | <b>22</b> |
| <b>I.2. Matériel végétal.....</b>                                       | <b>23</b> |
| <b>I.3. Essai 1 : Test de germination.....</b>                          | <b>23</b> |
| I.3.1. Conduite de l'essai.....   | 23        |
| <b>a) Taux d'imbibition .....</b>                                       | <b>24</b> |
| <b>b) Longueur de la racicule .....</b>                                 | <b>24</b> |
| <b>I.4. Essai 2 : Effet de cuivre sur la croissance de la fève.....</b> | <b>25</b> |
| I.4.1. Conduite de l'essai.....   | 25        |
| a) Germination.....   | 25        |
| b) Préparation de substrat.....   | 27        |
| c) Remplissage des cylindres .....                                      | 28        |
| d) Plantation .....   | 28        |
| e) Application de stress métallique .....                               | 29        |

|                                       |           |
|---------------------------------------|-----------|
| f) Irrigation .....                   | 30        |
| g) Dispositif expérimental .....      | 30        |
| h) Paramètres mesurés.....            | 32        |
| <b>I.5. Analyse statistique .....</b> | <b>34</b> |

### **Partie III Résultats et discussion**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>I. Résultats.....</b>   | <b>36</b> |
| <b>I.1. Effet du cuivre sur la faculté germinative .....</b>                               | <b>36</b> |
| I.1.1. Taux d'imbibition .....   | 36        |
| I.1.2. Longueur de la radicule .....   | 37        |
| a) Longueur de la radicule finale .....  | 38        |
| <b>I.2. Effet du cuivre sur les paramètres morphologiques de <i>Vicia faba</i> L. ....</b> | <b>39</b> |
| I.2.1. Nombre des feuilles .....   | 39        |
| I.2.2. Hauteur de tige.....  | 41        |
| I.2.3. Volume racinaire.....   | 42        |
| <b>I.3. Effet du cuivre sur les paramètres physiologiques de <i>Vicia faba</i> L. ....</b> | <b>43</b> |
| I.3.1. Teneur relative en eau (RWC) .....  | 43        |
| I.3.2. Teneur en chlorophylle .....  | 45        |
| <b>I.4. Effet du cuivre sur les paramètres anatomiques de <i>Vicia faba</i> L.....</b>     | <b>46</b> |
| I.4.1. Nombre de faisceaux cribro-vasculaires.....   | 46        |
| <b>II. Discussion générale .....</b>   | <b>48</b> |
| <b>Conclusion générale .....</b>   | <b>52</b> |
| <b>Références bibliographie</b>  |           |
| <b>Annexes</b>   |           |

# **Introduction générale**



## Introduction générale

La contamination de l'environnement par les éléments métalliques a augmenté durant les dernières décennies. Les sources d'émissions métalliques dans l'environnement sont très nombreuses et difficiles à limiter (**Souguir et al., 2009**). Les métaux lourds sont des éléments non biodégradables et persistent dans l'environnement pendant de longues périodes. De plus, ils sont continuellement rajoutés dans les sols par diverses activités anthropiques. L'accumulation des métaux lourds dans l'environnement affecte la santé humaine, animale et des végétaux (**Wang et al., 2003**).

Le cuivre (Cu) est un élément chimique de couleur rougeâtre présent à l'état naturel dans les roches, le sol, les sédiments, l'eau, et à faible dose dans l'air. La concentration moyenne du cuivre dans la croûte terrestre est de 50 ppm (**Henckens et Worrell., 2020**). Le cuivre est diffusé dans l'environnement par des phénomènes naturels et anthropiques. Les principaux types de pollutions anthropiques responsables de l'augmentation des flux de cuivre, sont : La pollution industrielle et la pollution liée aux activités agricoles (Les produits phytosanitaires, les engrais chimiques, les composts et les boues de station d'épuration) (**Robert et Just., 1999**).

La teneur en cuivre dans les sols non pollués se situe entre 2 et 250 mg Cu kg<sup>-1</sup> (**EHC, 1998; Lenoir, 2011**). On peut le trouver dans la nature soit sous formes libres dans la cuprite (88,8 % Cu), soit sous forme d'oxydes et de sulfure, il a considéré comme l'élément le plus mobile des métaux lourds, il réagit très facilement avec les surfaces adsorbantes et les constituants organiques des sols (**Kabata-Pandias et Pandias., 1991; Coullery, 1997**).

Le cuivre est indispensable pour tous les organismes vivants en faible quantité (**Hänsch et Mendel., 2009**). Dans le domaine agricole, dès 1930, le cuivre est reconnu comme élément essentiel pour les végétaux (**Alloway, 1995**). Il joue un rôle important dans divers processus métaboliques, en participant à la constitution de différentes protéines (**Marschner, 1995**) et entre dans la composition de certaines enzymes ou servent de cofacteurs (**Yang et al., 2005**).

Lorsque la concentration de cuivre augmente dans le sol, sa teneur observée dans les tissus de la plante peut atteindre des niveaux critiques, variables selon l'espèce végétale, à partir de laquelle apparaissent des symptômes de phytotoxicité (**Marschner, 1995**). Cette phytotoxicité peut inhiber la croissance des plantes ou être un facteur de stress physiologique

## Introduction

---

pour le métabolisme de ces dernières (**Ouzounidou et al., 1995**). Les symptômes typiques de la toxicité du cuivre chez les plantes incluent l'apparition de feuillage vert foncé suivie par l'induction d'une chlorose ferrique, des racines épaisses, courtes ou barbelées et un enracinement réduit (**Kabata-Pendias et Pendias., 1991**). Des teneurs élevées en cuivre dans le sol inhibe la croissance des racines et diminue le rendement des récoltes (**Leteinturier, 2002**). Le cuivre devient toxique au niveau de l'appareil photosynthétique en bloquant le centre réactionnel du PS II et perturbant la chaîne de transport d'électron (**Fargasová et al., 1999**). Dans le sol le cuivre réagit avec le fer, ce qui provoque une carence en fer pour la plante (chlorose). Il réduit l'activité microbienne dans le sol et donc la vitesse de décomposition de la matière organique (**Leteinturier, 2002**).

Cependant, certaines espèces poussant sur des sites présentant de fortes concentrations en ETM ont développé des mécanismes de protection qui leur permettront de tolérer cet excès en métaux (**Punz et Sieghardt., 1993; Marschner, 1995; Larcher, 2003**).

La fève est une légumineuse annuelle, botaniquement connue sous le nom de *Vicia faba* L. (**Hanelt et Mettin., 1989**). Selon **Khaldi et al., (2002)**, l'espèce *Vicia faba* comme toutes les légumineuses alimentaires, contribue à l'enrichissement du sol en éléments fertilisants, dont l'incidence est positive sur les performances des cultures qui les suivent. La fève améliore la teneur du sol en azote. Les résidus des récoltes enrichissent le sol en matière organique (**Hamadache, 2003**). La fève est une bonne source de protéine et d'énergie. Elle est destinée à l'alimentation humaine et animale (**Wang et al., 2012**).

En Algérie, la fève reste la plus importante culture vivrière, il est cultivé essentiellement au niveau des plaines côtières, de l'intérieur et dans les zones sahariennes. Elle est retenue surtout pour la consommation humaine, sous forme de gousses fraîches, ou en grains secs. En cas de fortes productions, l'excédent en grains secs peut être incorporé dans l'alimentation du bétail (**Maatougui, 1996**).

Le travail présenté consiste en l'estimation de l'effet du cuivre sur le comportement de la fève (*Vicia faba* L.).

Notre travail est subdivisé en trois parties : La première partie présente la synthèse bibliographique ; la deuxième partie est consacrée au protocole expérimental et la dernière partie aborde les résultats obtenus, discussion et conclusion générale.

# **Partie I**

## **Synthèse bibliographique**

# **Chapitre I**

## **Généralité sur le cuivre**

## I.1. Généralité

Le cuivre est parmi les premiers minéraux extraits dans le monde depuis plus de 5 000 ans, n'étant devancé que par le fer dans son utilité (**Massey, 1973**). La dénomination du cuivre vient étymologiquement du latin *cuprium* signifiant « île de Chypre », réputée pour ses mille mines de cuivre (**Michel, 2013**).

C'est un élément chimique de symbole « Cu », qui se trouve au groupe IB du tableau périodique. Son numéro atomique est égal à 29 et sa masse molaire est de  $63,57 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$  (**Bensaada et al., 2011**), possédant deux isotopes naturels ;  $^{63}\text{Cu}$  (69,17 %) et  $^{65}\text{Cu}$  (30,83 %) (**Emsley, 2003**).

|                                      |   |                               |                                |                               |                                   |                                |                                |                               |                                |                                 |                              |  |                                       |                                      |                                     |  |                               |
|--------------------------------------|---|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------------|--|---------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|--|-------------------------------|
| 1<br>H<br>hydrogen<br>[1,007, 1,009] |   |                               |                                |                               |                                   |                                |                                |                               |                                |                                 |                              |  |                                       |                                      |                                     |  | 2<br>He<br>helium<br>4,003    |
| 3<br>Li<br>lithium<br>[6,938, 6,997] | 4<br>Be<br>beryllium<br>9,012           |                               |                                |                               |                                   |                                |                                |                               |                                |                                 |                              | 5<br>B<br>boron<br>[10,80, 10,83]      | 6<br>C<br>carbon<br>[12,00, 12,02]    | 7<br>N<br>nitrogen<br>[14,00, 14,01] | 8<br>O<br>oxygen<br>[15,99, 16,00]  | 9<br>F<br>fluorine<br>19,00            | 10<br>Ne<br>neon<br>20,18     |
| 11<br>Na<br>sodium<br>22,99          | 12<br>Mg<br>magnesium<br>[24,30, 24,31] |                               |                                |                               |                                   |                                |                                |                               |                                |                                 |                              | 13<br>Al<br>aluminium<br>26,98         | 14<br>Si<br>silicon<br>[28,08, 28,09] | 15<br>P<br>phosphorus<br>30,97       | 16<br>S<br>sulfur<br>[32,05, 32,08] | 17<br>Cl<br>chlorine<br>[35,44, 35,46] | 18<br>Ar<br>argon<br>39,95    |
| 19<br>K<br>potassium<br>39,10        | 20<br>Ca<br>calcium<br>40,08            | 21<br>Sc<br>scandium<br>44,96 | 22<br>Ti<br>titanium<br>47,87  | 23<br>V<br>vanadium<br>50,94  | 24<br>Cr<br>chromium<br>52,00     | 25<br>Mn<br>manganese<br>54,94 | 26<br>Fe<br>iron<br>55,85      | 27<br>Co<br>cobalt<br>58,93   | 28<br>Ni<br>nickel<br>58,69    | 29<br>Cu<br>copper<br>63,55     | 30<br>Zn<br>zinc<br>65,38(2) | 31<br>Ga<br>gallium<br>69,72           | 32<br>Ge<br>germanium<br>72,36        | 33<br>As<br>arsenic<br>74,92         | 34<br>Se<br>selenium<br>78,97       | 35<br>Br<br>bromine<br>[79,90, 79,91]  | 36<br>Kr<br>krypton<br>83,80  |
| 37<br>Rb<br>rubidium<br>85,47        | 38<br>Sr<br>strontium<br>87,62          | 39<br>Y<br>yttrium<br>88,91   | 40<br>Zr<br>zirconium<br>91,22 | 41<br>Nb<br>niobium<br>92,91  | 42<br>Mo<br>molybdenum<br>95,95   | 43<br>Tc<br>technetium         | 44<br>Ru<br>ruthenium<br>101,1 | 45<br>Rh<br>rhodium<br>102,9  | 46<br>Pd<br>palladium<br>106,4 | 47<br>Ag<br>silver<br>107,9     | 48<br>Cd<br>cadmium<br>112,4 | 49<br>In<br>indium<br>114,8            | 50<br>Sn<br>tin<br>118,7              | 51<br>Sb<br>antimony<br>121,8        | 52<br>Te<br>tellurium<br>127,6      | 53<br>I<br>iodine<br>126,9             | 54<br>Xe<br>xenon<br>131,3    |
| 55<br>Cs<br>caesium<br>132,9         | 56<br>Ba<br>barium<br>137,3             | 57-71<br>lanthanoids          | 72<br>Hf<br>hafnium<br>178,5   | 73<br>Ta<br>tantalum<br>180,9 | 74<br>W<br>tungsten<br>183,8      | 75<br>Re<br>rhenium<br>186,2   | 76<br>Os<br>osmium<br>190,2    | 77<br>Ir<br>iridium<br>192,2  | 78<br>Pt<br>platinum<br>195,1  | 79<br>Au<br>gold<br>197,0       | 80<br>Hg<br>mercury<br>200,6 | 81<br>Tl<br>thallium<br>[204,3, 204,4] | 82<br>Pb<br>lead<br>207,2             | 83<br>Bi<br>bismuth<br>208,0         | 84<br>Po<br>polonium                | 85<br>At<br>astatine                   | 86<br>Rn<br>radon             |
| 87<br>Fr<br>francium                 | 88<br>Ra<br>radium                      | 89-103<br>actinoids           | 104<br>Rf<br>rutherfordium     | 105<br>Db<br>dubnium          | 106<br>Sg<br>seaborgium           | 107<br>Bh<br>bohrium           | 108<br>Hs<br>hassium           | 109<br>Mt<br>meitnerium       | 110<br>Ds<br>darmstadtium      | 111<br>Rg<br>roentgenium        | 112<br>Cn<br>copernicium     | 113<br>Uut<br>ununtrium                | 114<br>Fl<br>flerovium                | 115<br>Uup<br>ununpentium            | 116<br>Lv<br>livermorium            | 117<br>Uus<br>ununseptium              | 118<br>Uuo<br>ununoctium      |
|                                      |   |                               | 57<br>La<br>lanthanum<br>138,9 | 58<br>Ce<br>cerium<br>140,1   | 59<br>Pr<br>praseodymium<br>140,9 | 60<br>Nd<br>neodymium<br>144,2 | 61<br>Pm<br>promethium         | 62<br>Sm<br>samarium<br>150,4 | 63<br>Eu<br>europium<br>152,0  | 64<br>Gd<br>gadolinium<br>157,3 | 65<br>Tb<br>terbium<br>158,9 | 66<br>Dy<br>dysprosium<br>162,5        | 67<br>Ho<br>holmium<br>164,9          | 68<br>Er<br>erbium<br>167,3          | 69<br>Tm<br>thulium<br>168,9        | 70<br>Yb<br>ytterbium<br>173,0         | 71<br>Lu<br>lutetium<br>175,0 |
|                                      |   |                               | 89<br>Ac<br>actinium<br>227,0  | 90<br>Th<br>thorium<br>232,0  | 91<br>Pa<br>protactinium<br>231,0 | 92<br>U<br>uranium<br>238,0    | 93<br>Np<br>neptunium          | 94<br>Pu<br>plutonium         | 95<br>Am<br>americium          | 96<br>Cm<br>curium              | 97<br>Bk<br>berkelium        | 98<br>Cf<br>californium                | 99<br>Es<br>einsteinium               | 100<br>Fm<br>fermium                 | 101<br>Md<br>mendelevium            | 102<br>No<br>nobelium                  | 103<br>Lr<br>lawrencium       |

Key:  
 atomic number  
 Symbol  
 name  
 standard atomic weight

Figure 01 : Classification périodique des éléments (Costa, 2018).

## I.2. Utilisation

- Il est présent dans de nombreux alliages, notamment dans les radiateurs et les échangeurs de chaleur. Sa bonne conductivité électrique et thermique en font un matériau de choix en télécommunications, dans le bâtiment, les transports ou encore le domaine de l'énergie.
- En architecture, le cuivre peut servir comme matériau de couverture étanche sur les toitures.
- Il est employé dans les conduits et les canalisations de gaz pour sa bonne tenue à la corrosion (**Adriano, 2001**).
- En agriculture, les composés du cuivre, notamment le sulfate de cuivre, sont utilisés comme fongicides, pesticides, algicides, compléments nutritionnels dans les aliments pour animaux et engrais (**ATSDR, 2004**).
- Le cuivre est homologué en protection des plantes contre diverses maladies, en particulier les mildious, différentes mycoses, mais aussi diverses bactérioses, en particulier sur la vigne et les cultures légumières (**Berriau, 2012**).

## I.3. Caractéristiques physico-chimiques

Le cuivre est un élément de transition à une densité de 8.92 g/cm<sup>3</sup> et un point d'ébullition de 2 350 °C. Il se trouve naturellement en états d'oxydation : (Cu<sup>+</sup>), (Cu<sup>2+</sup>) et, plus rarement, (Cu<sup>3+</sup>) (**Ellingsen et al., 2015**). Le métal est peu soluble dans l'eau, les sels ou les solutions légèrement acides, mais il peut être dissous dans les acides nitrique et sulfurique ainsi que dans les solutions basiques d'hydroxyde ou de carbonate d'ammonium (**EHC, 1998**).

**Tableau 01** : Principales caractéristiques physiques du cuivre (**Lenoir, 2011**).

|                                |                                       |
|--------------------------------|---------------------------------------|
| <b>N° atomique</b>             | 29                                    |
| <b>Masse atomique</b>          | 63,546 g/mol                          |
| <b>Densité</b>                 | 8.9 à 8.95 g/cm <sup>3</sup>          |
| <b>Pression de vapeur</b>      | 0,0505 Pa à 1085°C                    |
| <b>T° de vaporisation</b>      | 2567°C                                |
| <b>Conductivité électrique</b> | 59,6 105 S.M <sup>-1</sup>            |
| <b>Conductivité thermique</b>  | 401 W.M <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> |

## I.4. Origine

### I.4.1. Origines naturelles

Le cuivre présent naturellement dans toutes les roches de l'écorce terrestre, il se trouve principalement sous forme de minerais sulfurés ou oxydés tels que (la malachite ( $\text{Cu}_2\text{CO}_3$ ), la cuprite ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ),  $\text{Cu}(\text{OH})_2$ ), chalcocite ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ) chalcopyrite et ( $\text{CuFeS}_2$ ),...etc.) (**Mark et al., 1978**).

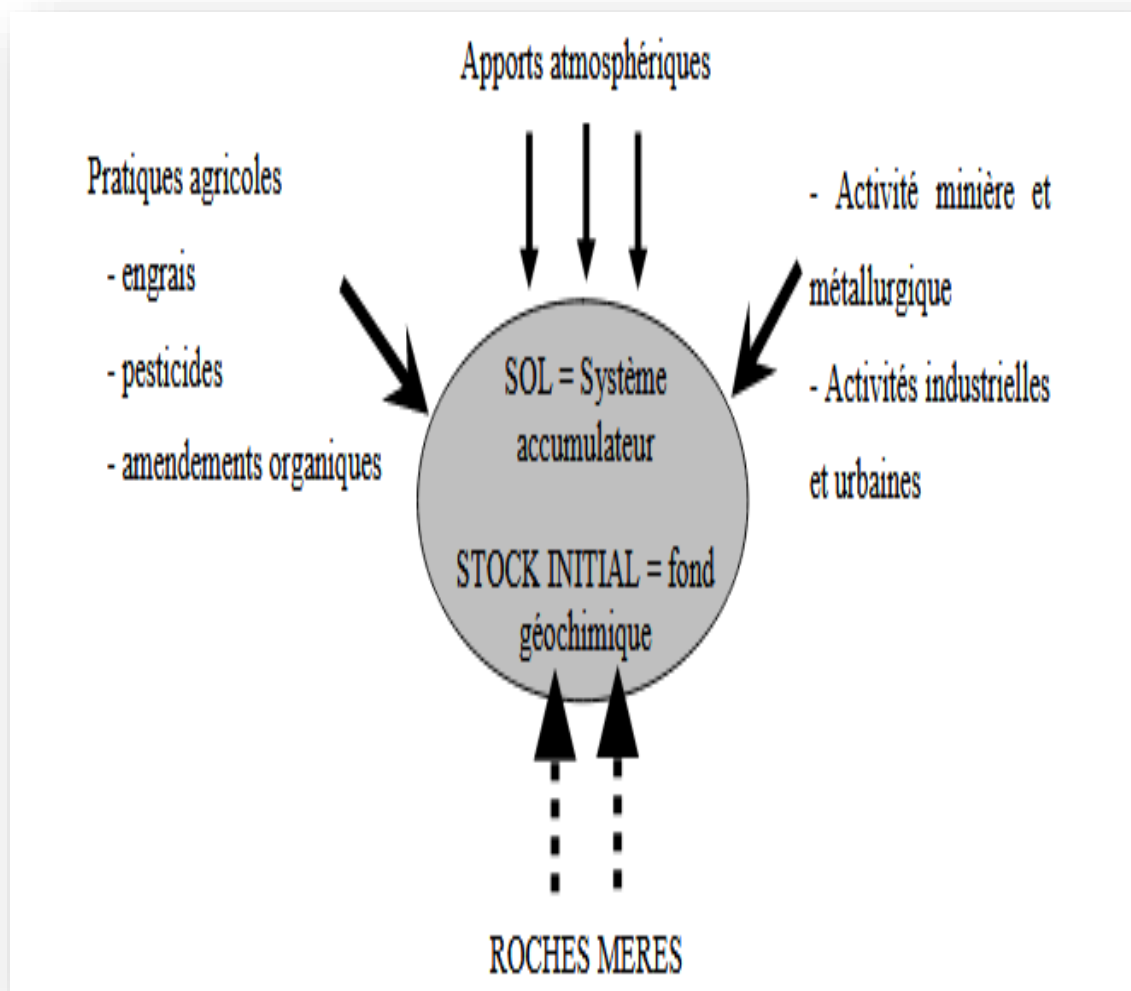
La teneur en cuivre dans les différents types des roches sont :

- Roches basiques (basalte, dolérite...) : 100-200 ppm.
- Roches éruptives acides (granite, rhyolite...) : 10-20 ppm.
- Roches métamorphiques (schistes) et certaines roches sédimentaires (argile, loess...) : 30-40 ppm. parfois un peu plus.
- Grès, sables, calcaire : de 3 à 10-15 ppm. (**Aubert et Pinta., 1971**)

### I.4.2. Origines anthropiques

Les principales activités anthropiques responsables à l'augmentation de flux du cuivre dans la nature sont:

- Pratiques agricoles dues aux épandages d'insecticides, de fongicides, d'engrais, de boues résiduaires urbaines ou de composts d'ordures ménagères,...etc.
- Pollution due aux retombées atmosphériques telle que l'industrie extractive et métallurgique, pratiques liées à l'incération, utilisation des énergies fossiles et l'activité minière.
- Stockage de déchets urbains ou industriels dues aux résidus des activités de mines et de fonderies de métaux, installations de stockage de déchets,...etc. (**Abderrazzak, 2012**)
- Il est également rejeté intentionnellement dans certains plans d'eau pour contrôler la croissance des algues. (**EHC, 1998**)



**Figure 02 :** Source naturel et anthropique du cuivre dans l'environnement (**Robert et Juste., 1999**).

### I.5. Niveau du cuivre dans l'environnement

Le cuivre est le 26<sup>ème</sup> élément le plus abondant sur la croûte continentale (TAB. 02). La concentration de cuivre dans l'air dépend de la proximité du site par rapport aux principales sources telles que les fonderies, les centrales électriques et les usines de traitement des eaux usées. Il est largement distribué dans l'eau, les niveaux environnementaux de cuivre sont généralement mesurés en tant que concentrations totales ou dissoutes, ces dernières étant plus représentatives de la biodisponibilité du métal. Dans les sédiments et les sols, la plupart du cuivre est également sur ou dans les particules, soit en tant que constituant de phases minérales ou adsorbé à des surfaces d'oxydes ou à de la matière organique (**EHC, 1998 ; Lenoir, 2011**).



Tableau 02 : Concentrations du cuivre dans l'environnement (Lenoir, 2011).

| Milieu           |                      | Concentration               |
|------------------|----------------------|-----------------------------|
| Air              |                      | 5-50 ng/m <sup>3</sup>      |
| Eaux             | Eaux de mer          | 0,05-12 µg.L <sup>-1</sup>  |
|                  | Eaux douces          | 5-30 µg.L <sup>-1</sup>     |
| Sols             |                      | 2-250 mg .kg <sup>-1</sup>  |
| Sédiments        |                      | 2-5000 mg .kg <sup>-1</sup> |
| Roches           | Roches volcaniques   | 13-90 mg .kg <sup>-1</sup>  |
|                  | Roches sédimentaires | 5-39 mg .kg <sup>-1</sup>   |
| Croute terrestre |                      | 24-70 mg .kg <sup>-1</sup>  |

## I.6. Cuivre dans le sol

La concentration moyenne du cuivre dans le sol est de 30 ppm (avec une fourchette de 2 à 250 ppm), leurs concentrations dépendent de celles des roches-mères (roches volcaniques basiques particulièrement riches). Dans le sol le cuivre est principalement lié à la matière organique ainsi qu'aux oxydes de Mn et de Fe. Mais le cuivre peut être aussi emprisonné dans les feuillets des argiles (Adriano, 2001).

Dans les particules solides du sol, le cuivre peut être complexé à la matière organique, aux hydroxydes et oxydes de manganèse, de fer ou d'aluminium et sur les sites négatifs des argiles, ou précipité notamment avec des carbonates (Bravin, 2008).

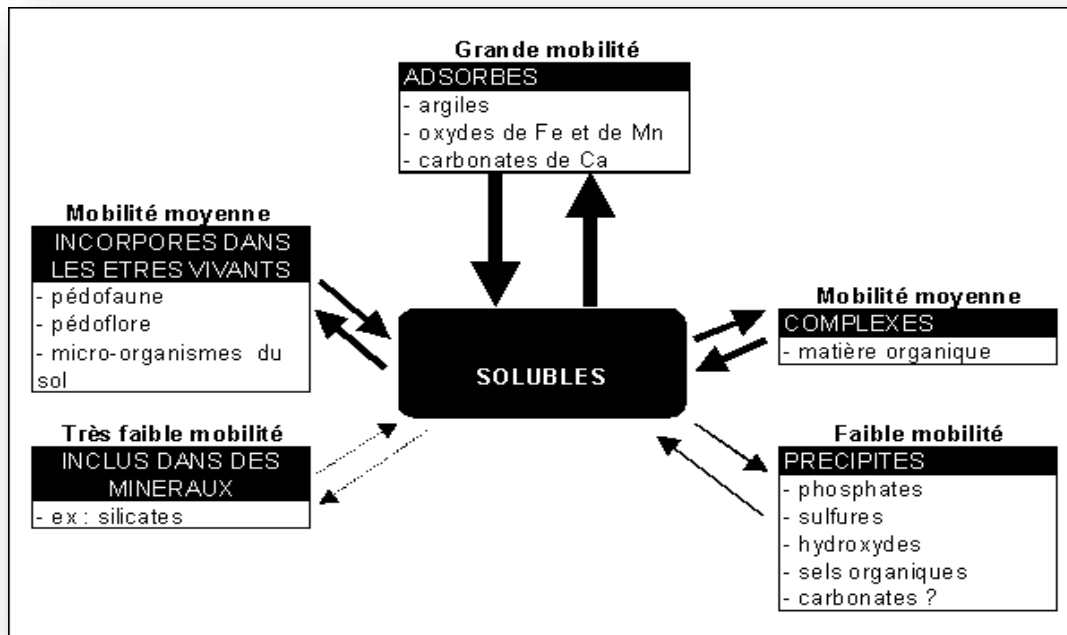
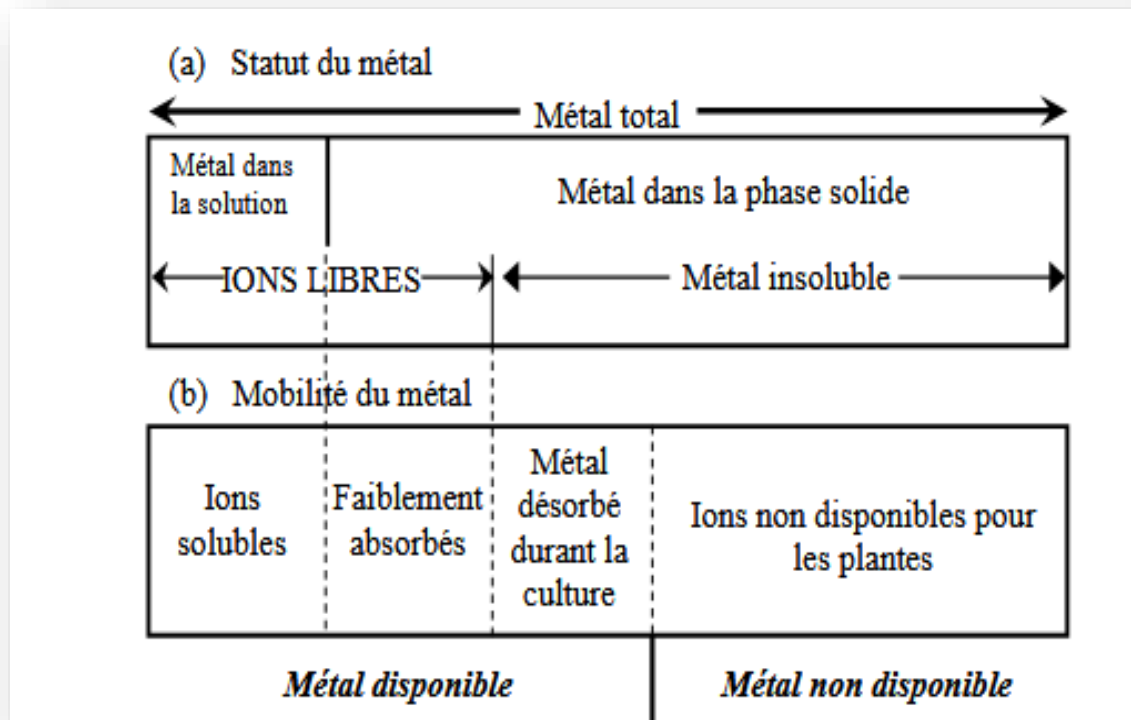


Figure 03 : Phases porteuses de cuivre dans le sol (Juste, 1995).

### I.6.1. Mobilité du cuivre dans le sol

La mobilité des métaux est définie comme « la capacité d'un métal à passer de compartiments du sol où il est fortement retenu vers ceux où il est moins énergiquement retenu, le compartiment ultime étant la solution du sol » (Bravin, 2008).

Dans le sol, le Cu se complexe rapidement à de nombreux éléments qui vont limiter sa mobilité. La répartition du cuivre entre la phase solide et la solution du sol dépend de la composition organique et minérale des sols et de leurs propriétés physicochimiques comme le pH, la température, et l'humidité (H) (Monnier, 2014).



**Figure 04** : Mobilité de cuivre dans le sol (Babich et Stotzky., 1980).

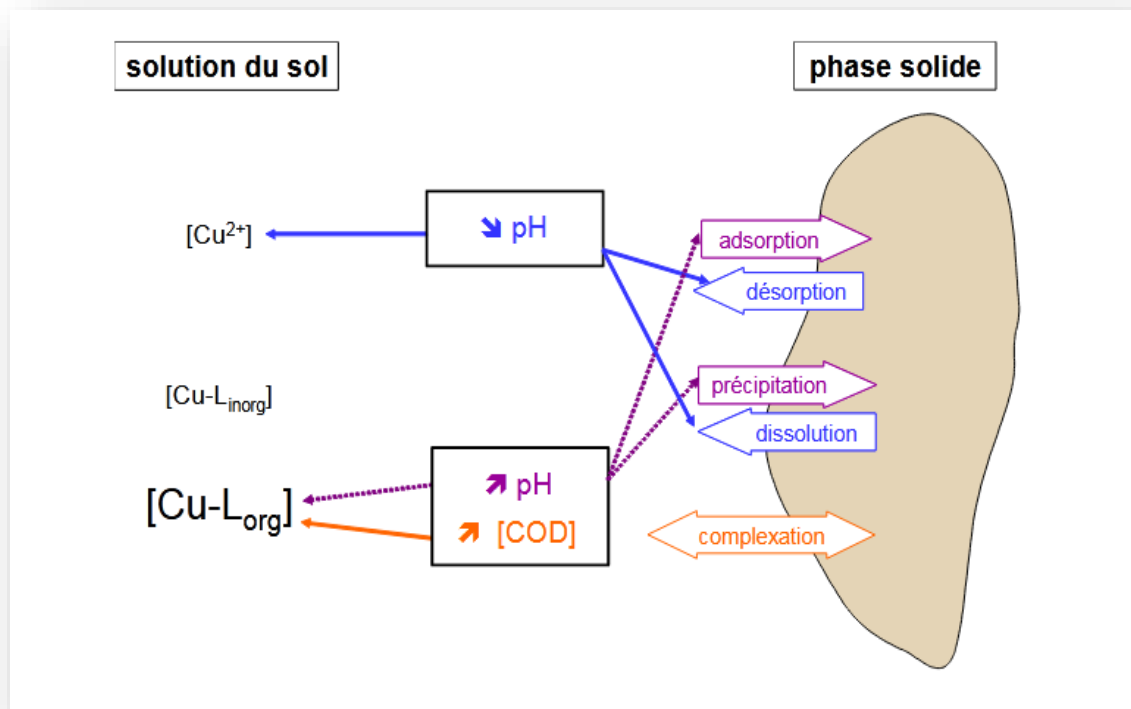
### I.6.2. Biodisponibilité du cuivre

La biodisponibilité est définie comme « l'aptitude d'un métal à passer d'un compartiment du sol à l'intérieur d'un organisme vivant (plante) » (Navel, 2012), la biodisponibilité d'un métal dépend essentiellement de sa spéciation chimique en solution et des conditions physico-chimiques du sol qui sont susceptibles de modifier cette spéciation vers des formes chimiques plus ou moins assimilables (Alloway, 1995).

### I.6.3. Facteur de biodisponibilité

La disponibilité de cuivre dans le sol dépend de sa spéciation et de sa répartition entre la phase solide et la solution du sol. Elle va donc dépendre des processus (adsorption / désorption, précipitation / dissolution, complexation / dissociation de complexes) et des propriétés chimiques du sol et de la solution du sol qui gouvernent la répartition de cuivre

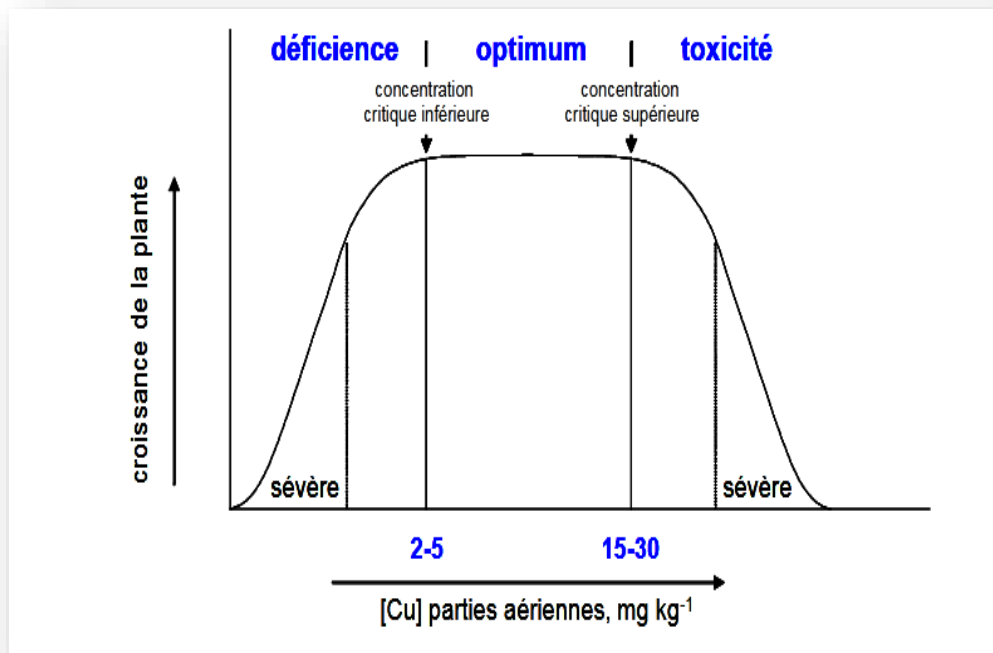
(Peijnenburg *et al.*, 1997 ; Sauvé *et al.*, 2000 ; Rieuwerts *et al.*, 1998 ; Peijnenburg et Jager., 2003) (Fig. 05).



**Figure 05 :** Facteurs chimiques gouvernant la disponibilité environnementale de Cu (McBride et Bouldin., 1984 ; Peijnenburg *et al.*, 1997 ; Sauvé *et al.*, 2000).

## I.7. Cuivre dans la plante

Le cuivre est l'un des sept micronutriments (Mn, Zn, Cu, Fe, Mo, B et Cl) essentiels à la croissance des plantes (Adriano, 2001). Le cuivre est impliqué dans de nombreux processus physiologiques cellulaires et constitue un cofacteur essentiel pour de nombreuses métalloprotéines (Yruela, 2005). Il n'est requis qu'en très petites quantités ; 5 à 15 ppm dans les parties aériennes sont suffisantes pour une croissance normale, (Fig. 06). Au-delà du seuil de toxicité de 15-30 mg kg<sup>-1</sup> dans les parties aériennes, Cu peut être phytotoxique (Marschner, 1995; Reuter et Robinson., 1997).



**Figure 06 :** Croissance des plantes en fonction des différents niveaux de cuivre  
(Reuter et Robinson., 1997).

### I.7.1. Absorption du cuivre

Le cuivre est prélevé en faible quantité par la plante, dans les tissus racinaires, le cuivre est presque complètement sous forme complexée mais il est probable qu'il pénètre à l'état élémentaire dans les cellules de la racine. Le prélèvement du cuivre par la plante est un processus actif, affecté par des inhibiteurs métaboliques (Saur, 1990). La forme libre de cuivre est absorbée par les racines conformément à la théorie de l'ion libre (Adriano, 2001).

### I.7.2. Translocation du cuivre

Le cuivre est excrété par les cellules racinaires dans les vaisseaux du xylème et du phloème sous forme anionique complexée (Claire-Emmanuelle, 2007). Lors de la translocation vers la partie aérienne, le cuivre serait principalement transporté dans le xylème complexé par des acides aminés (histidine, voire nicotianamine) et des acides organiques (citrate) (Puig et Penarrubia., 2009). Les mouvements du cuivre dans la plante sont généralement assez faibles. La mobilité dépend principalement des teneurs dans la plante mais aussi de l'intensité du métabolisme azoté (Loué, 1993).

### I.7.3. Rôle du cuivre

Le cuivre est un micronutriment requis en très petites quantités par les plantes. (Marschner, 1995; Larcher, 2003). Le cuivre est un élément important de la photosynthèse, de la respiration, du glucose, des protéines et du métabolisme des parois cellulaires (Kabata et Pendias., 1992; Mengel et Kirkby., 2001).

Il est nécessaire pour les activités correctes de diverses enzymes dans les plantes ainsi que pour la synthèse de la chlorophylle et la production de graines. La présence de Cu est étroitement liée à la production de la vitamine A, et est cruciale pour la réussite de la synthèse des protéines (Oorts, 2013).

Les principales protéines associées au cuivre sont (Marschner, 1995) :

- La plastocyanine: Protéine participe à la chaîne de transport des électrons au cours de la photosynthèse.
- Le superoxyde dismutase : Responsable de la détoxification de radicaux libres (superoxydes).
- Le cytochrome oxydase : Oxydase terminale de la chaîne de transport d'électrons dans les mitochondries.
- L'ascorbate oxydase : Catalyse les réactions d'oxydation de l'acide ascorbique.
- Les peroxydases et les phénols oxydases : Enzymes joue un rôle dans la synthèse des plastocyanines et de la lignine.

### I.7.4. Carence du cuivre

La croissance de la plante est sévèrement réduite, dans le cas de carence de cuivre, 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).

La carence en cuivre réduit le transport d'électrons du photosystème I (PSI) (Shikanai et al., 2003) en raison de la diminution de la formation de plastocyanine, qui est le principal site cible de la carence en cuivre dans la photosynthèse. La carence en cuivre entraîne la désintégration des membranes thylakoïdes des chloroplastes ainsi qu'une diminution de la teneur en pigments (chlorophylles et caroténoïdes), une réduction de la synthèse de la

plastoquinone et une baisse de la teneur en acides gras insaturés en C18 (**Droppa et al., 1987; Henriques, 1989**).

### **I.7.5. Toxicité du cuivre**

La toxicité de Cu sur les plantes se manifeste sur le système racinaire (la rhizotoxicité) et parfois par une déficience induite en Fe. Par ailleurs, sa toxicité altère l'intégrité des membranes plasmiques des cellules racinaires et affecte la perméabilité membranaire provoquant ainsi la perte d'ions et de solutés (**Kabata-Pendias et Pendias., 1992; Marschner, 1995**).

### **I.7.6. Effet du cuivre sur la morphologie des plantes**

Les concentrations excessives de Cu ont des effets importants sur la croissance des plantes. La toxicité du Cu affecte la croissance et la morphologie de la plante, il s'accumule dans l'organe racinaire et peut être transféré à la partie aérienne (**Yang et al., 2015**).

#### **a) La partie racinaire**

La rhizotoxicité de cuivre peut provoquer une diminution de l'absorption de l'eau et des nutriments par les racines et inhibition de la croissance des racines (**Sheldon et Menzies., 2005 ; Kopittke et al., 2011**).

Un niveau élevé de cuivre dans le sol induit un épaissement et d'une coloration brune des racines, et une diminution de la ramification et du nombre de poils racinaires et de l'élongation racinaire globale (**Sheldon et Menzies., 2005**). Les effets de la toxicité de cuivre sur l'élongation racinaire due à la liaison de cuivre avec des composés pectiques des parois cellulaires, qui augmente la rigidité des parois cellulaires et déplace les cations basiques ( $\text{Ca}^{2+}$ ), diminuant ainsi l'expansion cellulaire et donc l'élongation racinaire (**Michaud, 2007**).

#### **b) La partie aérienne**

L'effet du Cu a été observé à différents stades de croissance et de développement des plantes, de la germination des graines à la sénescence. En fonction du niveau de Cu et du stade de croissance de la plante testée, l'excès de Cu provoque des changements phénotypiques

considérables et affecte significativement les plantes sensibles au Cu (**Muccifora et Bellani, 2013**).

L'excès de Cu réduit le nombre de feuilles, la biomasse et empêche l'élongation des racines et des pousses des plantes, ce qui peut être dû à son interférence dans la division et l'élongation des cellules (**Gang et al. 2013**). Les plantes souffrant de la toxicité du Cu apparaissent rabougries, généralement de couleur bleuâtre, et finissent par devenir jaune ou brun. La présence de Cu dans le sol à des taux élevés, réduit considérablement la productivité des plantes et le rendement des cultures (**Rizwan et al. 2016**).

### **I.7.7. Effet du cuivre sur la physiologie des plantes**

Le cuivre peut affecter la biosynthèse de l'activité photosynthétique, en modifiant la composition en pigments chlorophylliens et en protéines des membranes photosynthétiques. L'excès de cuivre affecte la composition des membranes des chloroplastes et des thylakoïdes, déclenche un stress oxydatif dans les cellules et diminue la teneur en pigments photosynthétiques, provoque une peroxydation lipidique et un dommage d'ADN (**Maksymiec, 1997; Vassilev et al., 2003; Gonzalez et al., 2013**).

### **I.7.8. Effet du cuivre sur la germination des plantes**

La germination est le stade physiologique le plus sensible d'une plante et il est régulé par plusieurs interactions hormonales et facteurs environnementaux. De plus, ce stade est plus sensible à la pollution de cuivre en raison du manque de certains mécanismes de défense (**Liu et al., 2012**). Dans des sols contaminés en Cu, la germination est plus lente (**Kumpiene et al., 2006**). Lors d'une exposition des graines au cuivre, des diminutions du contenu en huile, de la concentration en protéines, en méthionine, en carbohydrates, en lipides et une augmentation des phénols se produisent (**Malan et Farrant., 1998, Khurana et al., 2006**).

### **I.7.9. Production des ROS**

Les plantes sont constamment soumises à des variations environnementales, ces changements peuvent engendrer un stress oxydant pouvant entraîner leur mort par la production de formes réactives de l'oxygène, les ROS sont généralement considérés comme des molécules phytotoxiques (**Claire et al., 2008**).



Les ROS sont produits dans des conditions normales et stressantes à différents endroits dans les chloroplastes, les mitochondries, les peroxyosomes, les membranes plasmiques et la paroi cellulaire. En présence de lumière, les chloroplastes et les peroxyosomes sont les principales sources de production de ROS, tandis que la mitochondrie est le principal producteur de ROS dans des conditions d'obscurité (**Choudhury et al., 2013**).

## **Chapitre II**

### **Généralité sur *Vicia faba* L.**

## II.1. Généralités

La fève (*Vicia faba* L.) est une légumineuse à grain riche en protéines appartenant à la famille des Fabaceae, cultivée depuis longtemps dans la zone tempérée de l'hémisphère nord. Parfois aussi appelée fève ou féverole, elle est principalement récoltée sous forme de graines sèches pour l'alimentation humaine ou animale, ses graines ou gousses fraîches peuvent également être utilisées comme légumes (Duc et al., 2015). Des restes de ce plant ont été trouvés à « Palestine » et qui remontent à 6000 ans (Cuberoj, 2011).

### II.1.1. Production mondiale

La production mondiale de la fève en 2019 a atteint 5,43 millions de tonnes métriques. Les principaux pays producteurs sont la Chine (1 740 945 t), l'Éthiopie (1 006 752 t) et le Royaume-Uni (547,800 t) classée dans la troisième position (FAO, 2020).

### II.1.2. Valeurs nutritives

La fève (*Vicia faba* L.) est une importante plante alimentaire, elle compte parmi les plantes les plus nourrissantes (TAB. 03).

**Tableau 03 :** Valeurs nutritives de la fève (*Vicia faba* L.) pour 100 g de graines sèches (FAO, 2016).

| Energie (Kcal) | Protéine (g) | Matière grasse (g) | Fibres (g) | Glucide (g) | Fe (mg) | Mg (mg) | P (mg) | K (mg) | Zn (mg) | Cu (mg) | Vit B9 (µg) |
|----------------|--------------|--------------------|------------|-------------|---------|---------|--------|--------|---------|---------|-------------|
| 300            | 26,1         | 1,8                | 1,8        | 31,7        | 6,1     | 191     | 506    | 1080   | 3,1     | 0,82    | 423         |

## II.2. Classification

Tableau 04 : Classification de la fève (*Vicia faba* L.).

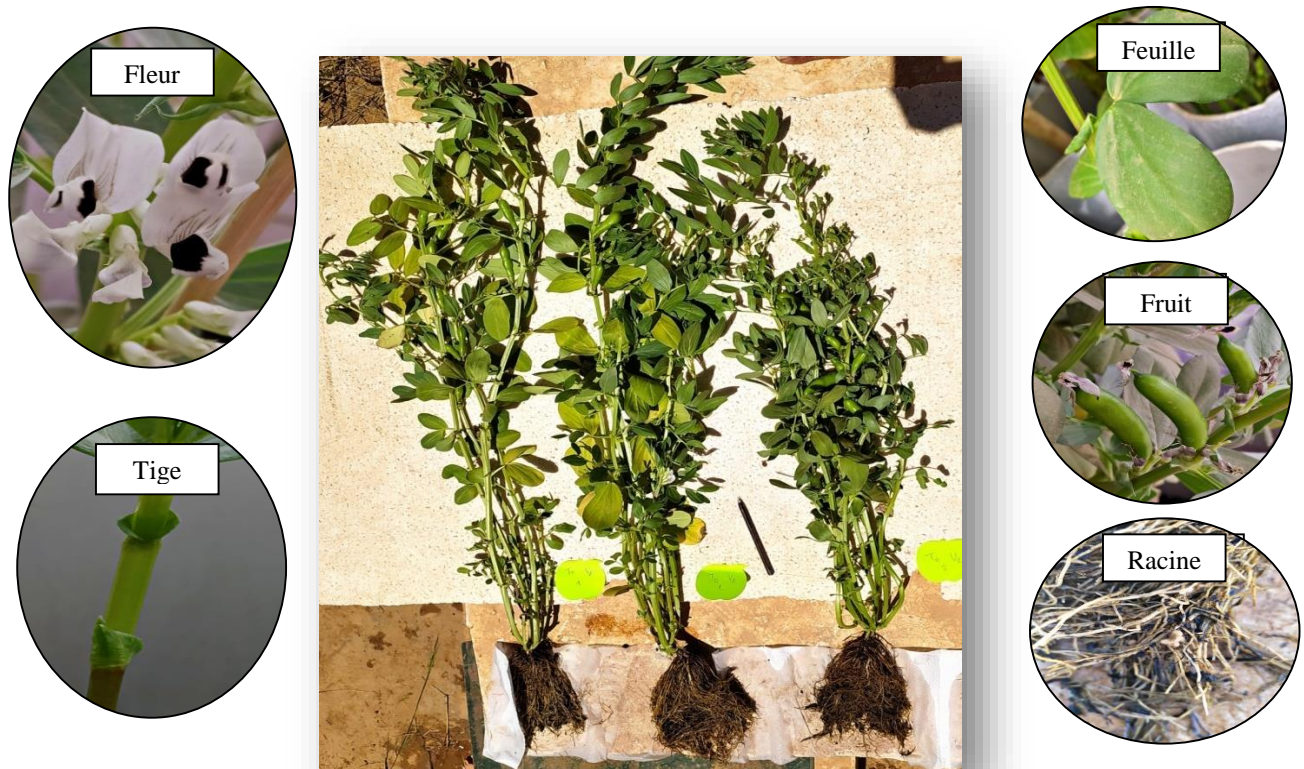
| Classification classique                                      |                      |
|---|----------------------|
| Selon <b>Dajoz, (2000)</b> , la fève est classée comme suit : |                      |
| <b>Embranchement</b>  | Spermaphytes         |
| <b>Sous- embranchement</b>                                    | Angiospermes         |
| <b>Classe</b>   | Dicotylédones        |
| <b>Sous-classe</b>  | Dialypétales         |
| <b>Série</b>  | Calciflores          |
| <b>Ordre</b>  | Rosales              |
| <b>Famille</b>  | Fabacées             |
| <b>Sous famille</b>   | Papilionacées        |
| <b>Genre</b>  | <i>Vicia</i>         |
| <b>Espèce</b>   | <i>Vicia faba</i> L. |

*Vicia faba* L., est une espèce dont la classification prête encore aujourd'hui à discussion. Un consensus est cependant généralement trouvé sur la classification de **Muratova, (1931)** qui subdivise l'espèce en deux sous espèces, *paucijuga* et *eu-faba*. Dans le groupe *eu-faba*, cette classification distingue trois variétés botanique : (**Gallais et Bannerot., 1992**) :

- *Vicia faba major*
- *Vicia faba minor*
- *Vicia faba equina*

### II.3. Caractéristique morphologique

La fève est une plante partiellement allogame avec un nombre de chromosomes inférieur ( $2n = 2x = 12$ ) à celui des autres espèces du genre *Vicia* (Wang et al., 2012). Elle est une plante herbacée annuelle, robuste, grimpante, qui peut atteindre une hauteur de 1,7 mètre (Chaux et Foury., 1994).



**Figure 07 :** Différentes parties morphologiques de la fève *Vicia faba* L.

#### a) Racines

La fève contient une racine principale et des racines secondaires, qui sont denses dans les 30 premiers cm du sol. Les racines de la fève possèdent des nodules à l'intérieur desquelles des cellules géantes servent d'abri à une bactérie symbiotique, appartenant à l'espèce *Rhizobium leguminosarum* (Duc, 1997).

#### b) Tige

D'après Peron, (2006) la tige de la fève est simple, creuse, peut atteindre une longueur de 1.8 m.

## c) Feuilles

Les feuilles sont composées de deux ou trois paires de folioles opposées de forme ovale et de couleur verte glauque (Chaux et Foury., 1994).

## d) Fleur

Les fleurs, longues de 2 à 3 cm, ont une structure typiquement papilionacée. Elles peuvent être entièrement blanches, brunes ou violettes avec un point noir sur les ailes zygomorphes et hermaphrodites, à pollinisation entomophile. Sa floraison dépend de la photopériode et de la température (Duc, 1997).

## e) Fruits

D'après Couplen et Marm., (2009), les fruites sont de longues gousses vertes de 10 à 20 cm de long, contenant entre 4 à 9 graines.

## II.4. Cycle de développement

Le cycle de développement de cette plante est estimé par cinq mois (Chaux et Foury., 1994) par six stades dans une période végétative courte (Planquaert et Girard., 1987).

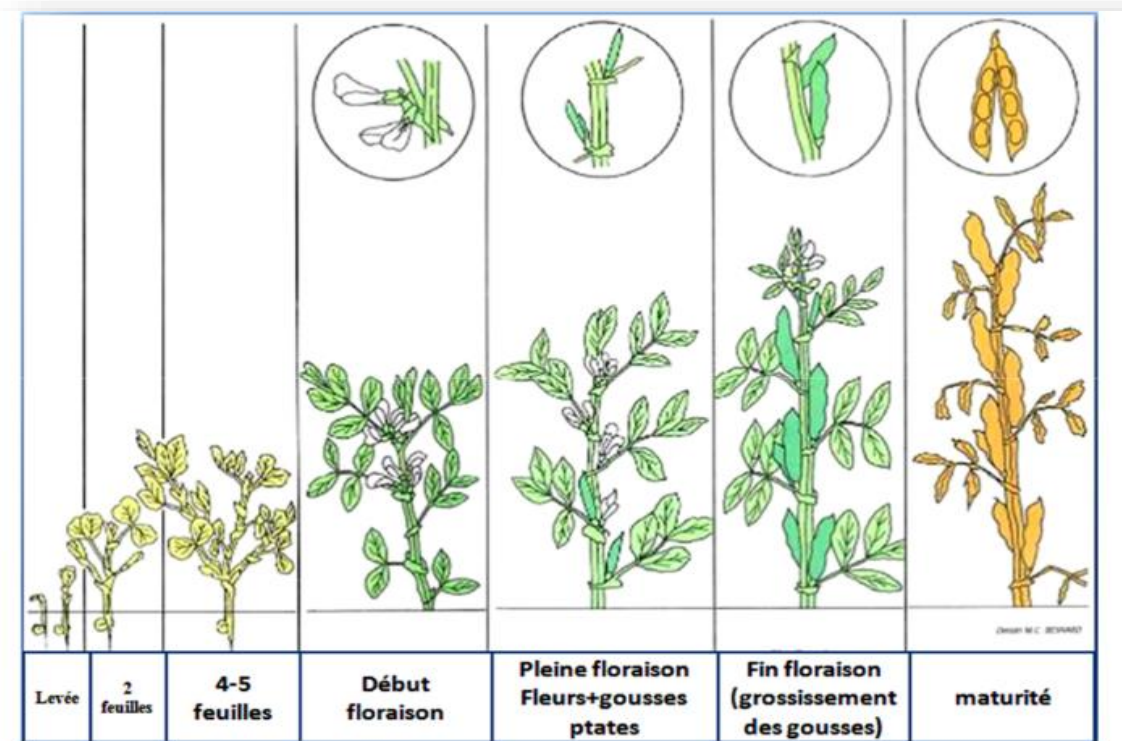


Figure 08 : Cycle de développement de la fève (Simonneau et al., 2012).

## II.5.Exigences de la culture

### II.5.1. Exigences pédologiques

Selon **Chaux et Foury., (1994)**, la fève est exigeante de l'eau dans les premiers stades de leur développement (floraison et formation des gousses). D'autre part, la fève ne présente pas d'exigence spécifique au regard de la nature des sols (**Chaux et Foury., 1994**). Cependant, la préférence est donnée au sol sablo-argileux humifié et bien ensoleillé à un PH neutre à légèrement alcalin (7-8,3) (**Peron, 2006**).

### II.5.2.Exigences climatiques

La fève se comporte comme une plante de jour long qui se traduit par une exigence importante en luminosité (**Laumonier, 1979**). Sa température optimale pour de croissance se situe aux environs de 20 °C (**Foltete, 2010**), elle supporte les faibles gelées ne dépassant pas -3°C, par contre les températures supérieures à 25°C sont néfastes pour la fève (**Chaux et Foury., 1994**).

## II.6.Intérêts de la fève

### II.6.1.Intérêt agro-economique

La fève contribue à l'enrichissement des sols en éléments fertilisants. (**Khaldi et al., 2002**). Les racines de *Vicia faba L.* vivent en symbiose avec des bactéries du genre *Rhizobium*, leur permettant de fixer l'azote atmosphérique et d'enrichir le sol en azote, ce qui réduit la dépendance des agriculteurs vis-à-vis des engrais chimiques (**Sillero et al., 2010**).

*V. faba L.* joue un rôle importante dans la rotation des cultures améliorant ainsi la fertilité du sol et réduisant l'incidence des mauvaises herbes, des maladies et des insectes ravageurs (**Lopez et al., 2005**). Il est utilisé pour l'alimentation du bétail en graines concassées (pour l'engraissement) (**Maatougui, 1996**).

### II.6.2. Intérêt en écotoxicologie

La fève est une plante très sensible à la pollution du sol, facile à se procurer et à faire germer, ce qui en fait un modèle végétal très utilisé aux études d'écotoxicologie, de plus, la simplicité de son caryotype permet de réaliser un grand nombre d'études de mutagenèse (**Sang et Li., 2004**). La grande quantité d'ADN contenue dans son noyau (**Bennett, 1976**), la rend très sensible aux molécules génotoxiques (**Ferrara *et al.*, 2004**).



# **Partie II**

## **Matériels et méthodes**

### I.1. Objectif

Notre travail consiste à étudier l'effet du cuivre sur le comportement physiologique, morphologique et anatomique de la fève (*Vicia faba* L.).

L'expérimentation est conduite sous une serre automatisée au niveau de centre université de Naâma, et les analyses sont réalisées au niveau de laboratoire de l'écologie au sein de la même université.



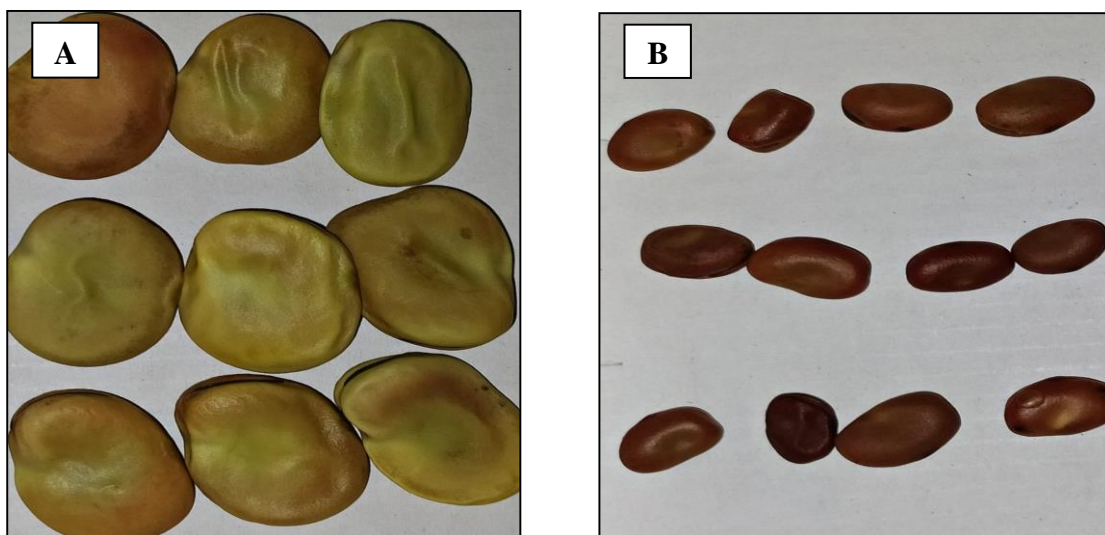
**Figure 09** : Serre automatisée de centre universitaire de Naama.

## I.2. Matériel végétal

Le matériel végétal utilisé est composé de deux variétés locales de la fève (*Vicia faba* L.) ; **Boussabaa** (A) et une féverole **Sidi Aïch** (B).

Le choix de la fève (*Vicia faba* L.) est basé sur les caractères suivants :

- Croissance rapide.
- Capacité importante de la germination.
- Biomasse importante.
- Plante utilisée pour les études éco-toxicologiques.



**Figure 10** : Deux variétés locales de la fève (*Vicia faba* L.) (A) **Boussabaa**, (B) **Sidi Aïch**.

### I.3. Essai 1 : Test de germination

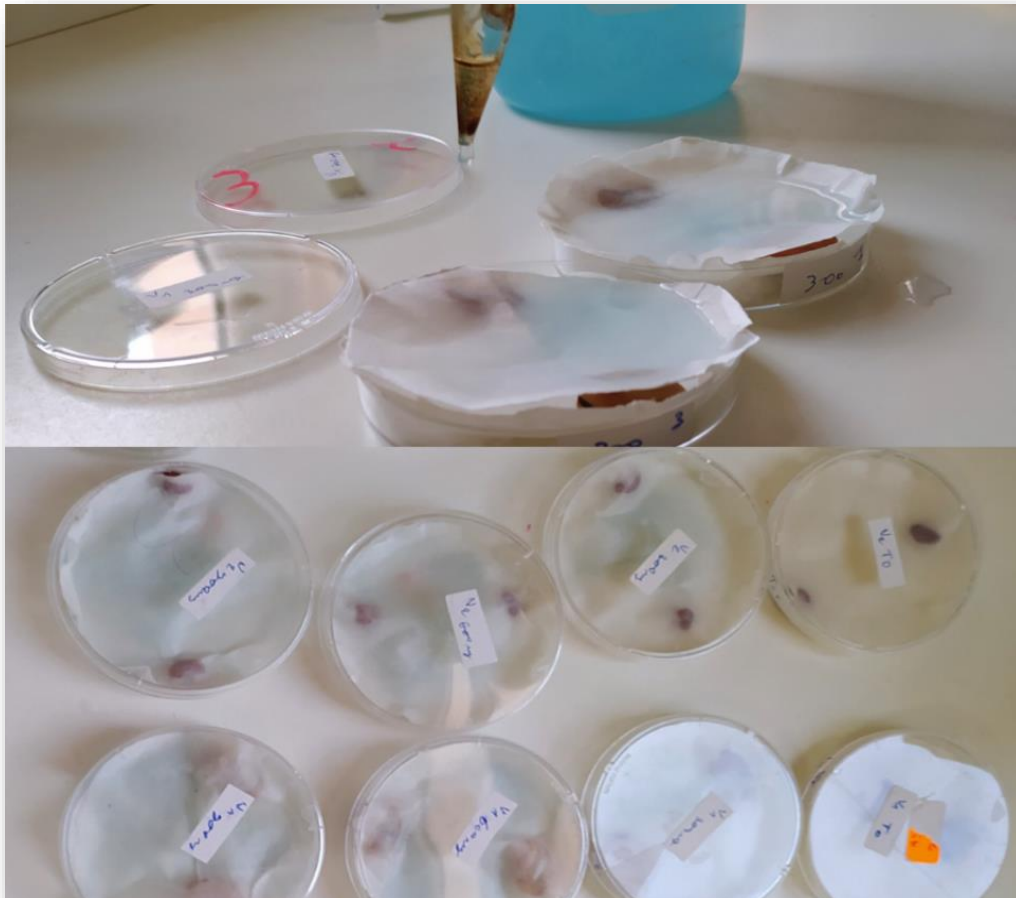
Dans le but d'évaluer l'effet du cuivre sur la germination des graines de la fève, un test de germination a été réalisé sous différentes concentrations de  $\text{Cu SO}_4$ .

#### I.3.1. Conduite de l'essai

Les graines de *Vicia faba* L. sont désinfectées par un lavage avec l'eau de javel (4%) pendant 5 min, puis rincées plusieurs fois à l'eau distillée pour éliminer l'eau javel. Les graines

de la fève (A et B) sont placées dans des boîtes de pétri, contenant deux couches de papier filtre imbibé avec des différentes concentrations de cuivre ( $\text{CuSO}_4$ ) (Come, 1970).

Les graines sont mises à germer selon quatre traitements de cuivre (0, 300, 600, 900 ppm), soit 04 répétitions par traitement à l'obscurité et à 25°C (Fig. 11).



**Figure 11** : Étapes de germination des graines de la fève dans différentes concentrations de cuivre.

**a) Taux d'imbibition**

Les graines issus des différents traitements (0, 300, 600, 900ppm) sont pesées chaque 6 heures et pendant 48 heures de la mise en germination.

**b) Longueur de la radicule**

La longueur de la radicule est mesuré (en mm) chaque 24 heures et durant cinq jours.

**I.4. Essai 2 : Effet de cuivre sur la croissance de la fève**

Cet essai a été réalisé dans la serre expérimentale de l'université de Naâma.

**I.4.1. Conduit de l'essai****a) Germination**

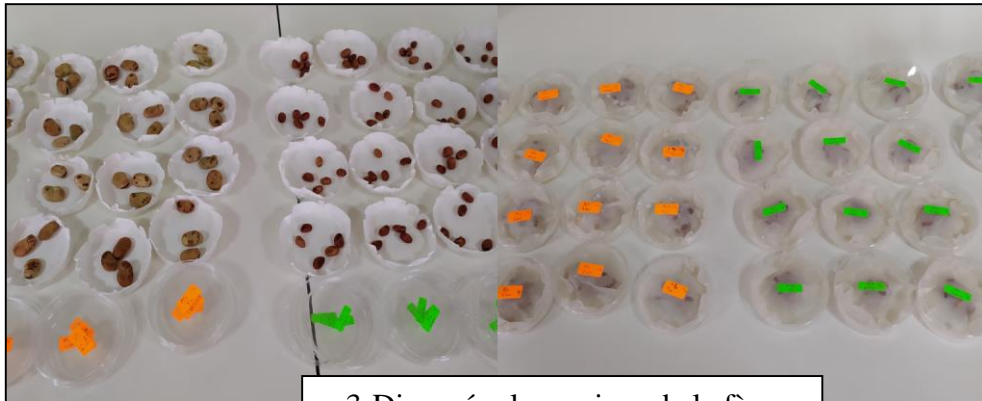
Les graines de *Vicia faba* L. sont triées et stérilisées dans l'eau de javel pendant 5 min, puis rincées plusieurs fois à l'eau distillée. Ensuite, disposées dans les boîtes de pétri et mises à germer entre deux couches de papier filtre imbibé quotidiennement par de l'eau distillée. Les boîtes de pétri sont maintenues à l'étuve à 25°C pendant huit jours.



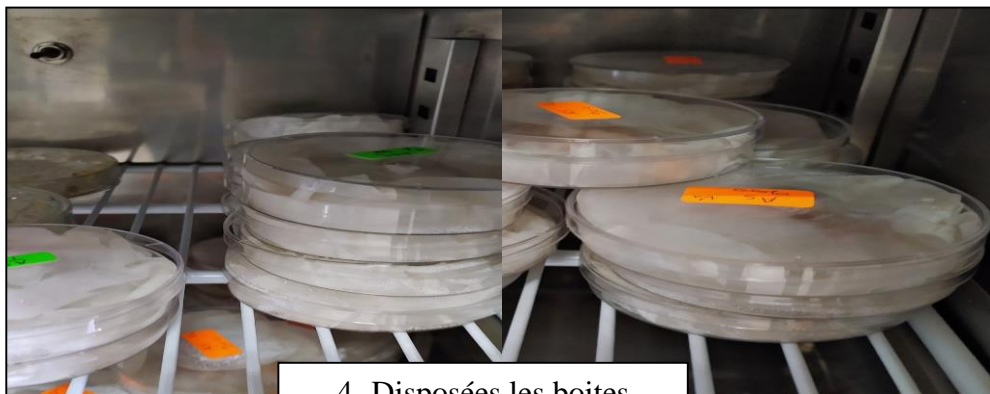
1-Triage des graines de *Vicia faba* L..



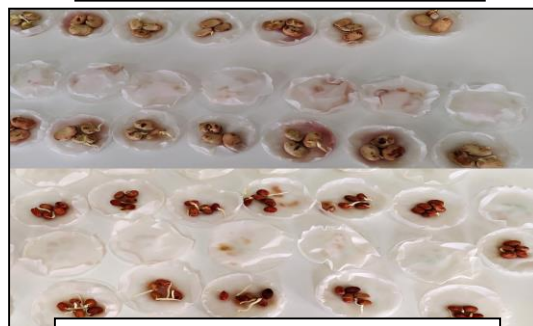
2- Stérilisation et rinçage des graines de la fève.



3-Disposées les graines de la fève dans les boites péttries.



4- Disposées les boites péttries dans l'étuve de 25°C.



5- Germination des graines.

Figure 12 : Stades de germination des grains de *Vicia faba* L.

**b) Préparation de substrat**

Le substrat de culture utilisé est constitué d'un mélange de sable et du terreau industriel (Trois volumes de sable / un volume de terreau).

Avant d'utiliser le sable, il subit une déminéralisation qui a été faite comme suite :

- Tamisage avec un tamis pour obtenir un sable fin.
- Lavage à l'eau de robinet.
- Trempage dans une solution de l'esprit de sel dilué dans l'eau distillée pour éliminer les sels.
- Lavage plusieurs fois à l'eau distillée et séchage à l'air libre.



**Figure 13** : Préparation de substrat de culture utilisé dans l'expérience.

(A) Tamisage, (B) lavage, (C) séchage, (D) préparation de substrat de culture.

### c) Remplissage des cylindres

Les cylindres de culture utilisés à une longueur de 30 cm et 19.5 cm de diamètre, chaque cylindre a été rempli par 6 kg de substrat sec et installés dans la serre jusqu'à la fin de l'expérimentation.



**Figure 14 :** Installation des cylindres dans la serre.

### d) Plantation

Les graines germées sont semées dans les cylindres de culture à une profondeur de 3 cm puis arrosées avec de l'eau.



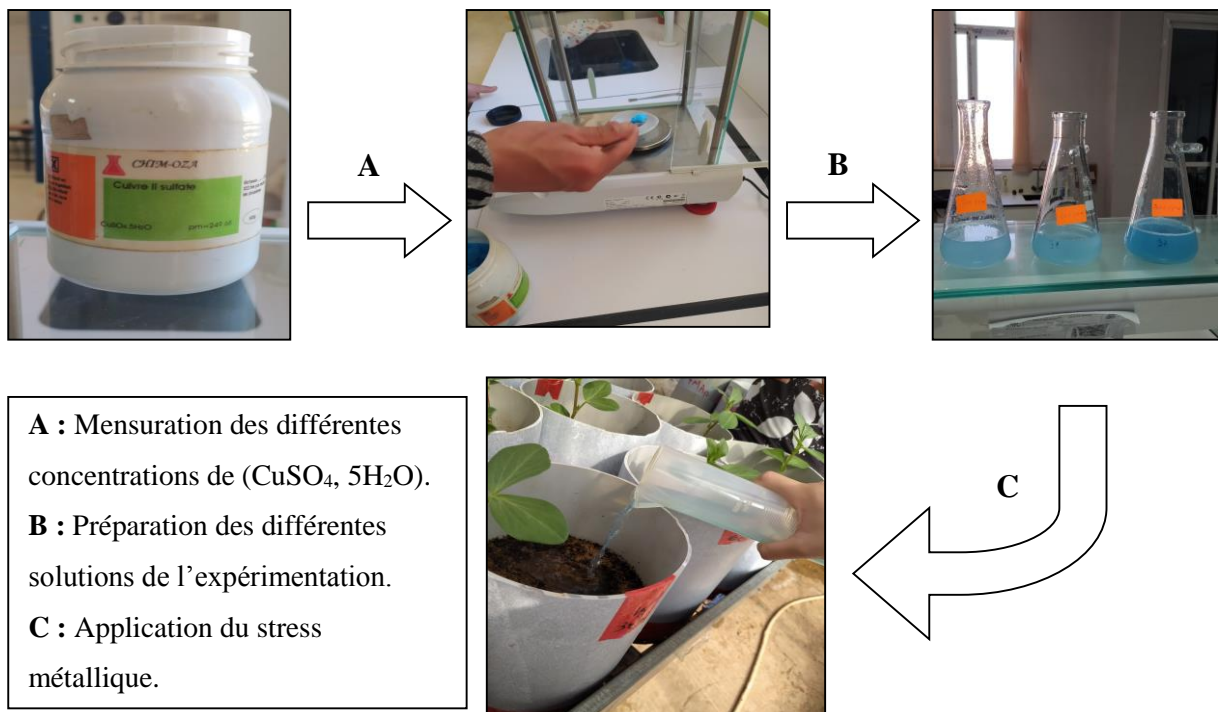


**Figure 15 :** Plantation des graines germées.

### e) Application de stress métallique

Le stress métallique sous forme des solutions de  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  a été appliqué à la plante après 10 jours de la plantation.

Les concentrations appliquées sont ; 0, 300, 600 et 900 ppm, chaque concentration a été répétée 04 fois pour les deux variétés de la fève. Le nombre total des plantes dans cette expérimentation est de 32 plantes (stressées et témoins).



**Figure 16 :** Application du stress métallique.

## f) Irrigation

L'irrigation avec de l'eau et une solution nutritive est effectuée périodiquement pour maintenir le substrat de culture à la capacité de rétention maximale.

L'irrigation se fait deux à trois fois par semaine selon la capacité de rétention. La solution nutritive ACTIFEG puissance 20 est ajoutée une fois chaque trois irrigations (TAB. 05) avec une concentration de 5g/l.

**Tableau 05 :** Composition chimique de la fertilisante « Actifeg ».

| Elément chimique              | Quantité |
|-------------------------------|----------|
| N                             | 20 %     |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | 20 %     |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | 20 %     |
| S                             | 3.8 %    |
| MgO                           | 0.2 %    |
| Mn                            | 80 ppm   |
| Fe                            | 49 ppm   |
| Cu                            | 56 ppm   |
| Zn                            | 55 ppm   |
| Mo                            | 04 ppm   |
| B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 96 ppm   |

















- **Capacité de rétention de l'eau**

















La capacité de rétention est la différence entre le poids d'un cylindre contenant de substrat sec (P1) et le poids (P2) après une irrigation de saturation décanté pendant 24h, qui égale à 200 ml.

## g) Dispositif expérimental

Les cylindres sont placés selon 04 niveaux de traitement de chaque variété avec 4 répétitions.

Deux facteurs ont été étudiés dans cette expérimentation, le facteur « dose de cuivre » et le facteur variétal « type de variété »

| Boussabaa (V1) |   |   |   |   |
|----------------|---|---|---|---|
| N              | D0  | D1  | D2  | D3  |
| R1             |  |  |  |  |
| R2             |  |  |  |  |
| R3             |  |  |  |  |
| R4             |  |  |  |  |

| Sidi Aich (V2) |  |   |   |   |
|----------------|--|---|---|---|
| N              | D0   | D1  | D2  | D3  |
| R1             |  |  |  |  |
| R2             |  |  |  |  |
| R3             |  |  |  |  |
| R4             |  |  |  |  |

Doses de Cu SO<sub>4</sub> : D0 : 0 ppm. D1 : 300 ppm. D2 : 600 ppm. D3 : 900 ppm.

R1 : répétition N° 1. R2 : répétition N°2. R3 : répétition N°3. R4 : répétition N°4.

Tableau 06 : Dispositif expérimental adopté.

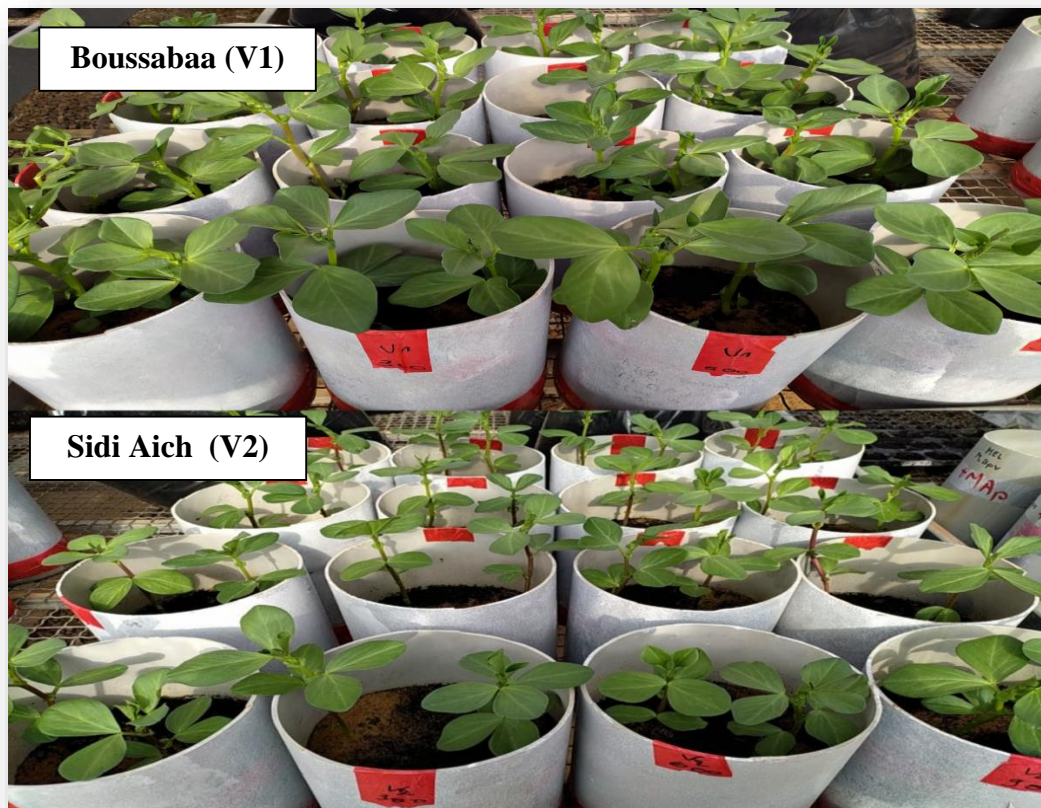


Figure 17 : Dispositif expérimental.

## h) Paramètres mesurés

### ✓ Paramètres morphologiques

Le nombre des feuilles et la hauteur des tiges (cm) de chaque plante ont été mesurés à la fin de l'expérimentation.

Les cylindres sont vidées de leur contenu et les racines sont récupéré et soigneusement lavés. Le volume racinaire (ml) est déterminé par immersion dans une éprouvette graduée.

### ✓ Paramètres physiologiques

#### • Teneur relative en eau (TRE)

Selon la méthode de **Barrs, 1968**. La feuille est coupée à la base du limbe et pesée immédiatement pour obtenir le poids frais (PF). Ensuite, ce feuille est mise dans un tube à essai rempli d'eau distillée dans un endroit frais (à l'obscurité). Après 24 h, la feuille est passée dans un papier buvard pour absorber l'eau de la surface et pesée afin de déterminer le poids de la pleine turgescence (PT). Enfin, la feuille est mis à l'étuve (105 °C pendant 24 h) et pesée pour obtenir le poids sec (PS).

La teneur relative en eau des feuilles de la fève est déterminer par la formule de **Clarke et McCaig., (1982)** :

$$\text{TRE (\%)} = [(\text{PF}-\text{PS}) / (\text{PT}- \text{PS})] \times 100$$

#### • Teneur en chlorophylle

La chlorophylle est déterminé par chlorophylle mètre CCM-200plus, c'est un appareil portable affiche directement la teneur en chlorophylle des feuilles. Le chlorophylle mètre est calibré pour mesurer la teneur en chlorophylle en  $\mu\text{mol} / \text{m}^2$  (**Parry et al., 2014**).



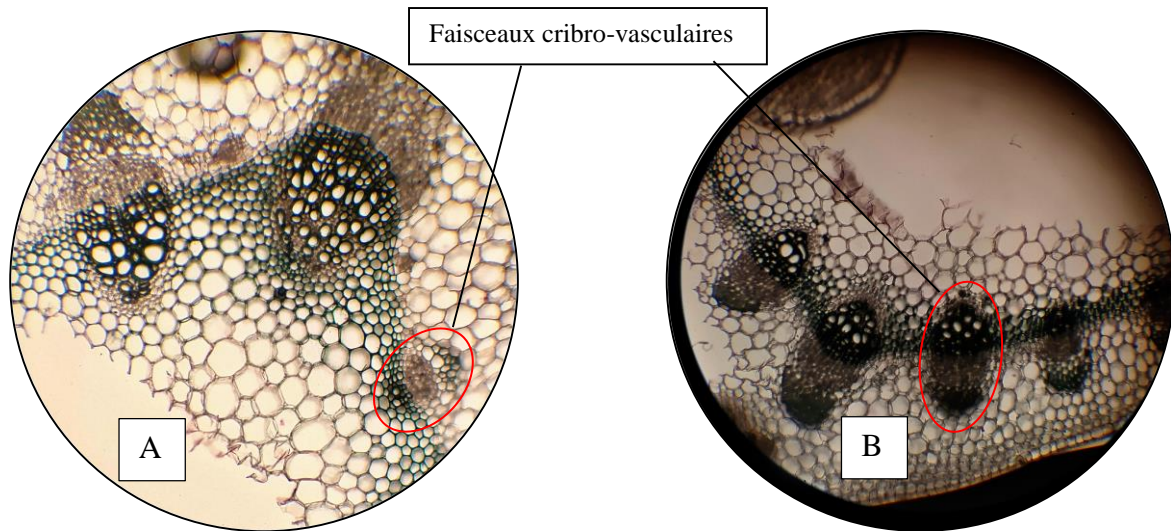
**Figure 18 :** Chlorophylle mètre CCM-200plus.

### ✓ Paramètres anatomiques

Les coupes anatomiques sont réalisées sur les tiges de la fève. Une partie de tige (1cm) est prélevée et fixée dans un fixateur composé d'un mélange d'acide acétique et d'éthanol à des proportions respectivement 3/17 durant 24 heures. Ensuite, les échantillons sont lavés avec de l'eau pendant 24 heures. Enfin les échantillons sont déshydratés par passage dans des concentrations croissantes d'éthanol (50%, 70%), et conservés dans l'éthanol à 70%.

Les coups anatomiques sont réalisées à main levée sous un stéréo microscope, puis colorés par un double colorant (vert de méthyle et rouge Congo) et observé par un microscope.

Les mesures ont porté sur le nombre de faisceaux cribro-vasculaires (Fig. 22).



**Figure 19 :** Coupe anatomique sur la tige de la fève (faisceaux cribro-vasculaires) (A) Boussabaa, (B) Sidi Aich.

### I.5. Analyse statistique

Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel STAT BOX. Une analyse de variance (ANOVA), et comparaison des moyennes par le test de NEWMAN-KEULS ( $P = 5\%$ ) ont été utilisées.

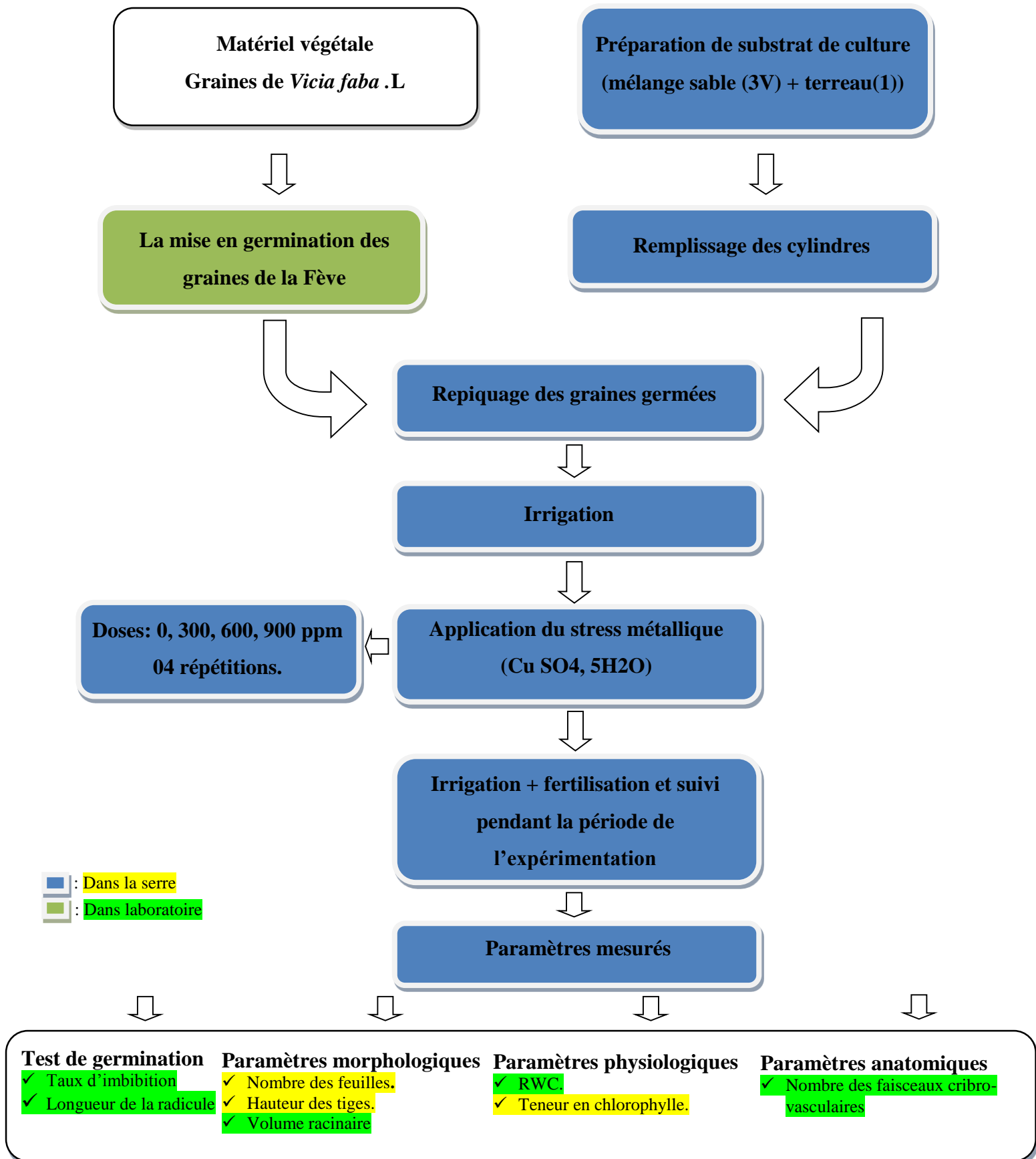


Figure 20 : Schéma général de protocole expérimental.

# **Partie III**

## **Résultats et discussion**



## I. Résultats

### I.1. Effet du cuivre sur la faculté germinative

#### I.1.1. Taux d'imbibition

**Tableau 07** : Analyse de la variance des paramètres étudiés

| Paramètres étudiés                    | Probabilité     |            |
|---------------------------------------|-----------------|------------|
|                                       | Doses de cuivre | Variétés   |
| Longueur des racicules                | 0***            | 0,00028*** |
| Nombre de feuilles                    | 0***            | 0,68509NS  |
| Hauteur des tiges                     | 0***            | 0,06784NS  |
| Volume racinaire                      | 0***            | 0,05453NS  |
| Teneur relative en eau (RWC)          | 0***            | 0.015***   |
| Teneur en chlorophylle                | 0,00002***      | 0,38449NS  |
| Nombre de faisceaux cribro-vasculaire | 0,00015***      | 0,00359**  |

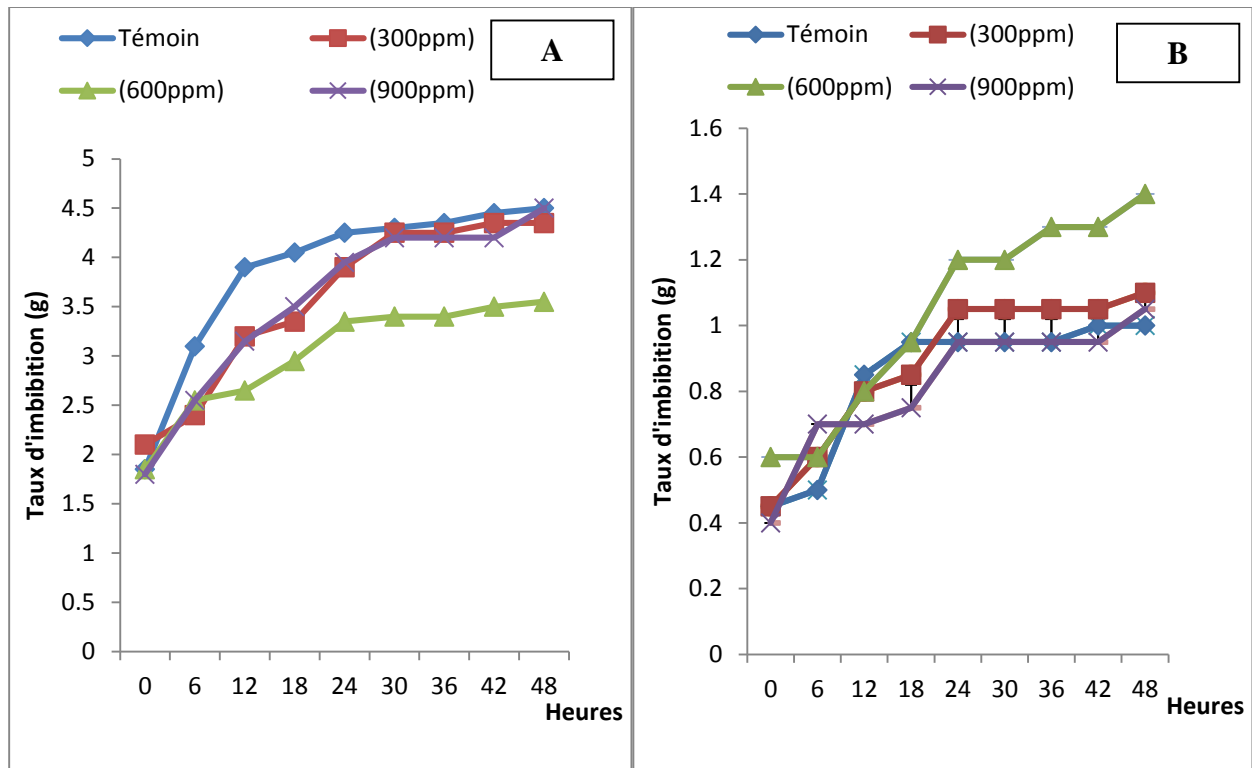
**NS**: Non significative    **\*\*\***: Très haute significative    **\*\***: Haute significative    **\***: Significative

Les résultats des taux d'imbibitions montrent une variation comportementale entre les deux variétés testées. L'application de cuivre provoque de nettes variations des taux d'imbibition des graines de *Vicia faba* ; Boussabaa (A) et Sidi Aich (B) (Fig. 21). On observe également une stabilisation d'imbibition au bout de 12 h de mise en germination chez la variété Boussabaa (A), et au bout de 24 h chez la variété (B).

Chez la variété Boussabaa (A), le taux d'imbibition aux graines témoin est plus élevé par rapport aux autres doses. L'addition de cuivre au milieu de germination (300 et 900 ppm) provoque une diminution du taux d'imbibition par rapport au témoin, particulièrement au cours de la première période (24 heures), ou l'abaissement du taux d'imbibition atteint à 17.94 % et 19.23% après 12 heures respectivement par rapport au témoin. Par contre, l'addition de cuivre à 600 ppm, provoque une diminution importante du taux d'imbibition par rapport au témoin.

Chez la variété (B), l'application de différentes doses de Cu au cours de la 1<sup>er</sup> période (0 à 18 heures) provoque des variations très distinctes des taux d'imbibitions des graines. Tandis que, l'accroissement de doses de  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  a augmenté le taux d'imbibition après 18 heures de la mise en germination. Au cours de cette période, on remarque des augmentations importantes du taux d'imbibitions aux doses de 600 et 300 ppm par rapport au témoin. Cependant, Au bout

de 48 h, les augmentations respectives du taux d'imbibition des graines s'évaluent à 10% et 40% dans les traitements 300 et 600 ppm (Fig. 21).



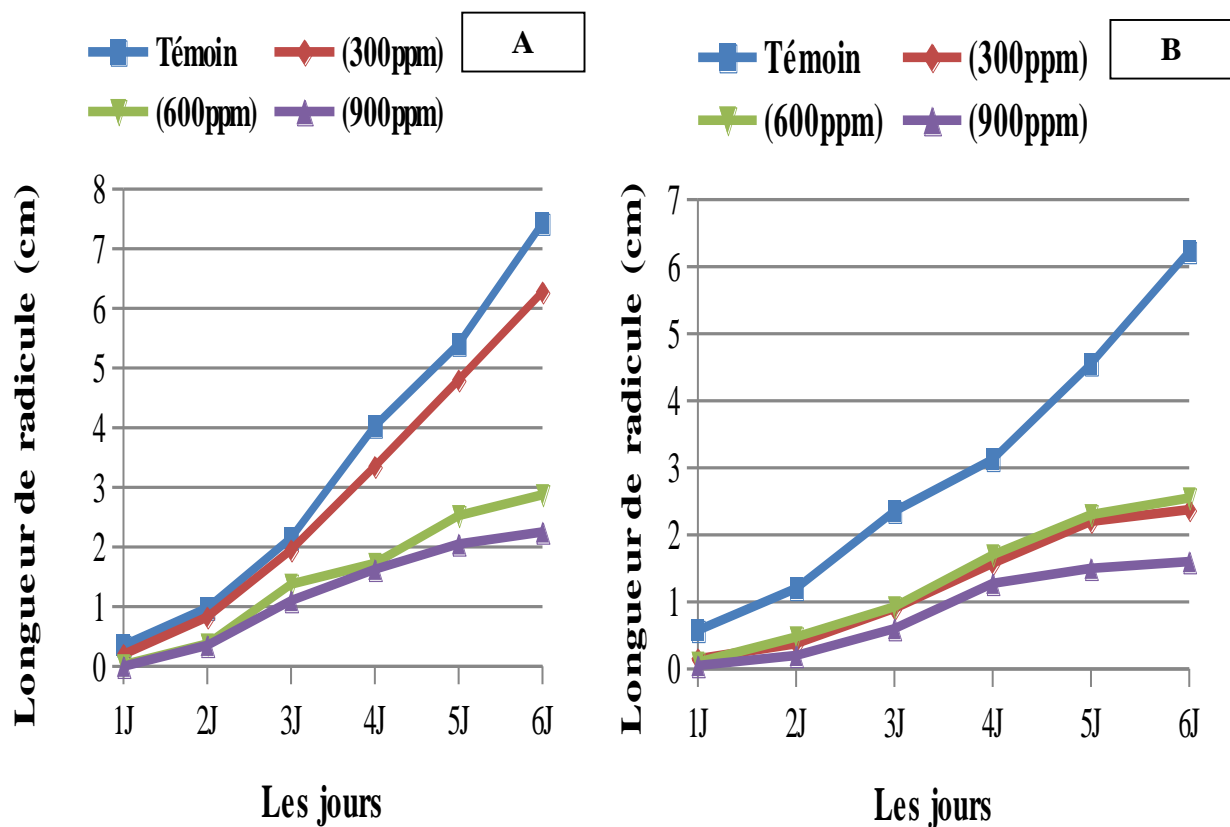
**Figure 21 :** Effet du cuivre sur l'évolution du taux d'imbibition en fonction du temps (heures) chez les deux variétés de la fève.

### I.1.2. Longueur de la racicule

La figure 22 représente l'évolution de la longueur des racicules chez les deux variétés de la fève en fonction du temps pour l'ensemble des traitements (0,300, 600 et 900 ppm).

Les courbes montrent un ralentissement de la cinétique de la croissance des racicules en fonction de l'augmentation des doses de cuivre.

La cinétique de croissance maximale est enregistrée chez les plantes témoins des deux variétés de la fève. Chez la variété Boussabaa (A), les graines stressées au  $\text{CuSO}_4$  à des doses de 600 et 900 ppm évoluent très lentement par rapport aux témoins. Par contre le traitement à 300 ppm de cuivre provoque un faible ralentissement de la croissance des racicules. Ainsi, chez la variété (B), l'application croissante des doses de 300, 600 et 900 ppm retarde considérablement l'élongation des racicules par rapport au témoin.



**Figure 22** : Effet du cuivre sur l'évolution de la longueur des racines en fonction du temps (jours) chez les deux variétés étudiées.

### a) Longueur de la racine finale

Les résultats moyens (Fig. 23), montrent que les concentrations de Cu affectent significativement la longueur des racines finales (après 05 jours) ( $P < 0.001$ ).

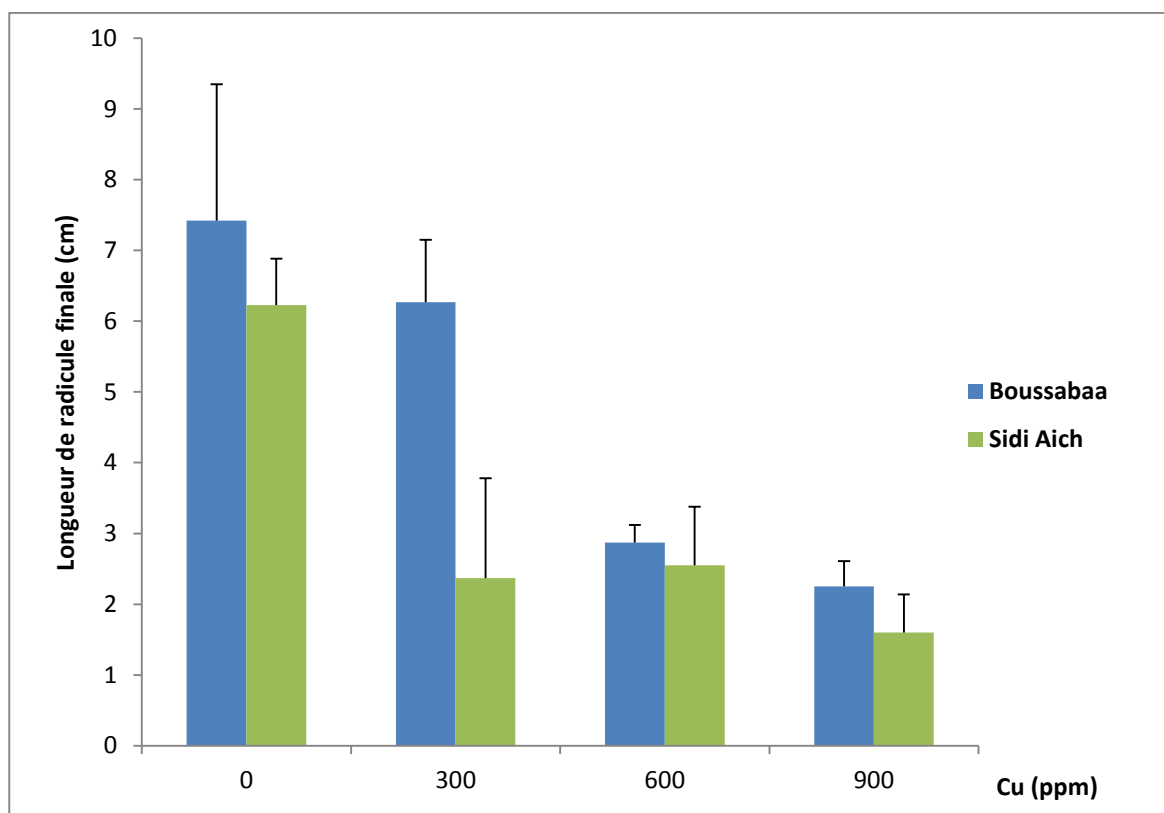
Chez la variété Boussabaa (A), la diminution de la longueur des racines est faible à la dose de 300 ppm, on observe un abaissement de 15.48% par rapport au témoin. Par contre les applications des doses de 600 et 900 ppm provoquent respectivement des diminutions de 61.27% et 69.69%, de la longueur des racines par rapport au témoin.

Chez la variété B (la féverole), on observe des diminutions significatives de la longueur des racines chez les graines traitées par les doses de 300 et 600 ppm, ces diminutions sont de l'ordre de 61.84% et 59.03% respectivement par rapport au témoin. Par contre les plantes germées à la dose de 900 ppm, leurs long raculaire sont diminué fortement (74.29% par rapport au témoin) (TAB. 08).

**Tableau 08 :** Longueur des racicules finales (cm) des deux variétés de *Vicia faba* L. exposés au cuivre.

| Dose de Cu             | Bossabaa (A) <sup>A</sup>    |               | Sidi Aich (B) <sup>B</sup>   |               |
|------------------------|------------------------------|---------------|------------------------------|---------------|
|                        | Longueur de la racicule (cm) | Evolution (%) | Longueur de la racicule (cm) | Evolution (%) |
| <b>0<sup>A</sup></b>   | 7.425±1.93                   | /             | 6.225±0.66                   | /             |
| <b>300<sup>B</sup></b> | 6.275±0.88                   | -15.48%       | 2.375±1.41                   | -61.84%       |
| <b>600<sup>C</sup></b> | 2.875±0.25                   | -61.27%       | 2.55±0.83                    | -59.03%       |
| <b>900<sup>C</sup></b> | 2.25±0.36                    | -69.69%       | 1.6±0.54                     | -74.29%       |

A, B et C: Groupes homogènes selon le test NEWMAN-KEULS (annexe 1).



**Figure 23 :** Effet du cuivre sur la longueur de racicule finale des deux variétés de la fève.

## I.2. Effet du cuivre sur les paramètres morphologiques de *Vicia faba* L.

### I.2.1. Nombre des feuilles

Nos résultats révèlent (Fig. 24), que le nombre de feuilles est affecté par l'excès de cuivre dans le milieu de culture, ou l'effet de « dose de cuivre » est très haut significative ( $P < 0.001$ ). Tandis que le facteur « type de variété » provoque un effet non significative ( $P > 0.05$ ) sur le nombre de feuilles (TAB. 07).

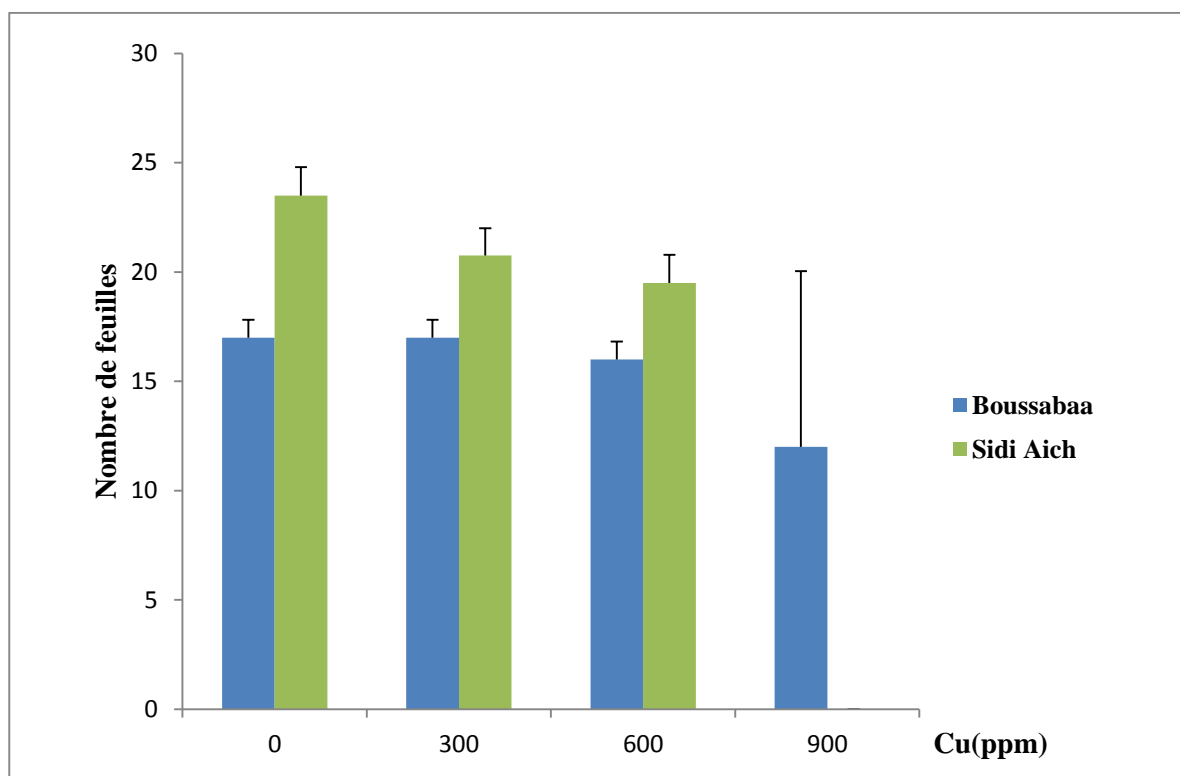
Chez la variété Boussabaa (A), le nombre des feuilles des plantes témoins et les plantes stressées par 300 ppm sont identiques. Par contre, l'ajoute des concentrations de 600 et 900 ppm provoquent des réductions de 5.88% et 29.41% de nombre des feuilles.

Chez la variété (B), l'ajoute des doses de 300 et 600 ppm entraine une régression de 11.7% et 17.02% de nombre des feuilles respectivement, par rapport au témoin. En revanche, les plantes qui reçoivent la dose de 900ppm sont mortes (TAB. 09).

**Tableau 09 :** Nombre des feuilles des deux variétés de *Vicia faba* L. exposés au cuivre.

| Dose de Cu       | Bossabaa (A)        |               | Sidi Aich (B)       |               |
|------------------|---------------------|---------------|---------------------|---------------|
|                  | Nombre des feuilles | Evolution (%) | Nombre des feuilles | Evolution (%) |
| 0 <sup>A</sup>   | 17±0.81             | /             | 23.5±1.29           | /             |
| 300 <sup>A</sup> | 17±0.81             | 00%           | 20.75±1.25          | -11.7%        |
| 600 <sup>A</sup> | 16±0.81             | -5.88%        | 19.5±1.29           | -17.02%       |
| 900 <sup>B</sup> | 12±8.04             | -29.41%       | 00±00               | 00%           |

A et B : Groupes homogènes selon le test NEWMAN-KEULS (annexe 2).



**Figure 24 :** Effet du cuivre sur le nombre de feuilles des deux variétés de la fève.

### I.2.2. Hauteur de tige

La figure 25 représente les chiffres moyens de la longueur des tiges chez les deux variétés (A et B) de la fève traitées par différentes doses de cuivre.

La longueur des tiges de la fève et la féverole (A et B) est diminué en fonction de l'augmentation des concentrations de cuivre, ou l'effet de ce facteur est hautement significatif ( $p=0$ ) sur l'élongation de la tige (TAB. 07).

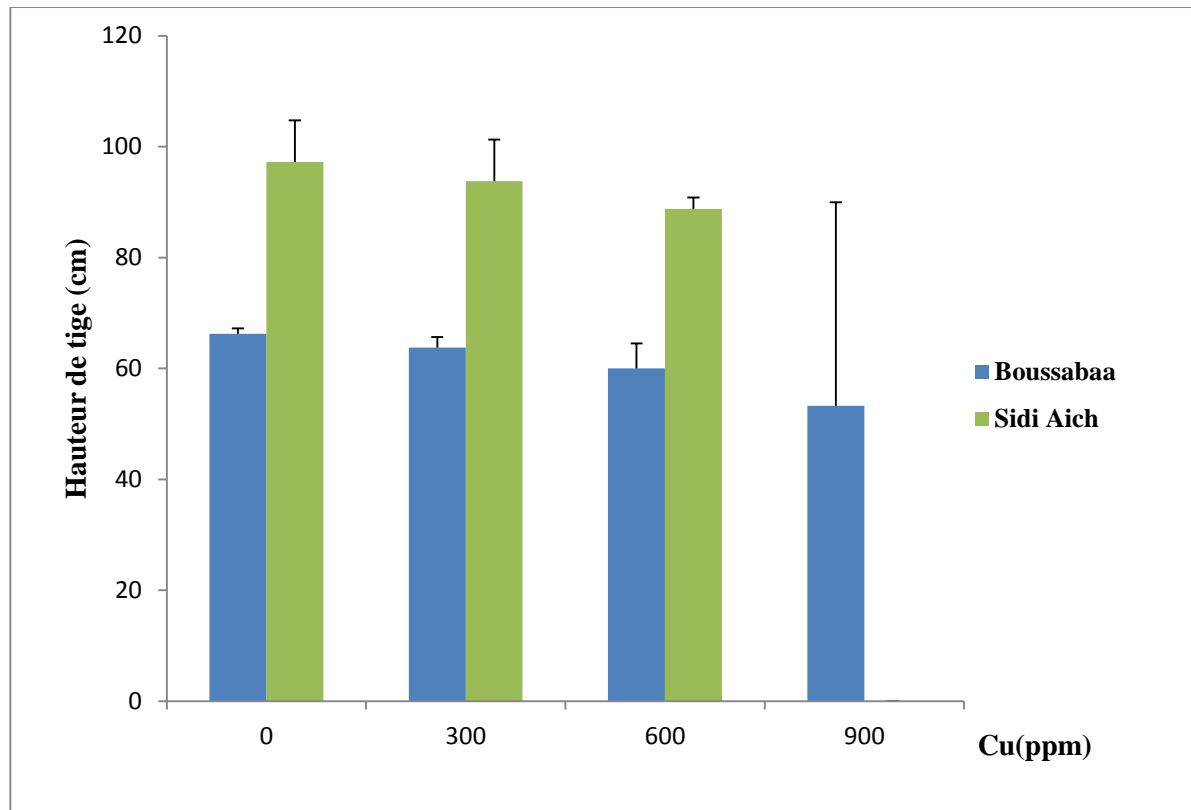
Les évolutions obtenues de la hauteur des tiges chez la variété (A) sont faibles à la dose de 300 et 600 ppm, on observe respectivement des abaissements de 3,77% et 9,43% par rapport au témoin. Alor que, l'application de 900 ppm provoque une diminution de 19,62% de la hauteur de la tige par rapport au témoin.

Chez la variété B (la féverole), on observe également des évolutions régressives faibles de la hauteur des tiges aux concentrations de 300 et 600 ppm, soit des diminutions de 3,59% et 8,74%, respectivement par rapport au témoin. Dans la dose 900 ppm, les plantes sont mortes (TAB. 10).

**Tableau 10:** Hauteur de la tige (cm) des deux variétés de *Vicia faba* L. exposés au cuivre.

| Dose de Cu       | Bossabaa (A)         |               | Sidi Aich (B)        |               |
|------------------|----------------------|---------------|----------------------|---------------|
|                  | Hauteur de tige (cm) | Evolution (%) | Hauteur de tige (cm) | Evolution (%) |
| 0 <sup>A</sup>   | 66.25±0,95           | /             | 97.25±7.5            | /             |
| 300 <sup>A</sup> | 63.75±1.89           | -3.77%        | 93.75±7.54           | -3.59%        |
| 600 <sup>A</sup> | 60±4.54              | -9.43%        | 88.75±2.06           | -8.74%        |
| 900 <sup>B</sup> | 53.25±36.72          | -19.62%       | 00±00                | 00%           |

A, B : Groupes homogènes selon le test NEWMAN-KEULS (annexe 3).



**Figure 25 :** Effet du cuivre sur la hauteur de la tige des deux variétés de la fève.

### I.2.3. Volume racinaire

Le volume racinaire est diminué au fur et à mesure que les concentrations de cuivre (Cu SO<sub>4</sub>) élevés (Figure 26), cette diminution est hautement significatif sous l'effet du cuivre ( $p < 0.001$ ) (TAB. 07).

Variété Boussabaa (A) :

Le volume racinaire a subi une faible diminution à la dose de 300 ppm (1.6% par rapport au témoin). Par contre, les traitements avec les concentrations de 600 et 900 ppm provoquent des fortes diminutions du volume racinaire, on constate des régressions de 26% et 46% respectivement par rapport au témoin.

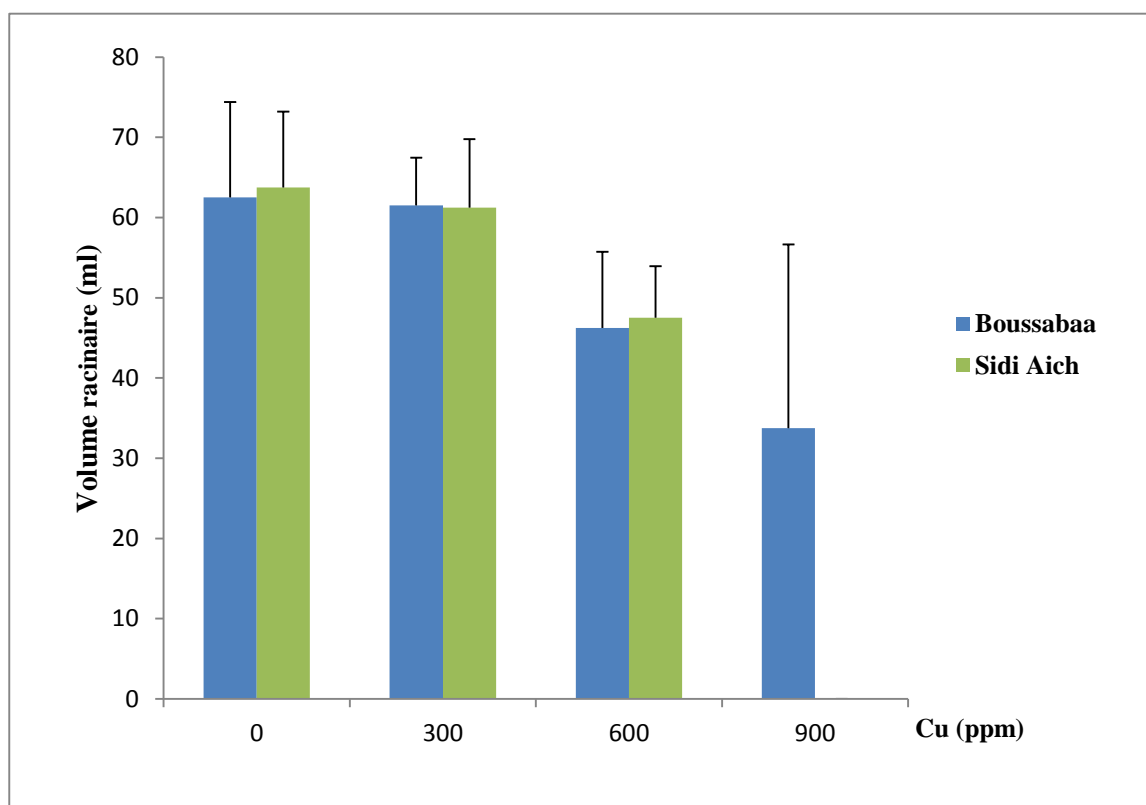
Variété (B) (la féverole) :

A la concentration de 300 ppm, le volume racinaire a subi une légère régression de 3,92% par rapport au témoin. Par contre, à la dose de 600 ppm, on remarque une diminution de 25,49% (par rapport au témoin). Dans la dose 900 ppm, les plantes sont mortes (TAB. 11).

**Tableau 11 :** Volume racinaire (ml) des deux variétés de *Vicia faba* L. exposés au cuivre.

| Dose de Cu             | Bossabaa (A)          |               | Sidi Aich (B)         |               |
|------------------------|-----------------------|---------------|-----------------------|---------------|
|                        | Volume racinaire (ml) | Evolution (%) | Volume racinaire (ml) | Evolution (%) |
| <b>0<sup>A</sup></b>   | 62.5±11.9             | /             | 63.75±9.46            | /             |
| <b>300<sup>A</sup></b> | 61.5±5.97             | -1.6%         | 61.25±8.53            | -3.92%        |
| <b>600<sup>B</sup></b> | 46.25±9.46            | -26%          | 47.5±6.45             | -25.49%       |
| <b>900<sup>C</sup></b> | 33.75±22.89           | -46%          | 00±00                 | 00%           |

A, B et C: Groupes homogènes selon le test NEWMAN-KEULS (annexe 4).

**Figure 26 :** Effet du cuivre sur le volume racinaire des deux variétés de la fève.

### I.3. Effet du cuivre sur les paramètres physiologiques de *Vicia faba* L.

#### I.3.1. Teneur relative en eau (RWC)

Les résultats de la teneur relative en eau des deux variétés (Boussabaa, Sidi Aich) sont présentés dans la figure 27.

Le stress de cuivre affect significativement ( $p < 0.001$ ) la teneur relative en eau (TAB. 07) principalement chez la variété Boussabaa, où l'excès de cuivre exerce une diminution de 28.78%



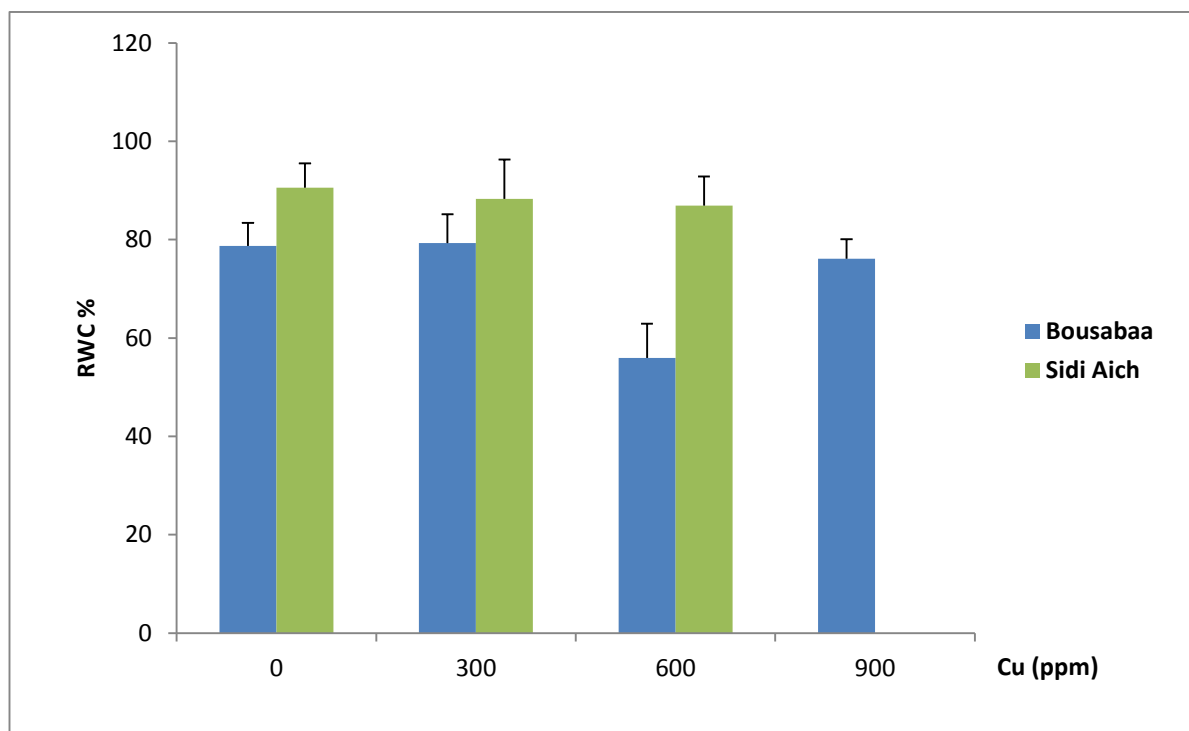
de la RWC chez les plantes stressées par la dose de 600 ppm. On note également, les plantes qui reçoivent les doses de 300 et 900 ppm de cuivre enregistrent des faibles diminutions de teneur relative en eau, (0,78% et 3,04% par rapport au témoin).

Chez la variété (B), les applications (300 et 600 ppm) en Cu provoquent une légère diminution de teneur relative en eau avec des valeurs 2,53% et 3,96% respectivement, par rapport au témoin (TAB. 12).

**Tableau 12 :** Teneur relative en eau en (%) des deux variétés de *Vicia faba* L. exposés au cuivre.

| Dose de Cu       | Bossabaa (A) <sup>A</sup> |               | Sidi Aich (B) <sup>B</sup> |               |
|------------------|---------------------------|---------------|----------------------------|---------------|
|                  | RWC(%)                    | Evolution (%) | RWC(%)                     | Evolution (%) |
| 0 <sup>A</sup>   | 78.70±4.68                | /             | 90.56±4.94                 | /             |
| 300 <sup>A</sup> | 79.28±5.84                | 0.87%         | 88.26±8.01                 | -2.53%        |
| 600 <sup>B</sup> | 55.91±6.97                | -28.78%       | 86.88±5.9                  | -3.96%        |
| 900 <sup>C</sup> | 76.11±3.97                | -3.04%        | 00±00                      | 00%           |

A, B et C: Groupes homogènes selon le test NEWMAN-KEULS (annexe 5).



**Figure 27 :** Effet du cuivre sur la teneur relative en eau (%) des deux variétés de la fève.

### I.3.2. Teneur en chlorophylle

La figure 28 représente les résultats de la teneur en chlorophylle des feuilles des deux variétés de *Vicia faba*, sous l'effet du Cu.

Le facteur « dose de cuivre » provoque un effet très hautement significatif ( $p < 0.001$ ) sur les évolutions des teneurs en chlorophylle (TAB. 07). Les concentrations 600 et 900 ppm de cuivre sont à l'origine des diminutions importantes de ce paramètre chez la variété Boussabaa (A).

Variété Boussabaa (A) :

Les concentrations de 600 et 900 ppm sont aboutis à des abaissments très marqués de la teneur en chlorophylle, (51.23% et 40.72%) respectivement, par rapport témoin. Par contre, l'ajoute de la concentration de 300 ppm a augmenté la teneur en chlorophylle jusqu'à 21.46%.

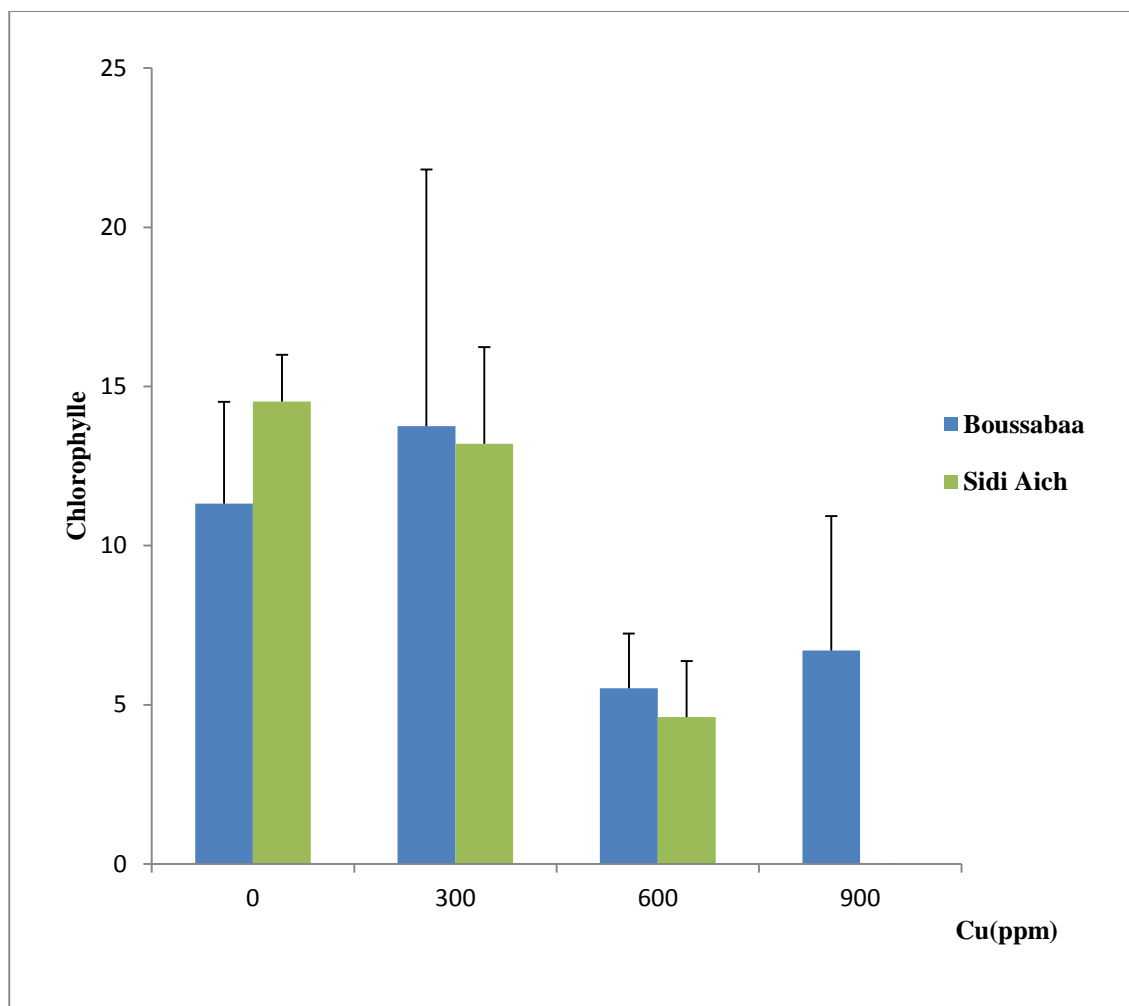
Variété B (Féverole),

Le traitement avec 300 ppm affiche un léger abaissement de la teneur en chlorophylle, cette diminution est égale à 9.15% par rapport au témoin. Par contre, la dose de 600 ppm provoque une réduction importante de 68.20% de la teneur en chlorophylle comparativement au témoin (TAB. 13).

**Tableau 13 :** Teneur en chlorophylle des deux variétés de *Vicia faba* L. exposés au cuivre.

| Dose de Cu       | Bossabaa (A) |               | Sidi Aich (B) |               |
|------------------|--------------|---------------|---------------|---------------|
|                  | Chlorophylle | Evolution (%) | Chlorophylle  | Evolution (%) |
| 0 <sup>A</sup>   | 11.32±3.2    | /             | 14.53±1.46    | /             |
| 300 <sup>A</sup> | 13.75±8.06   | 21.46%        | 13.2±3.04     | -9.15%        |
| 600 <sup>B</sup> | 5.52±1.72    | -51.23%       | 4.62±1.75     | -68.20%       |
| 900 <sup>B</sup> | 6.71±4.22    | -40.72%       | 00            | 00%           |

A et B : Groupes homogènes selon le test NEWMAN-KEULS (annexe 6).



**Figure 28** : Effet du cuivre sur la teneur en chlorophylle des deux variétés de la fève.

#### **I.4. Effet du cuivre sur les paramètres anatomiques de *Vicia faba* L.**

##### **I.4.1. Nombre de faisceaux cribro-vasculaires**

Le nombre de faisceaux cribro-vasculaires de la fève (*Vicia faba* L.) diminue significativement ( $p < 0.001$ ) en fonction de l'accroissement des concentrations en cuivre ( $\text{CuSO}_4$ ). (Fig. 29)

Variété Boussabaa (A) :

Il apparaît que les applications à 300 et 600 ppm réduisent de 17.03% et 20.74% le nombre de faisceaux cribro-vasculaires. Par contre, la dose de 900 ppm entraîne une diminution importante estimée à 45.18 % comparativement au témoin.

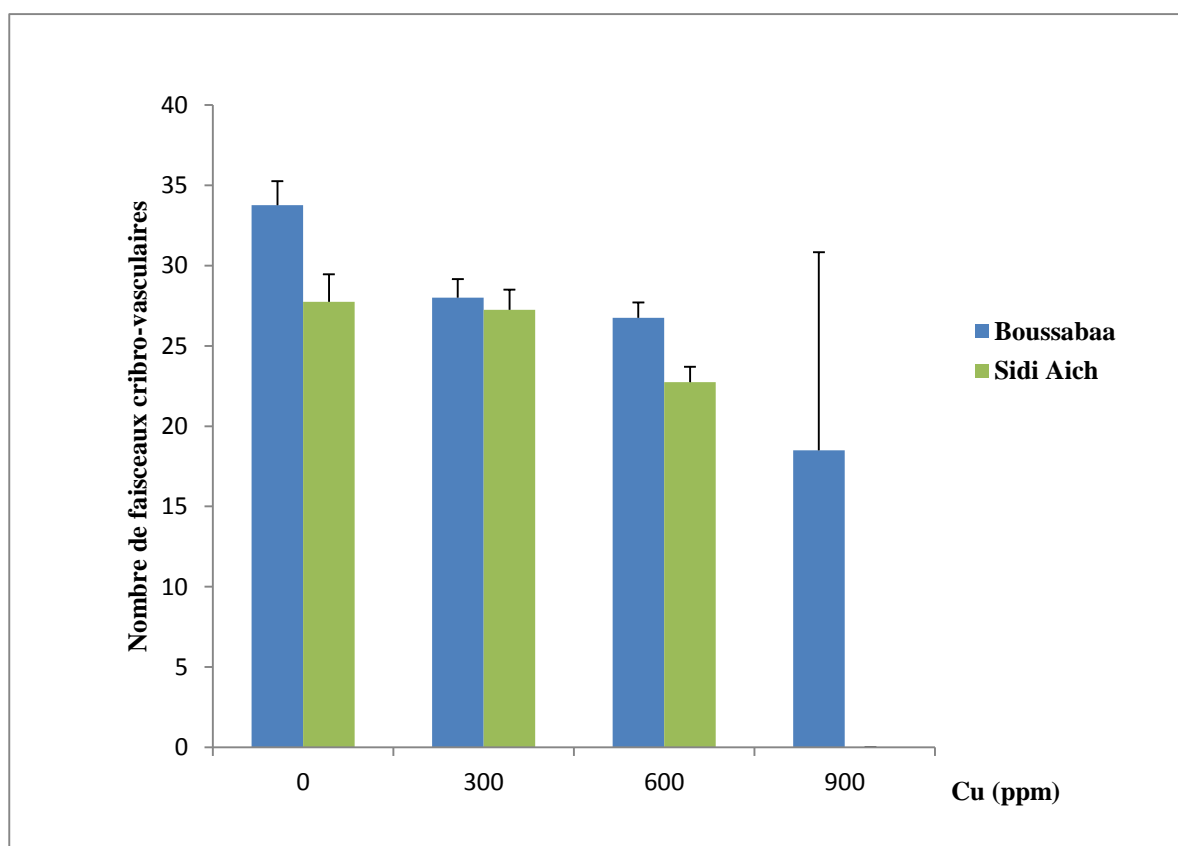
La variété (B) :

La concentration 300 ppm attribue a une faible diminution de 1.8% du nombre de faisceaux cribro-vasculaires, suivie de la dose de 600 avec une diminution significative de 18.01 % par rapport au témoin (TAB. 14).

**Tableau 14** : Nombre de faisceaux cribro-vasculaires des deux variétés de *Vicia faba* L. exposés au cuivre.

| Dose de Cu         | Bossabaa (A) <sup>A</sup>              |               | Sidi Aich (B) <sup>B</sup>             |               |
|--------------------|--|---------------|--|---------------|
|                    | Nombre de faisceaux cribro-vasculaires | Evolution (%) | Nombre de faisceaux cribro-vasculaires | Evolution (%) |
| 0 <sup>A</sup>     | 33.75±1.5                              | /             | 27.75±1.7                              | /             |
| 300 <sup>A,B</sup> | 28±1.15                                | -17.03%       | 27.25±1.25                             | -1.8%         |
| 600 <sup>B</sup>   | 26.75±0.95                             | -20.74%       | 22.75±0.95                             | -18.01%       |
| 900 <sup>C</sup>   | 18.5±12.34                             | -45.18%       | 00±00                                  | 00%           |

A, B et C: Groupes homogènes selon le test NEWMAN-KEULS (annexe 7).



**Figure 29** : Effet du cuivre sur le nombre de faisceaux cribro-vasculaires des deux variétés de la fève.

## II. Discussion générale

### Effet du cuivre sur la faculté germinative de *Vicia faba* L.

Les résultats obtenus montrent que le stress métallique induit par le cuivre affecte la faculté germinative des graines de la fève.

Les résultats de notre travail sur l'impact du cuivre sur le taux d'imbibition indiquent que l'application de cuivre chez la variété Boussbaa induit une inhibition de taux d'imbibition essentiellement à une concentration de 600 ppm. Par contre, chez l'autre variété (la féverole), l'application de stress engendre un accroissement de taux d'imbibition.

Ces résultats sont comparés par le travail de (Mihoub et al., 2004), ils ont indiqué que la teneur en eau des graines de petit pois (*Pisum sativum* L.) n'est pas affectée par la concentration de 5 mM en  $\text{CuSO}_4$  ou  $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$  au cours de la germination. Conformément à nos résultats, Muccifora et al., (2013) ont signalé que le cuivre ( $10^{-5}$ ,  $10^{-4}$ ,  $10^{-3}$  et  $5 \times 10^{-3}$  M) a induit une diminution de taux d'imbibition des graines *Vicia sativa* L.

L'observation des résultats présentés révèle une diminution de la croissance des racicules en fonction de l'augmentation des doses de cuivre chez les deux variétés A et B (essentiellement à la concentration 900 ppm). Selon Khalid, (2016), des concentrations élevées de  $\text{CuSO}_4$  réduisent significativement la croissance des racicules des plantules de *Vicia faba*. La diminution significative de la croissance a commencé avec 100  $\mu\text{Mol}$   $\text{CuSO}_4$  et à la plus forte concentration (250  $\mu\text{Mol}$   $\text{CuSO}_4$ ) utilisée, la croissance des racicules a diminué à 65 % du par rapport au témoin.

Le travail de (Mihoub et al., 2004), indique aussi une forte inhibition de l'élongation racinaire après imbibition avec Cd et Cu.

Une concentration élevée de cuivre a un effet négatif sur la germination du blé et du riz (Mahmood et al., 2007), de la luzerne (Aydinalp et Marinova., 2009), de *Vigna mungi* (Solanki et al., 2011) et de Crambe (Hu et al., 2015).

Les effets néfastes des métaux lourds, en particulier le Cu, ont provoqué des changements structurels et morphologiques des racicules ainsi qu'une inhibition de sa croissance. Les effets néfastes du Cu sur les racicules sont liés à une réduction sévère de l'élongation ainsi qu'à la perméabilité de la membrane plasmique des graines. Le stress oxydatif induit par le Cu a été

identifié dans la réduction sévère des activités enzymatiques impliquées dans les processus métaboliques des graines liés à la germination. (Mahmood et al., 2007)

### Effet du cuivre sur les paramètres morphologiques de *Vicia faba* L.

Les paramètres morphologiques de la fève ont été affectés par le stress métallique induit par le cuivre:

- On a constaté une réduction du nombre de feuilles des deux variétés de la fève (variété A et B) sous l'effet du cuivre.
- Les tiges de *Vicia faba* sont réduites dans toutes les plantes traitées par le cuivre.
- le volume des racinaires de *Vicia faba* est également réduit par le stress au cuivre.

Nos résultats sont en accord avec le travail de (Beldjilali et Zeltissi., 2017) qui ont suggéré que l'application du Cu (100, 200, 300, 400 et 500 ppm) a réduit le nombre de feuilles et la hauteur des tiges de *Lycopersicon esculentum* Mill. En revanche, les résultats observés par Benouis, (2012) sur des plantes de *Vicia faba* traitées avec des concentrations du CuSO<sub>4</sub> (0, 100, 200 et 400 ppm), il a montré que ces concentrations provoquent des diminutions de volume racinaire, hauteur des tiges et nombre de folioles.

La morphologie des racines de *Vigna unguiculata* L est réduite par l'effet de cuivre (Kopittke et Menzies., 2006; Kopittke et al., 2007; Kopittke et al., 2008).

Un excès de Cu peut inhiber l'élongation racinaire et peut augmenter les dommages sur les cellules épidermiques et aux membranes cellulaires des racines (Lin et al., 2003). La modification de la longueur de la tige pourrait être due aux changements de la concentration des ions minérales dans les plantes qui ont provoqué à l'inhibition de la division cellulaire (Feigl et al., 2015; Kopittke et Menzies., 2006). Généralement, la faible croissance des plantes qui se manifeste en présence d'un excès de métaux toxiques est corrélée à la teneur de métal présente dans leurs tissus (Kang et al., 2017).

## Effet du cuivre sur les paramètres physiologiques de *Vicia faba* L.

### Teneur relative en eau

Dans nos résultats, l'état hydrique de la fève est affecté par le cuivre, avec une réduction de la teneur relative en eau (RWC). Nos résultats concordent avec ceux de **Khedim, (2019)** qui ont suggéré que la RWC de plante *Atriplex canescens* diminue lorsque la concentration de Cu augmente (0, 2000, 2500, 3000 et 3500 ppm). D'autre étude ont permis d'observer une diminution de la teneur relative en eau sous l'effet de cuivre (**Demirevska et al., 2004 ; Ayed et al., 2018**). Des résultats similaires obtenus par (**Benouis, 2012**), il a montré qu'il y a une faible diminution des teneurs relatives en eau (RWC) chez deux variétés de (*Vicia faba* L.) traitées par le cuivre. **Martinez et al (2011)**, ont signalé également une légère réduction de la teneur en eau relative sous l'effet d'un excès de cuivre chez *Bituminaria bituminosa*, et une réduction important sous l'effet de zinc.

Pour maintenir l'équilibre de l'eau, les plantes sont adoptées par des mécanismes spécifiques pour minimiser les pertes d'eau en présence de métaux lourds (**Rucińska-Sobkowiak, 2016**). En effet, une légère diminution de la RWC qui n'a pas dépassé 5% chez la féverole (Sidi Aïch) pourrait être liée à une grande capacité d'ajustement osmotique. Le maintien d'un statut hydrique élevé est généralement lié à la capacité de limiter les pertes d'eau par transpiration (**Ayed et al., 2018**).

### Teneur en chlorophylle

Les résultats obtenus montrent que l'effet du cuivre, se traduit par une diminution de la chlorophylle chez les variétés de la fève. Des résultats similaires de **Saleem et al., 2020** qui a suggéré que l'impact le plus commun du stress Cu est une diminution des pigments photosynthétiques dans les feuilles. De plus, les résultats de **Saleem et al., 2020**, ont également révélé que les concentrations élevées de Cu dans le sol affectent significativement la teneur en chlorophylle de *Corchorus capsularis*. Conformément à nos résultats, **Nazir et al., 2019** ont démontré que les plantes tomate (*Solanum lycopersicum* L.) traitées par Cu (100 mg. kg<sup>-1</sup>) présentaient une réduction significative de la teneur en chlorophylle par rapport au témoin.

À des concentrations plus élevées, le cuivre constitue un inhibiteur efficace de la photosynthèse chez les espèces supérieures, il affecte les facteurs de la photosynthèse tel que le transport des électrons, la composition des chloroplastes et les teneurs en pigments chlorophylliens (**Caspi et al., 1999**).

### Effet du cuivre sur les paramètres anatomiques de *Vicia faba* L.

Les plantes transportent l'eau et les éléments minéraux par le xylème et le phloème, qui constituent leur faisceau cribro-vasculaire. Les résultats obtenus montrent que le cuivre a provoqué une réduction du nombre de faisceaux cribro-vasculaires de la tige chez les deux variétés de la fève (Boussbaa et Sidi Aich).

Des altérations anatomiques causées par de fortes concentrations de Cu ont également été observées dans les tiges de sorgho (*Sorghum bicolor*), avec une réduction du nombre de faisceaux vasculaires (Kasim, 2006). Le cuivre réduit également la taille des tissus conducteurs du maïs (Gowayed et Almaghrabi, 2013), et induit l'épaississement des tissus du xylème et la réduction des nombres de faisceaux vasculaires chez les haricots (Bouazizi et al., 2011). Cu a réduit la taille et le nombre de faisceaux vasculaires de la tige de *Vicia faba* après un traitement avec la concentration de  $10^{-5}$  M (pendant 25 jours) (Kasim, 2005).

L'anatomie reflète son rôle essentiel dans la croissance et le développement des plantes. Elle est fonction de l'interaction combinée entre les sources et les puits de deux parties principales de la plante, la racine et la pousse, qui contribuent à établir un équilibre fonctionnel.

Toute altération de la structure des tissus végétaux par les métaux lourds affecte la croissance et la productivité de la plante (Yadav et al., 2021).



# **Conclusion**

### Conclusion générale

Le présent travail a été réalisé pour évaluer l'effet du cuivre sur le comportement de deux variétés de la fève (Boussabaa et Sidi Aich).

L'étude de l'effet du cuivre sur les processus de germination, ont permis de conclure que le milieu contaminé par le cuivre affecte la germination chez la variété Boussabaa, le taux d'imbibition et la longueur de radicule sont diminués en fonction de l'accroissement des doses de cuivre. D'autre part, l'excès de cuivre favorise la prise d'eau et inhibe l'élongation racinaire chez la variété Sidi Aich.

Les paramètres morphologiques de la fève ont été affectés par l'excès de cuivre, les résultats indiquent que :

- La toxicité du cuivre a provoqué une diminution du nombre de feuilles.
- La hauteur de la tige diminue en fonction de l'accroissement des doses de cuivre appliquées.
- Le volume racinaire a subi également une réduction sous l'effet de cuivre.

Sur le plan physiologique, les résultats indiquent que :

- Le stress de cuivre provoque une perturbation de l'état hydrique de la plante (RWC)
- L'activité photosynthétique a été affectée par le cuivre, cette observation a été élucidée par une réduction de la teneur en chlorophylle dans les feuilles de *Vicia faba*.

Sur le plan anatomique, le nombre de faisceaux cribro-vasculaires (éléments conducteurs) a subi une réduction en fonction de l'accroissement des doses de cuivre appliquées (300, 600 et 900 ppm).

Nos résultats suggèrent que l'excès de cuivre dans le milieu provoque une phyto-toxicité sur la fève, ou l'intensité du cuivre à forte dose (900 ppm) a tué les plantes de la variété Sidi Aich.

Il serait intéressant de compléter ce travail par des études sur la dynamique et la localisation du cuivre dans la plante. De plus, il est important d'enrichir ce travail par d'autres études sur les mécanismes de réponse de la fève face au stress métallique.

# **Références Bibliographiques**

## Références Bibliographiques

---

### Références Bibliographiques

**Abderrazzak BA**, 2012. Etude de contamination et d'accumulation de quelques métaux lourds dans des céréales, des légumes et des sols agricoles irrigués par des eaux usées de la ville de hammam boughrara. Thèses de doctorat, chimie de l'environnement, université de Tlemcen.

**Adrian J; Potus J; Fragne R.**, 2002. La science alimentaire de A à Z. Ed.Tech.et Doc.lavoisier(3\_\_éd) ; 579p.

**Adriano DC**, 2001. Copper *in* Trace elements in terrestrial environments, biogeochemistry, bioavailability, and risks of metal. Pp 499-546.

**Alloway BJ**, 1995. Heavy Metals in Soils, Blackie Academic & Professional, London.

**Alloway BJ**, 1995. Soil processes and the behaviour of heavy metals. In: Alloway, B.J. (Ed.). Heavy metals in soils. Chapman & Hall, London, pp. 11-35.

**Alt ER; Sternlieb I; Goldfischer S.**, 1990. "The cytopathology of metal overload." International Review of Experimental Pathology, 31, 165-188.

**Arora A; Sairam R; Srivastava G.**, 2002. Oxidative stress and antioxidative system in plants. Current Science 82(10): 1227-1238.

**Ashan N; Lee DG; Lee SH; Kang KY; Lee JJ; Kim PJ; Yoon HS; Kim JS; Lee BH.**, 2007. Excess copper induced physiological and proteomic changes in germinating rice seeds. Chemosphere. 67: 1182-1193.

**ATSDR**, 1990. Toxicological profile for copper. Atlanta, Georgia, Agency for Toxic Substances and Disease Registry (TP-90-08).

**ATSDR**, 2004. Toxicological profile for copper. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. U.S. Department of Health and Human Services. Public Health Service. Atlanta, Georgia.

**Aubert H; Pinta M.**, 1971. Travaux et documents de l'Institut National de la Recherche Scientifique. N° 11. Les éléments traces dans les sols.

**Aydinalp C; Marinova S.**, 2009. The effects of heavy metals on seed germination and plant growth on Alfalfa Plant (*Medicago sativa*). Bulg. J. Agric. Sci. 15: 347-350.

**Ayed OS; Bouhaoué I; Naouar S; Amar HS.**, 2018. Quelle est la réponse de l'orge (*Hordeum vulgare* L. ssp. *vulgare*) face aux éléments traces métalliques, zinc, cuivre et cadmium? Journal of new sciences, Agriculture and Biotechnology, 58 (3), 3752-3763.

**Babich H; Stotzky G.**, 1980. Environmental factors that influence the toxicity of heavy.

**Barrs, H.** 1968. Determination of water deficit in plant tissues. In: *Water Deficit and Plant Growth*. Koslowski T. Academy Press. New York. 235 -368.

**Baszynski T; Ruszkowska M; Król M; Tukendorf A.**, 1978. The effect of copper deficiency on the photosynthetic apparatus of higher plants.

## Références Bibliographiques

---

- Beldjilali N; Zeltissi K.**, 2017. Effet des métaux lourds (Cu et Zn) sur les paramètres morphologiques et physiologiques de la tomate *Lycopersicon esculentum* Mill.
- Bennett MD**, 1976. DNA amount, latitude, and crop plant distribution. *Environ. Exp. Bot.* 16(2-3):93-98, IN1-IN2, 99-108.
- Benouis S**, 2012. Contribution à l'étude de l'effet des métaux lourds (cuivre) sur les caractéristiques biométriques et chimiques de la fève (*vicia faba* L.) (Doctoral dissertation, Université de Mostaganem-Abdelhamid Ibn Badis).
- Bensaada S; Bendrihem N; Bensaada O.**, 2011. SCIENCE DES MATÉRIAUX deuxième partie.
- Berriau G**, 2012. L'utilisation du cuivre en viticulture : réduction de doses, seuil de toxicité et réglementation.
- Bouazizi H; Jouili H; Geitmann A; El Ferjani E.**, 2011. Cell Wall Accumulation of Cu Ions and Modulation of Lignifying Enzymes in Primary Leaves of Bean Seedlings Exposed to Excess Copper. *Biol. Trace Elem.* 139, 97–107.
- Boyeldieu J**, 1991. Produire des grains oléagineux et protéagineux (pp. 115-152). Technique et documentation-Lavoisier.
- Bravin M**, 2008. Processus rhizosphériques déterminant la biodisponibilité du cuivre pour le blé dur cultivé en sols à antécédent viticole. Centre International d'Etudes Supérieures en Sciences Agronomiques, MontpellierSupAgro, 203 p.
- Caspi V; Droppa M; Horváth G; Malkin S; Marder J B; Raskin V I.**, 1999. The effect of copper on chlorophyll organization during greening of barley leaves. *Photosynthesis Research*, 62(2), 165-174.
- Chaignon V; Bedin F; Hinsinger P.**, 2002. Copper bioavailability and rhizosphere pH changes as affected by nitrogen supply for tomato and oilseed rape cropped on an acidic and a calcareous soil.
- Chaney RL; Malik M; Li YM; Brown SL; Brewer EP; Angle JS; Baker AJM.**, 1997. Phytoremediation of soil metals. *Curr. Opin. Biotechnol.* 8: 279-284.
- Chase MW; Reveal JL.**, 2009. « A Phylogenetic Classification of the Land Plants to Accompany APG III ». *Bot. J. Linn. Soc.* Vol. 161. Pp 122-127.
- Chaux CL; Foury CL.**, 1994. Cultures légumières et maraichères. Tome III: légumineuses potagères, légumes fruit. Tec et Doc Lavoisier, Paris.
- Choudhury S; Panda P; Sahoo L; Panda SK.**, 2013. Reactive oxygen species signaling in plants under abiotic stress. *Plant Signal. Behav.*
- Claire-Emmanuelle M**, 2007. Origine, devenir et impact du cuivre et du zinc des lisiers porcins. rôle de la digestion anaérobie.
- Claire P; Nicolas C; James D.**, 2008. Formes réactives de l'oxygène, stress et mort cellulaire chez les plantes.

## Références Bibliographiques

---

- Clarke JM; McCaig TN.**, 1982. Excised leaf water relation capability as an indicator of drought resistance of *Triticum* genotypes. *Can.J. Plant Sci.* V. 62: 571-577.
- Come D**, 1970. Les obstacles à la germination. Monographies de Physiologie Végétale No. 6, Masson, Paris.
- Cook CM; Kostidou A; Vardaka E; Lanaras T.**, 1997. Effects of copper on the growth, photosynthesis and nutrient concentrations of Phaseolus plants. *Photosynthetica.* 34: 179-193.
- Costa L**, 2018. Illustration d'un tableau périodique des éléments.
- Coullery P**, 1997. Comportement des métaux lourds en agrosystèmes tempérés à faibles taux de pollution métallique. Thèse Doc. Es. sci. Techn. EPE Lausanne, Suisse, 139 p (+Annexes).
- Couplen A; Marm C.**, 2009. Jardinez au naturel. Le jardin plus bio facile, 249 pp.
- Cuberoj I**, 2011. The faba bean: a historic perspective. *Grain Legume* 56: 5-7.
- Cuyppers A**, 2000. Phytotoxic concentrations of copper and zinc induce antioxidative defence in *Phaseolus vulgaris*, cv. Limburgse vroege: a comparative study. Limburgsuniversitair centrum, Diepenbeek, Belgium.
- Dajoz R**, 2000. Elements d'écologie. Ed dunod. Paris, 8eme edition, 631pp.
- 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.
- Droppa M; Masojidek J; Rózsa Z; Wolak A; Horváth LI; Farkas T; Horváth G.**, 1987. Characteristics of Cu deficiency-induced inhibition of photosynthetic electron transport in spinach chloroplasts.
- Duc G**, 1997. Faba bean (*vicia faba* L.). *Field crops research*, 53(1-3), 99-109. el habib, c. m. (2011). *diplome de doctorat* (doctoral dissertation, université d'oran).
- Ebbs SD; Lasat MM; Brady DJ; Cornish J; Gordon R; Kochian LV.**, 1997. Phytoextraction of cadmium and zinc from a contaminated soil. - *J. Environ. Qual.*, 26: 1424-1430.
- EHC 200**, 1998. Environmental Health Criteria: Copper.
- Ellingsen DG; Møller LB; Aaseth J.**, 2015. Chapitre 35 - copper. Dans: Handbook on the toxicology of metals (4e édition). Nordberg, G.F.N.A.F. (éd.). Academic Press, San Diego, California. pp. 765-786.
- Emsley J**, 2003. Nature's building blocks, Oxford University Press Inc., New York.
- FAO (Food and Agriculture Organization)**. 2020. Crop Production and Trade Data. <http://www.fao.org/faostat/en/#data>
- FAO**, 2016. « Légumineuses, des graines nutritives pour un avenir durable ».
- Fargasová A; Bumbálová A; Havránek E.**, 1999. Ecotoxicological effects and uptake of metals (Cu<sup>+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, Mo<sup>6+</sup>, Ni<sup>2+</sup>, V<sup>5+</sup>) in freshwater alga *Scenedesmus quadricauda*. *Chemosphere* 38, 1165-1173.

## Références Bibliographiques

---

- Feigl G; Kumar D; Lehotai N; Pető A; Molnár ÁR; ácz É; Ördög A; Erdei L; Kolbert ZS; Laskay G.,** 2015. Comparing the effects of excess copper in the leaves of *Brassica juncea* (L. Czern) and *Brassica napus* (L.) seedlings: growth inhibition, oxidative stress and photosynthetic damage. *ActaBiol Hung.* (66), 205–221.
- Ferrara G; Loffredo E; Senesi N.,** 2004: Anticlastogenic, antitoxic and sorption effects of humic substances on the mutagen maleic hydrazide tested in leguminous plants. *Eur. J. Soil Sci.* 55(3):449-458.
- 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.
- Gallais A; Bannerot H.,** 1992. Amélioration des espèces végétales cultivées. Objectifs et critères de sélection. Editions Quae.
- Gang A; Vyas A; Vyas H.,** 2013. Toxic effect of heavy metals on germination and seedling growth of wheat. *Journal of Environmental Research and Development*, 8(2), 206–213
- Gowayed SMH; Almaghrabi OA.,** 2013. Effect of Copper and Cadmium on Germination and Anatomical Structure of Leaf and Root Seedling in Maize (*Zea mays* L.). *Aust. J. Basic Appl. Sci.* 7, 548–555.
- Hamadache,** 2003. Effet de l'environnement, de la date de semis et du désherbage sur le rendement en grain et ses composantes chez la fève (*Vicia faba* L.). *Céréaliculture*. No. 29: 15-18.
- Hanelt P; Mettin D.,** 1989. Biosystematics of the genus *Vicia* L. (Leguminosae). *Annu.Rev. Ecol. Syst.* 20:199-223.
- Hänsch R; Mendel RR.,** 2009. Physiological functions of mineral micronutrients (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Mo, B, Cl). *Current Opinion in Plant Biology* 12: 259-266.
- Henckens MLCM; Worrell E.,** 2020. Reviewing the availability of copper and nickel for future generations. The balance between production growth, sustainability and recycling rates, *Journal of Cleaner Production*, 264: 0959-6526.
- Henriques FS,** 1989. Effects of copper deficiency on the photosynthetic apparatus of sugar beet (*Beta vulgaris* L.).
- Hu J; Deng Z; Wang B; Zhi Y; Pei B; Zhang G; Luo M; Huang B; Wu W; Huang B.,** 2015. Influence of heavy metals on seed germination and early seedling growth in *Crambe abyssinica*, a potential industrial oil crop for phytoremediation. *Am. J. Plant Sci.* 6: 150-156.
- Juste C,** 1995. Les micro-polluants métalliques dans les boues résiduelles des stations d'épuration urbaines, Convention ADEME-INRA, ADEME éd., 209p.
- Kabata-Pendias; Pendias.,** 1984. Trace elements in soils and plants. CRC Press, 315 pp.
- Kabata-Pendias; Pendias.,** 1991. Trace elements in soils and plants. 2e éd. CRC Press, Boca Raton, FL.

## Références Bibliographiques

---

- Kabata-Pendias; Pendias.**, 1992. Copper. In: Trace elements in soils and plants, 2nd Edition, CRC Press, pp. 95–108.
- Kabata-Pendias; Pendias.**, 2001. Trace elements in soil and plants.
- Kang SM; Waqas M; Hamayun M; Asaf S; Khan A L; Kim A-Y; Lee I-J.**, 2017. Gibberellins and indole-3-acetic acid producing rhizospheric bacterium *Leifsonia xyli* SE134 mitigates the adverse effects of copper-mediated stress on tomato. *Journal of Plant Interactions*. 12(1), 373–380.
- Kasim WA**, 2006. Changes Induced by Copper and Cadmium Stress in the Anatomy and Grain Yield of *Sorghum bicolor* (L.) Moench. *Int. J. Agric.* 15, 123–128.
- Kasim WA** , 2005. The correlation between physiological and structural alterations induced by copper and cadmium stress in broad beans (*Vicia faba* L.). *Egyptian Journal of Biology* 7: 20-32.
- Khadim IK**, 2019. Phytoremédiation par l’*Atriplex* planté dans des sols enrichis en cuivre, zinc, plomb et cadmium (Doctoral dissertation, PhD thesis. Department of Biology. Abdelhamid Ibn Badis University, Mostaganem).
- Khalid H; Alobaidi.**, 2016. Tolerance of *Vicia faba* to Elevated Concentrations of Copper Ions in Nutrient Medium. *Int.J. Curr. Microbiol .App .Sci.* 5(4): 642-651.
- Khalidi R; Zekri S; Maatougui MEH; Yassine BA.**, 2002. L’Economie des Légumineuses Alimentaires au Maghreb dans le Monde. Proceedings du 2ème séminaire du réseau REMAFEVE/REMALA, « Le devenir des Légumineuses Alimentaires dans le Maghreb », Hammamet, Tunisie, 100pp.
- Khurana N; Singh MV; Chatterjee C.**, 2006. Copper stress alters physiology and deteriorates seed quality of rapeseed. *Journal of Plant Nutrition* 29, 93-101.
- Kopittke P; Blamey F; McKenna B; Wang P; Menzies N.**, 2011. Toxicity of metals to roots of cowpea in relation to their binding strength. *Environ. Toxicol. Chem* 30, 1827-1833.
- Kopittke PM; Blamey FPC; Menzies NW.**, 2008. Toxicities of soluble Al, Cu, and La include ruptures to rhizodermal and root cortical cells of cowpea. *Plant and Soil* 303, 217-227.
- Kopittke PM; JDP; Menzies NW.**, 2007. Toxic effects of low concentrations of Cu on nodulation of cowpea (*Vigna unguiculata*). *Environmental Pollution* 145, 309-315.
- Kopittke PM; Menzies NW.**, 2006. Effect of Cu toxicity on growth of cowpea (*Vigna unguiculata*). *Plant and Soil*, 279(1), 287-296.
- Kumpiene J ; Ore S ; Renella G ; Mench M ; Lagerkvist A ; Maurice C.**, 2006. Assessment of zerovalent iron for stabilization of chromium, copper, and arsenic in soil. *Environmental Pollution* 144, 62-69.
- Langebartels C; Wohlgemuth H; Kschieschan S; Grün S; Sandermann H.**, 2002. Oxidative burst and cell death in ozone-exposed plants. *Plant Physiology and Biochemistry* 40(6-8): 567-575.
- Larcher W**, 2003. *Physiological Plant Ecology: Ecophysiology and Stress Physiology of Functional Groups*. 4 éd., Springer-Verlag, Berlin, 513 p.



## Références Bibliographiques

---

- Laumonnier R**, 1979. Culture légumière et mari chaires, tome iii. ed.j.b. baillier, 276 pp.
- Lenoir T**, 2011. Mécanismes de rétention du cuivre dans les sols: évaluation statistique des approches macroscopiques et spectroscopiques. Sciences de la Terre. Université de Grenoble. Français.
- Leteinturier B**, 2002, Evaluation du potentiel phytocénotique des gisements cuprifères d'Afrique centro-australe en vue de la phytoremédiation des sites pollués par l'activité minière, thèse de doctorat, Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux, Gembloux.
- Lin CC; Chen LM; Liu ZH.**, 2005. Rapid effect of copper on lignin biosynthesis in soybean roots. *Plant Science* 168, 855-861.
- Lin J; Jiang W; Liu D.**, 2003. Accumulation of copper by roots, hypocotyls, cotyledons and leaves of sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Bioresource Technology*, 86(2), 151-155.
- Liu S, Yang C, Xie W, Xia C, Fan P.**, 2012. The effects of cadmium on germination and seedling growth of *Suaeda salsa*. *Procedia Environ. Sci.* 16, 293-298.
- 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.
- Lopez-Bellido F.J; Lopez-Bellido L; Lopez-Bellido R.J.**, 2005. Competition, growth and yield of faba bean (*Vicia faba* L.). *Europ.J.Agronomy.* 23: 359-378.
- Loué A**, 1993. Oligoéléments en agriculture.- Ed. Nathan, 577pp.
- Maatougui MEH**, 1996. Situation de la culture des fèves en Algérie et perspectives de relance. *Céréaliculture, numéro spéciale Fève*: 17-30.
- Maderova L; Watson M.**, 2011. Bioavailability and toxicity of copper in soils: Integrating chemical approaches with responses of microbial biosensors. *Paton Soil Biology and Biochemistry*.
- Mahmood T; Islam KR; Muhammad S.**, 2007. Toxic effects of heavy metals on early growth and tolerance of cereal crops. *Pak. J. Bot.* 39: 451-462.
- Maksymiec W**, 1997. Effects of copper on cellular processes in higher plants.
- Malan ML; farrant JM**, 1998. Effects of the metal pollutants cadmium and nickel on Soybean seed development. *Seed Sci Res.* 8: 445-453.
- Mark HF; Othmer DF; Overberger CG.**, 1978. Kirk-Othmer encyclopedia of chemical technology.
- Marschner H**, 1995. Mineral Nutrition of Higher Plants, 2nd edn. London, UK, Academic Press. 889 p.
- Marschner H**, 2011. Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants.
- Martínez-Fernández D, David J. W, Pascual R E, Pilar F, José A Del Río.**2011. Physiological responses of *Bituminaria bituminosa* to heavy metals. *Journal of Plant Physiology*, 168:2206-2211.

## Références Bibliographiques

---

- Massey AG**, 1973. The Chemistry of Copper, Silver and Gold.
- McBride MB; Bouldin DR.**, 1984. Long-term reactions of copper (II) in a contaminated calcareous soil. *Soil Science Society of America Journal* 48, 56–59.
- Mengel K; 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' études supérieures en sciences agronomiques. Montpellier. P33
- Michel J**, 2013. Introduction to Copper and Copper Alloys.
- Mihoub A ; Chaoui A ; Ferjani EE.**, 2004. Changements biochimiques induits par le cadmium et le cuivre au cours de la germination des graines de petit pois (*Pisum sativum* L.). *Comptes Rendus Biologies* 328, 33-41.
- Mihoub A ; Chaoui A ; Ferjani EE.**, 2005. Changements biochimiques induits par le cadmium et le cuivre au cours de la germination des graines de petit pois (*Pisum sativum* L.). *Comptes Rendus Biologies* 328, 33-41.
- Monnier AL**, 2014. Effets de la contamination cuprique des sols viticoles sur la sensibilité de la vigne à un cortège de bio-agresseurs. Thèse de doctorat, université de Bordeaux, pp 21.
- Muccifora S; Bellani L M.**, 2013. Effects of copper on germination and reserve mobilization in *Vicia sativa* L. seeds. *Environmental pollution*, 179, 68-74.
- Muratova VS**, 1931. *Vicia faba* L. In: Bull. Appl. Bot. and Gen. Plant Breed. Suppl., 50: 285.
- Navel A**, 2012. Distribution, spéciation impact et transfert du cuivre dans un sol sous vigne : rôle de la structuration spatiale et du statut organique. Thèse de doctorat. Sciences de la Terre. Université Grenoble Alpes. pp 29.
- Nazir F; Hussain A; Fariduddin Q.**, 2019. Hydrogen peroxide modulate photosynthesis and antioxidant systems in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plants under copper stress. *Chemosphere*.
- Oorts K**, 2013 Copper. In: Alloway B (ed) Heavy Metals in Soils. Environmental Pollution, vol 22. Springer, Dordrecht
- Ouzounidou G; Ciamporová M; Moustakas M; Karataglis S.**, 1995. Response of maize (*Zea mays* L.) plants to copper stress- I. Growth, mineral content and ultrastructure of roots. *Environ. Exp. Bot.* 35: 167-176.
- Parry C; Blonquist Jr; Bugbee B.**, 2014. In situ measurement of leaf chlorophyll concentration: analysis of the optical/absolute relationship. *Plant, Cell and Environment*. 37:2508-2520.
- Peijnenburg WJGM; Jager T.**, 2003. Monitoring approaches to assess bioaccessibility and bioavailability of metals: Matrix issues. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 56, 63–77.

## Références Bibliographiques

---

- Peijnenburg WKG M; Posthuma L; Eijsackers HJP; Allen HE.,** 1997. A conceptual framework for implementation of bioavailability of metals for environmental management purposes. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 37, 163–172.
- Peron JY,** 2006. *Productions Légumières*. 2eme Ed. Lavoisier, 613p.
- Pilon SE; Pilon M.,** 2002. Phytoremediation of metals using transgenic plants.
- Planquaert; Girard.,** 1987. La fève de l'hiver, *Revue, I.T.C F 3ème Trim.* 32p.
- Puig S; Mira H; Dorcey E; Sancenón V; Andrés-Colás N; Garcia-Molina A; Burkhead JL; Gogolin KA; Abdel-Ghany SE; Thiele DJ; Ecker JR; Pilon M; Peñarrubia L.,** 2007. Higher plants possess two different types of ATX1-like copper chaperones. *Biochem Biophys Res Commun* 354(2):385-90.
- Punz WF; Sieghardt H.,** 1993. The response of roots of herbaceous plant species to heavy metals. *Environ. Exp. Bot.* 33: 85-98.
- Reuter DJ; Robinson JB.,** 1997. *Plant Analysis: an Interpretation Manual*. CSIRO publishing, Australia. 572 p.
- Rieuwerts JS; Thornton I; Farago ME; Ashmore MR.,** 1998. Factors influencing metal bioavailability in soils: preliminary investigations for the development of a critical loads approach for metals. *Chemical Speciation and Bioavailability* 10, 61–75.
- Rizwan M; Ali S; Adrees M; Rizvi H; Zia-ur-Rehman M; Hannan F; Qayyum MF; Hafeez F; Ok YS.,** 2016 Cadmium stress in rice: toxic effects, tolerance mechanisms, and management: a critical review. *Environ Sci Pollut Res* 23:17859–17879
- Robert M; Juste C.,** 1999. Dynamique des éléments traces de l'écosystème sol. In Club CRIN Environnement et Ministère de l'environnement. Spéciation des métaux dans le sol. Paris: CRIN.
- Rucińska-Sobkowiak R.,** 2016. Water relations in plants subjected to heavy metal stresses. In *Acta Physiologiae Plantarum* 38 (11), 1–13. Polish academy of sciences.
- Ruszkowska M; Baszyński T; Król M; Tukendorf A; Wolińska D.,** 1978. The effect of copper deficiency on the photosynthetic apparatus of higher plants. *Zeitschrift für Pflanzenphysiologie*, 89(3), 207-216.
- Saleem M H; Ali S; Irshad S; Hussaan M; Rizwan M; Rana M S; Hashem A; Abd Allah EF; Ahmad P.,** 2020. Copper uptake and accumulation, ultra-structural alteration, and bast fibre yield and quality of fibrous Jute (*Corchorus capsularis* L.) plants grown under two different soils of China. *Plants*. 9(3), 404.
- Sancenon V; Puig S; Mateu AI; Dorcey E; Thiele DJ; Penarrubia L.,** 2004. The Arabidopsis copper transporter COPT1 functions in root elongation and pollen development. *Journal of Biological Chemistry* 279, 15348–15355.
- Sang N; Li G.,** 2004. Genotoxicity of municipal landfill leachate on root tips of *Vicia faba* Mutat. *Res.-Genet. Toxicol. Environ. Mutag.* 560(2):159-165.

## Références Bibliographiques

---

- Saur E**, 1990. Mise au point bibliographique, au sujet de la nutrition oligo-minérale des plantes supérieures. Carences et toxicités chez les conifères. In *Annales des sciences forestières* (Vol. 47, No. 4, pp. 367-389). EDP Sciences.
- Sauvé S; Hendershot W; Allen HE.**, 2000. Solid-solution partitioning of metals in contaminated soils: dependence on pH, total metal burden, and organic matter. *Environmental Science and Technology* 34, 1125–1131.
- Sheldon AR; Menzies NW.**, 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.
- Shikanai T; Müller MP; Munekage Y; Niyogi KK; Pilon M.**, 2003. PPA1, a P-type ATPase of Arabidopsis, functions in copper transport in chloroplasts.
- Sillero JC; Villegas-Fernandez AM; Thomas J; Rojas-Molina MM; Emeran AA; Fernandez-Aparicio M; Rubiales D.**, 2010. Faba bean breeding for disease resistance. *Field Crops Research*. 115: 297-307.
- Simonneau, D., Crosson, Ph., Taupin, P., Bouttet, D, Chaillet, I.**, 2012. Bulletin Vigicultures : mode opératoire observations féveroles parcelles fixes. n°5, 14p.
- Solanki R; Arjun; Poonam; Dhankhar R.**, 2011. Zinc and copper induced changes in physiological characteristics of Vignamungo L. *J. Environ. Biol.* 32: 747-751.
- Sonmez S; Kaplan M; Sonmez NK; Kaya H; 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.
- Souguir P; Goupil E; Ferjani; Ledoigt G .**, 2009. Effets génotoxiques du Cuivre chez *Vicia faba* et *Pisum sativum*.
- Tom-Petersen A; Hosbond C; Nybroe O.**, 2001. Identification of copper-induced genes in *Pseudomonas fluorescens* and use of a reporter strain to monitor bioavailable copper in soil. *FEMS Microbiology Ecology*, 38, 59-67.
- Toselli M; Baldi E; Marcolini G; Malaguti D; Quartieri M; Sorrenti G; Marangoni B.**, 2009. Response of potted grapevines to increasing soil copper concentration. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 15, 85–92.
- Vassilev A; Lidon F; Ramalho JC; Matos M; Graca M.**, 2003. Effects of excess Cu on growth and photosynthesis of barley plants. Implication with a screening test for Cu tolerance.
- Von WN; Romheld V; Shioiri T; Marschner H.**, 1995. Competition between micro-organisms and roots of barley and sorghum for iron accumulated in the root apoplasm. *New Phytologist*. 130, 511–521.
- Wang H-F, Zong X-X, Guan J-P, Yang T, Sun X-L, Ma Y, Redden R.**, 2012. Genetic diversity and relationship of global faba bean (*Vicia faba* L.) germplasm revealed by ISSR markers. *Theor Appl Genet.* 124: 789-797.

## Références Bibliographiques

---

**Wang QR; Cui YS; Liu X M; Dong YT; Christie P.**, 2003. Soil contamination and plant uptake of heavy metals at polluted sites in China. *J. Environ. Sci. Health Part A Toxic/Hazard. Subst. Environ. Eng.* 38, 823-838.

**Yadav V; Arif N; Kováč J; Singh V P; Tripathi D K; Chauhan D K; Vaculík M.**, 2021. *Structural modifications of plant organs and tissues by metals and metalloids in the environment: a review. Plant Physiology and Biochemistry.*

**Yang X; Feng Y; He Z; Stoffella PJ.**, 2005. Molecular mechanisms of heavy metal hyperaccumulation and phytoremediation. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology* 18: 339-353.

**Yang Z; Chen J; Dou R; Gao X; Mao C; Wang L.**, 2015. Assessment of the phytotoxicity of metal oxide nanoparticles on two crop plants, maize (*Zea mays* L.) and rice (*Oryza sativa* L.). *Int. J. Environ. Res. Publ. Health* 12 (12), 15100e15109.

**Yruela I**, 2005. Copper in plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology* 17, 145–156.

**Zerihun B**, 2006. Symbiotic and phenotypic diversity of *Rhizobium leguminosarum* bv. *Viciae* isolates (*Vicia faba*) from Northern Gondar, Ethiopia. An MSc Thesis, School of Graduate Studies, Addis Ababa University, Addis Ababa, 73pp.

# **Annexes**

## Annexes

### Annexe 1

#### Longueur des racines finales

Analyse de variance de la longueur des racines finales

|                  | S.C.E   | DDL | C.M.   | TEST F | PROBA   | E.T.  | C.V.   |
|------------------|---------|-----|--------|--------|---------|-------|--------|
| VAR.TOTALE       | 173,869 | 31  | 5,609  |        |         |       |        |
| VAR.FACTEUR 1    | 114,351 | 3   | 38,117 | 36,88  | 0       |       |        |
| VAR.FACTEUR 2    | 19,22   | 1   | 19,22  | 18,596 | 0,00028 |       |        |
| VAR.INTER F1*2   | 15,492  | 3   | 5,164  | 4,997  | 0,00788 |       |        |
| VAR.RESIDUELLE 1 | 24,805  | 24  | 1,034  |        |         | 1,017 | 25,86% |

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

FACTEUR 1: cuivre

|                    |       |       |       |
|--------------------|-------|-------|-------|
| NOMBRE DE MOYENNES | 2     | 3     | 4     |
| VALEURS DES PPAS   | 1.049 | 1.269 | 1.402 |

| F1  | LIBELLES | MOYENNES | GROUPES HOMOGENES |   |   |
|-----|----------|----------|-------------------|---|---|
| 1.0 | F1n1     | 6,825    | A                 |   |   |
| 2.0 | F1n2     | 4,325    |                   | B |   |
| 3.0 | F1n3     | 2,713    |                   |   | C |
| 4.0 | F1n4     | 1,863    |                   |   | C |

FACTEUR 2: variété

| F2  | LIBELLES | MOYENNES | GROUPES HOMOGENES |   |
|-----|----------|----------|-------------------|---|
| 1.0 | F2n1     | 4.706    | A                 |   |
| 2.0 | F2n2     | 3.156    |                   | B |

## Annexes

### Annexe 2

#### Nombres des feuilles

Analyse de variance des nombres des feuilles

|                  | S.C.E    | DDL | C.M.    | TEST F | PROBA   | E.T.  | C.V.   |
|------------------|----------|-----|---------|--------|---------|-------|--------|
| VAR.TOTALE       | 1672,469 | 31  | 53,951  |        |         |       |        |
| VAR.FACTEUR 1    | 1032,594 | 3   | 344,198 | 38,467 | 0       |       |        |
| VAR.FACTEUR 2    | 1,531    | 1   | 1,531   | 0,171  | 0,68509 |       |        |
| VAR.INTER F1*2   | 423,594  | 3   | 141,198 | 15,78  | 0,00001 |       |        |
| VAR.RESIDUELLE 1 | 214,75   | 24  | 8,948   |        |         | 2,991 | 19,03% |

Comparaison de moyennes des nombres des feuilles (Test de NEWMAN-KEULS SEUIL=5%).

FACTEUR 1: cuivre

|                    |       |       |       |
|--------------------|-------|-------|-------|
| NOMBRE DE MOYENNES | 2     | 3     | 4     |
| VALEURS DES PPAS   | 3.088 | 3.733 | 4.125 |

| F1  | LIBELLES | MOYENNES | GROUPES HOMOGENES |   |
|-----|----------|----------|-------------------|---|
| 1.0 | F1n1     | 20,25    | A                 |   |
| 2.0 | F1n2     | 18,875   | A                 |   |
| 3.0 | F1n3     | 17,75    | A                 |   |
| 4.0 | F1n4     | 6        |                   | B |

### Annexe 3

#### Longueur des tiges

Analyse de variance de la longueur des tiges.

|                  | S.C.E    | DDL | C.M.     | TEST F | PROBA   | E.T.   | C.V.   |
|------------------|----------|-----|----------|--------|---------|--------|--------|
| VAR.TOTALE       | 31757,5  | 31  | 1024,435 |        |         |        |        |
| VAR.FACTEUR 1    | 16236,75 | 3   | 5412,25  | 29,03  | 0       |        |        |
| VAR.FACTEUR 2    | 666,123  | 1   | 666,123  | 3,573  | 0,06784 |        |        |
| VAR.INTER F1*2   | 10380,13 | 3   | 3460,042 | 18,559 | 0       |        |        |
| VAR.RESIDUELLE 1 | 4474,5   | 24  | 186,438  |        |         | 13,654 | 20,89% |

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

FACTEUR 1: cuivre

|                    |        |        |        |
|--------------------|--------|--------|--------|
| NOMBRE DE MOYENNES | 2      | 3      | 4      |
| VALEURS DES PPAS   | 14.095 | 17.042 | 18.828 |



## Annexes

| F1  | LIBELLES | MOYENNES | GROUPES HOMOGENES |   |
|-----|----------|----------|-------------------|---|
| 1.0 | F1n1     | 81,75    | A                 |   |
| 2.0 | F1n2     | 78,75    | A                 |   |
| 3.0 | F1n3     | 74,375   | A                 |   |
| 4.0 | F1n4     | 26,625   |                   | B |

### Annexe 4

#### Volume racinaire

Analyse de variance de volume racinaire

|                     | S.C.E    | DDL | C.M.     | TEST F | PROBA   | E.T.   | C.V.   |
|---------------------|----------|-----|----------|--------|---------|--------|--------|
| VAR.TOTALE          | 16259,87 | 31  | 524,512  |        |         |        |        |
| VAR.FACTEUR 1       | 10993,37 | 3   | 3664,458 | 29,493 | 0       |        |        |
| VAR.FACTEUR 2       | 496,124  | 1   | 496,124  | 3,993  | 0,05453 |        |        |
| VAR.INTER F1*2      | 1788,376 | 3   | 596,125  | 4,798  | 0,00936 |        |        |
| VAR.RESIDUELLE<br>1 | 2982     | 24  | 124,25   |        |         | 11,147 | 23,68% |

Comparaison de moyennes de volume racinaire (Test de NEWMAN-KEULS SEUIL =5%).

FACTEUR 1: cuivre

|                    |        |        |        |
|--------------------|--------|--------|--------|
| NOMBRE DE MOYENNES | 2      | 3      | 4      |
| VALEURS DES PPAS   | 11.506 | 13.912 | 15.371 |

| F1  | LIBELLES | MOYENNES | GROUPES HOMOGENES |   |   |
|-----|----------|----------|-------------------|---|---|
| 1.0 | F1n1     | 63,125   | A                 |   |   |
| 2.0 | F1n2     | 61,375   | A                 |   |   |
| 3.0 | F1n3     | 46,875   |                   | B |   |
| 4.0 | F1n4     | 16,875   |                   |   | C |

### Annexe 5

#### RWC

Analyse de variance de RWC

|                  | S.C.E    | DDL | C.M.     | TEST F | PROBA  | E.T.  | C.V.  |
|------------------|----------|-----|----------|--------|--------|-------|-------|
| VAR.TOTALE       | 19508.51 | 23  | 848.196  |        |        |       |       |
| VAR.FACTEUR 1    | 8549.324 | 3   | 2849.775 | 92.885 | 0      |       |       |
| VAR.FACTEUR 2    | 220.4    | 1   | 220.4    | 7.184  | 0.0158 |       |       |
| VAR.INTER F1*2   | 10247.89 | 3   | 3415.965 | 111.34 | 0      |       |       |
| VAR.RESIDUELLE 1 | 490.889  | 16  | 30.681   |        |        | 5.539 | 7.97% |

## Annexes

Comparaison de moyennes de RWC (Test de NEWMAN-KEULS SEUIL =5%).

FACTEUR 1: cuivre

|                    |       |       |       |
|--------------------|-------|-------|-------|
| NOMBRE DE MOYENNES | 2     | 3     | 4     |
| VALEURS DES PPAS   | 6.783 | 8.245 | 9.145 |

| F1  | LIBELLES | MOYENNES | GROUPES HOMOGENES |   |   |
|-----|----------|----------|-------------------|---|---|
| 1.0 | F1n1     | 84.622   | A                 |   |   |
| 2.0 | F1n2     | 83.778   | A                 |   |   |
| 3.0 | F1n3     | 71.443   |                   | B |   |
| 4.0 | F1n4     | 38.058   |                   |   | C |

FACTEUR 2 : variété

| F2  | LIBELLES | MOYENNES | GROUPES HOMOGENES |   |
|-----|----------|----------|-------------------|---|
| 1.0 | F2n1     | 72.506   | A                 |   |
| 2.0 | F2n2     | 66.445   |                   | B |

### Annexe 6

#### Teneur en chlorophylle

Analyse de variance de teneur en chlorophylle

|                  | S.C.E    | DDL | C.M.    | TEST F | PROBA   | E.T.  | C.V.   |
|------------------|----------|-----|---------|--------|---------|-------|--------|
| VAR.TOTALE       | 1134,962 | 31  | 36,612  |        |         |       |        |
| VAR.FACTEUR 1    | 658,356  | 3   | 219,452 | 14,423 | 0,00002 |       |        |
| VAR.FACTEUR 2    | 12,128   | 1   | 12,128  | 0,797  | 0,38449 |       |        |
| VAR.INTER F1*2   | 99,316   | 3   | 33,105  | 2,176  | 0,11595 |       |        |
| VAR.RESIDUELLE 1 | 365,163  | 24  | 15,215  |        |         | 3,901 | 44,92% |

Comparaison de moyennes de teneur en chlorophylle (Test de NEWMAN-KEULS SEUIL =5%).

FACTEUR 1: cuivre

|                    |       |       |       |
|--------------------|-------|-------|-------|
| NOMBRE DE MOYENNES | 2     | 3     | 4     |
| VALEURS DES PPAS   | 4.027 | 4.868 | 5.379 |

## Annexes

| F1  | LIBELLES | MOYENNES | GROUPES HOMOGENES |   |
|-----|----------|----------|-------------------|---|
| 2.0 | F1n2     | 13,463   | A                 |   |
| 1.0 | F1n1     | 12,888   | A                 |   |
| 3.0 | F1n3     | 5,05     |                   | B |
| 4.0 | F1n4     | 3,338    |                   | B |

### Annexe 7

#### Nombre de faisceaux cribro-vasculaire

Analyse de variance de nombre de faisceaux cribro-vasculaire

|                  | S.C.E    | DDL | C.M.    | TEST F | PROBA   | E.T.  | C.V.   |
|------------------|----------|-----|---------|--------|---------|-------|--------|
| VAR.TOTALE       | 3464,719 | 31  | 111,765 |        |         |       |        |
| VAR.FACTEUR 1    | 2188,344 | 3   | 729,448 | 35,967 | 0       |       |        |
| VAR.FACTEUR 2    | 427,781  | 1   | 427,781 | 21,092 | 0,00015 |       |        |
| VAR.INTER F1*2   | 361,844  | 3   | 120,615 | 5,947  | 0,00359 |       |        |
| VAR.RESIDUELLE 1 | 486,75   | 24  | 20,281  |        |         | 4,503 | 19,50% |

Comparaison de moyennes de nombre de faisceaux cribro-vasculaire (Test de NEWMAN-KEULS SEUIL =5%).

FACTEUR 1: cuivre

|                    |       |       |      |
|--------------------|-------|-------|------|
| NOMBRE DE MOYENNES | 2     | 3     | 4    |
| VALEURS DES PPAS   | 4.649 | 5.621 | 6.21 |

| F1  | LIBELLES | MOYENNES | GROUPES HOMOGENES |   |   |
|-----|----------|----------|-------------------|---|---|
| 1.0 | F1n1     | 30,75    | A                 |   |   |
| 2.0 | F1n2     | 27,625   | A                 | B |   |
| 3.0 | F1n3     | 24,75    |                   | B |   |
| 4.0 | F1n4     | 9,25     |                   |   | C |

FACTEUR 2: variété

|                    |       |
|--------------------|-------|
| NOMBRE DE MOYENNES | 2     |
| VALEURS DES PPAS   | 3.287 |

| F2  | LIBELLES | MOYENNES | GROUPES HOMOGENES |   |
|-----|----------|----------|-------------------|---|
| 1.0 | F2n1     | 26.75    | A                 |   |
| 2.0 | F2n2     | 19.438   |                   | B |