

# République Algérienne Démocratique et Populaire

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



جامعة عبد الحميد بن باديس  
مستغانم  
كلية علوم الطبيعة والحياة

## DEPARTEMENT DES SCIENCES AGRONOMIQUES

*Mémoire fin d'étude*

N° ...../SNV/2025

*Présenté par :*

***BENADIDOU Med Amine Tayeb***

***HABIBI Nadia***

**Spécialité : Production végétale**

### Thème

Effet du zinc et du cuivre sur la germination et la croissance  
du blé tendre *Triticum aestivum* L.

Président	Dr GHOULEMALLAH AMINE	MCA	U. Mostaganem
Encadreur	Dr HAMZA LAHOUIA	MCB	U. Mostaganem
Examineur	Dr HOMRANI MOUNIA	MCB	U. Mostaganem

*Année universitaire 2024 / 2025*

# REMERCIEMENTS

*Au nom de Dieu, le très miséricordieux louange à Dieu, Seigneur des Mondes, qui nous a donné la force et nous a aidés à terminer ce travail et à la mener à bien d'une manière si excellente. Hier, nous avons commencé notre parcours éducatif en regardant le jour de fin d'étude comme si c'était un jour lointain, et aujourd'hui nous le vivons.*

*Et notre principe en tant que musulmans est "Celui qui ne remercie pas les gens ne remercie pas Dieu", Nous adressons nos sincères remerciements Mes remerciements s'adressent aussi vivement à tous les membres du jury qui ont accepté d'évaluer mon travail.*

*Je cite Dr Ghoulamallah Amine qui m'a fait l'honneur de présider le jury, je lui exprime ma profonde gratitude.*

*Dr Homrani Mounia, pour sa participation comme membres de jury et contribué ainsi par leurs critiques au raffinement de mon écrit. C'est avec sincérité que je leur exprime ma gratitude et mon profond respect.*

*Un remerciement spécial pour mon encadreur: Mme. Hamza Lahouaria pour toute l'aide qu'elle a pu me fournir durant la période de mon travail et pour ses précieux conseils.*

*Nous remercions tous les professeurs de l'Université de Mostaganem sans oublier les ingénieurs des laboratoires Madame Sahli Soumia et Monsieur Kerroub Salah.*

*Enfin, nous remercions les amis et les étudiants du département pour leur soutien en particulier les Amis les plus proches de notre promotion, ainsi à tous ce qui ont contribué de près ou de loins pour la réalisation de ce modeste travail.*

*Benadidou, Habibi*

# DÉDICACE

*El Hamdullah grâce à Dieu, je dédie tout d'abord cette remise des diplômes et le fruit de mes efforts*

*À ma chère maman et  
À ma chère sœur.*

*BENADIDOU Med Amine*

# DÉDICACE

*Tout d'abord je rends grâce à Dieu le tout puissant qui m'a donné la force, le courage, la santé et patience d'accomplir ce travail.*

*Ces pages sont l'occasion pour moi de remercier tous mes proches m'ont prodiguée je la dédie spécialement :*

*En premier, à mes chers parents qui ont toujours été présents à mes côtés. Pour me soutenir et m'encourager.*

*À mes chères sœurs.*

*HABIBI Nadia*

## Liste des abréviations

**Zn** : Zinc

**Cu** : Cuivre

**ZnSo<sub>4</sub>** : Sulfate de cuivre

**CuSo<sub>4</sub>** : Sulfate de cuivre

**Pb** : Plomb

**Hg** : Mercure

**Cd** : Cadmuim

**Q** : Quinto

**Ha** : Hectare

**PPM** : Partie par million

**Eh** : Potentiel redox

## Liste des figures

**Figure 1.** Les stades de développement de blé (Anonyme., 2006)

**Figure 2.** Blé

**Figure 3.** Généalogie des blés (INRA, 2016)

**Figure 4.** Anatomie du grain de blé tendre (Brahimi H., 2016)

**Figure 5.** Production mondiale des céréales (Ait kaki Y., 1993)

**Figure 6.** Cycle végétatif du blé tendre (*Gate*, 1995).

**Figure 7.** Source de métaux lourds dans le sol (Klute,1986)

**Figure 8.** Contamination du sol (Google)

**Figure 9.** Effet des métaux lourds sur la plante (Google)

**Figure 10.** Absorption foliaire des métaux lourds (Shahid *et al*, 2016)

**Figure 11.** Effet des concentrations de zinc ( $Zn\ So_4$ ) sur le % de germination des grains de *Triticum aestivum*

**Figure 12.** Effet des concentrations de zinc ( $ZnSo_4$ ) sur le % final et le temps moyen de germination (TMG) des graines de *Triticum Aestivum*

**Figure 13.** Effet des concentrations du Zinc sur la longueur des plantules

**Figure 14.** Effet des concentrations du zinc sur la longueur des tiges

**Figure 15.** Effet des concentrations du zinc sur la longueur des racines

**Figure 16.** Effet des concentrations de cuivre sur le % de germination des grains de *Triticum astivum L*

**Figure 17.** Effet des concentrations de cuivre sur le % final et le temps moyen de germination (TMG) des graines de *Triticum aestivum*

**Figure 18.** Effet des concentrations du cuivre ( $CuSo_4$ ) sur la longueur des plantules

**Figure 19.** Effet des concentrations du cuivre sur la longueur des tiges

**Figure 20.** Effet du cuivre sur l'assimilation chlorophyllienne (Chl a et b) chez la plante *Triticum astivum*

- Figure 21.** Effet du cuivre sur l'assimilation chlorophyllienne (Chl a + b)
- Figure 22.** Effet du Zinc sur l'assimilation chlorophyllienne (Chl a et b)
- Figure 23.** Effet du Zinc sur l'assimilation chlorophyllienne (Chl a + b)
- Figure 24.** Effet des concentrations de zinc (ZnSo4) sur les sucres totaux du blé tendre
- Figure 25.** Effet des concentrations de cuivre (CuSo4) sur les sucres totaux du blé tendre
- Figure 26.** Effet des concentrations du zinc sur les protéines totales de *Triticum astivum*
- Figure 27.** Effet des concentrations de cuivre sur les protéines totales de *Triticum astivum*
- Figure 28.** Effet du zinc sur la hauteur des plantes de *Triticum aestivum L.*
- Figure 29.** Effet du cuivre sur la hauteur des plantes de *Triticum aestivum L.*
- Figure 30.** Effet du zinc sur la longueur des tiges et des racines de *Triticum aestivum L.*
- Figure 31.** Effet du cuivre sur la longueur des tiges et des racines de *Triticum aestivum L.*
- Figure 32.** Effet du zinc sur la biomasse fraîche et sèche de la plante *Triticum aestivum L.*

### Liste des tableaux

- Tableau 1.** Illustrant la mobilité des métaux lourds (Shallari, 1998)
- Tableau 2.** Caractéristiques principales de la variété Ain Abid (INRAA)
- Tableau 3.** Solution nutritive de Hooshang, (1996)
- Tableau 4.** Indice de vigueur des plantules
- Tableau 5.** Indice de vigueur des plantules
- Tableau 6.** Le poids frais et sec de la plante *Triticum aestivum L* en fonction de la dose de zinc appliquée.
- Tableau 7.** Le poids frais et sec de la plante *Triticum aestivum L* en fonction de la dose de cuivre appliquée.

## Résumé

Les travaux présentés dans ce travail ont pour objectifs l'étude de la toxicité des métaux lourds (cuivre, zinc) vis à vis d'une graminées *Triticum aestivum L.*

Des paramètres d'évaluation de la toxicité ainsi que quelques analyses biochimiques ont été utilisés pour déterminer les effets de ces éléments sur la physiologie du blé tendre.

L'application du cuivre et du zinc a été effectuée durant la phase de germination a permis de dégager les points suivants : les deux éléments n'ont pas affecté la cinétique de germination ni le pourcentage final par contre ont enregistré un retard en germination sous effet des doses élevées de cuivre, des concentrations comparables de zinc n'induit aucun effet. Les jeunes plantules traitées avec le zinc ont eu un indice de vigueur plus élevé de 10,45.

Sous traitements du zinc la dose D3 de 0.01g/l a stimulée la longueur des plantules (11.01cm). Par ailleurs le cuivre inhibe la croissance des plantules, les résultats montrent une diminution de la longueur des plantules pour les traitements utilisés.

Des réductions importantes de la croissance, la teneur en chlorophylle taux de sucres totaux et protéines ont été enregistrées à des concentrations élevées de zinc et de cuivre. Cette toxicité se traduit par la diminution de la longueur de la plante à des concentrations de 0.005 et 0.01g/l. L'élongation des racines est très sensible à l'augmentation du cuivre et diminue dans les doses élevés.

Au niveau de la phytomasse, bien pour la production de matière fraîche et la matière sèche, les réponses racinaires sont similaires sous traitement du zinc et cuivre, sous des doses de D2 et D3 (0.005 et 0.01g/l), il ya une diminution significative de ces taux.

Par conséquent, en raison de e l'effet du zinc et du cuivre sur la croissance et leur forte réactivité, ces métaux lourds affectent négativement le développement du blé tendre.

## Mots clés

Mots clés : *Triticum aestivum*, Zinc, cuivre, germination, croissance, chlorophylles, sucres totaux protéines.

## Abstract

The research presented in this paper aims to study the toxicity of heavy metals (copper, zinc) to the grass *Triticum aestivum* L.

Toxicity assessment parameters and some biochemical analyses were used to determine the effects of these elements on the physiology of soft wheat.

The application of copper and zinc during the germination phase revealed the following points: the two elements did not affect germination kinetics or the final percentage; however, germination was delayed under the effect of high doses of copper; comparable concentrations of zinc had no effect.

Young seedlings treated with zinc had a higher vigor index of 10.45.

Under zinc treatment, the D3 dose of 0.01 g/L stimulated seedling length (11.01 cm). Furthermore, copper inhibits seedling growth; results show a decrease in seedling length for the treatments used.

Significant reductions in growth, chlorophyll content, total sugar levels, and protein were recorded at high concentrations of zinc and copper. This toxicity results in a decrease in plant length at concentrations of 0.005 and 0.01 g/l. Root elongation is very sensitive to increased copper levels and decreases at high doses.

At the phytomass level, although for fresh matter and dry matter production, root responses are similar under zinc and copper treatments; at doses of D2 and D3 (0.005 and 0.01 g/l), there is a significant decrease in these levels.

Therefore, due to the effect of zinc and copper on growth and their high reactivity, these heavy metals negatively affect the development of soft wheat.

## Keywords

Keywords: *Triticum aestivum*, zinc, copper, germination, growth, chlorophylls, total sugars, proteins.

*Triticum aestivum* L) تهدف هذه الدراسة إلى دراسة سمية المعادن الثقيل (النحاس والزنك) على عشبة القمح الطري. استُخدمت معايير تقييم السمية وبعض التحاليل الكيميائية الحيوية لتحديد آثار هذه العناصر على فسيولوجيا القمح الطري.

أظهرت إضافة النحاس والزنك خلال مرحلة الإنبات النتائج التالية: لم يؤثر العنصران على حركية الإنبات أو النسبة المئوية النهائية؛ ومع ذلك، تأخر الإنبات تحت تأثير جرعات عالية من النحاس؛ ولم يكن لتركيزات مماثلة من الزنك أي تأثير البالغة 0.01 D3 أظهرت الشتلات الصغيرة المعالجة بالزنك مؤشر قوة أعلى بلغ 10.45. في حالة المعالجة بالزنك، حفزت جرعة 1 جم/لتر طول الشتلة (11.01 سم). علاوة على ذلك، يثبط النحاس نمو الشتلة؛ وتُظهر النتائج انخفاضًا في طول الشتلة للمعالجات المستخدمة.

سُجلت انخفاضات كبيرة في النمو، ومحتوى الكلوروفيل، ومستويات السكر الكلية، والبروتين عند التركيزات العالية من الزنك والنحاس. تؤدي هذه السمية إلى انخفاض في طول النبات عند تركيزات 0.005 و 0.01 غم/لتر. استطالة الجذور حساسة جدًا لزيادة مستويات النحاس وتتنخفض عند الجرعات العالية

على مستوى الكتلة النباتية، على الرغم من أن استجابات الجذور لإنتاج المادة الطازجة والمادة الجافة متشابهة عند استخدام الزنك (و 0.01 غم/لتر) D3 و D2 والنحاس، إلا أن هناك انخفاضًا ملحوظًا في هذه المستويات عند استخدام جرعات. لذلك، نظرًا لتأثير الزنك والنحاس على النمو وتفاعلهما العالي، فإن هذين المعدنين الثقيلين يؤثران سلبيًا على نمو القمح الطري

الكلمات المفتاحية: القمح الطري، الزنك، النحاس، الإنبات، النمو، الكلوروفيل، السكريات الكلية، البروتينات

# Sommaire

## Introduction

..... 1

## Chapitre I : Recherche bibliographie

**1. Généralités sur les céréales** ..... 2

1.1 **Importance et utilisation des céréales** ..... 2

**1.2. Biologie des céréales** ..... 2

1.2.1 **Caractères morphologiques** ..... 2

1.2.2 **Caractères biologiques** ..... 3

**1.3. Les céréales cultivées** ..... 4

1.3.1 **Le blé** ..... 4

1.3.2 **Origine et historique du blé** ..... 4

**1.4. Classification du blé** ..... 5

1.4.1 **Classification botanique** ..... 6

**1.5. Caractéristiques botaniques du blé tendre et composition du grain** ..... 7

**1.6. Les exigences édaphoclimatiques du blé** ..... 7

1.6.1. **Exigences climatiques** ..... 7

1.6.2. **Exigences édaphiques** ..... 7

1.6.3. **Exigences de fertilisation**..... 8

1.6.3.1. **Estimations des besoins du blé en unités fertilisantes N.P.K** .....8

**1.7. Production de blé tendre** ..... 8

En monde .....	8
En Algérie .....	9
A Mostaganem .....	9
<b>1.8. Physiologie du blé tendre .....</b>	<b>10</b>
1.8.1. Période végétative .....	10
1.8.2. Période reproductrice .....	11
1.8.3. Période de formation et de maturation du grain .....	11
<b>1.9. Généralités sur les métaux lourds .....</b>	<b>12</b>
1.9.1. Classification des métaux lourds .....	13
1.9.2. L'origine des métaux lourds .....	13
1.9.3. Pollution par les métaux lourds .....	14
1.9.4. Contamination des sols .....	15
1.9.5. Facteurs modifiant la mobilité des éléments métalliques .....	15
1.9.6. Transfert des métaux lourds du sol vers les plantes .....	17
1.9.7. Pénétration des éléments-traces dans la plante .....	18
1.9.8. Tolérance aux métaux lourds chez les végétaux .....	19
1.9.9. L'effet du cuivre (Cu) et du zinc (Zn) sur la plante .....	19
1.9.10. Germination et stress métalliques .....	21
1.9.11. Croissance et stress métalliques .....	21

## **Chapitre II : Matériels et Méthodes**

<b>2.1. Objectif .....</b>	<b>23</b>
<b>2.2. Protocole expérimental .....</b>	<b>23</b>
<b>2.3. Choix de l'espèce .....</b>	<b>26</b>
<b>2.3.1. Caractéristiques de la variété étudiée .....</b>	<b>26</b>
<b>2.4. Effet des métaux lourds (zinc et cuivre) sur la germination .....</b>	<b>26</b>
<b>2.4.1. Sélection et préparation des grains .....</b>	<b>26</b>
<b>2.4.2. Évaluation des paramètres de germination .....</b>	<b>27</b>
<b>2.4.2.1. % de germination (TG) .....</b>	<b>27</b>
<b>2.4.2.2. Temps moyen de germination .....</b>	<b>27</b>
<b>2.4.2.3. Pourcentage final de germination (%Gf) .....</b>	<b>27</b>
<b>2.4.2.4. Indice de vigueur des plantules .....</b>	<b>28</b>
<b>2.4.3. Évaluation des paramètres morphologiques des jeunes plantules .....</b>	<b>28</b>
<b>2.5. Effet des métaux lourds (zinc et cuivre) sur la croissance du blé tendre .....</b>	<b>28</b>
<b>2.5.1. Dispositif expérimental .....</b>	<b>28</b>
<b>2.6. Effet des métaux lourds sur les paramètres biochimiques .....</b>	<b>30</b>
<b>2.6.1. Effet sur l'assimilation chlorophyllienne .....</b>	<b>30</b>
<b>2.6.2. Effet sur le taux des sucres solubles totaux .....</b>	<b>30</b>
<b>2.6.3. Effet sur le taux des protéines totales .....</b>	<b>30</b>
<b>2.7. Effet du zinc et du cuivre sur les paramètres morphologiques .....</b>	<b>31</b>
<b>2.7.1 La longueur de la tige (LT) et de racine (LR) .....</b>	<b>31</b>
<b>2.7.2. Poids frais et poids sec des parties aériennes et souterraines .....</b>	<b>31</b>

### Chapitre III

<b>3.1. Effet des concentrations de zinc (Zn SO<sub>4</sub>) sur la germination des grains de <i>Triticum aestivum</i> .....</b>	<b>33</b>
<b>3.1.1. Effet des concentrations de zinc (Zn SO<sub>4</sub>) sur le % de germination des grains de <i>Triticum aestivum</i> .....</b>	<b>33</b>
<b>3.1.3. Effet du zinc sur Indice de vigueur des plantules .....</b>	<b>34</b>
<b>3.1.4. Effet des concentrations du Zinc sur la longueur des plantules, tiges et racines de <i>Triticum astivum</i> .....</b>	<b>35</b>
<b>3.1.4.1. Effet des concentrations du Zinc sur la longueur des plantules .....</b>	<b>35</b>
<b>3.1.4.2. Effet des concentrations du zinc sur la longueur des tiges .....</b>	<b>35</b>
<b>3.1.4.3. Effet des concentrations du zinc sur la longueur des racines .....</b>	<b>36</b>
<b>3.1.5. Effet des concentrations de cuivre (CuSO<sub>4</sub>) sur les grains de <i>Triticum aestivum</i> .....</b>	<b>36</b>
<b>3.1.5. 1.Effet des concentrations de cuivre sur le % de germination des grains de <i>Triticum aestivum</i> .....</b>	<b>36</b>
<b>3.1.5.2. Effet des concentrations de cuivre sur le % final et le temps moyen de germination (TMG) des graines de <i>Triticum aestivum</i> .....</b>	<b>37</b>
<b>3.1.5.3. Effet du cuivre sur l'indice de vigueur des plantules .....</b>	<b>38</b>
<b>3.1.5.4. Effet des concentrations du cuivre (CuSO<sub>4</sub>) sur la longueur des plantules ...</b>	<b>38</b>
<b>3.1.5.5. Effet des concentrations du cuivre sur la longueur des tiges .....</b>	<b>39</b>
<b>3.2. Analyse biochimique du blé tendre sous effet du cuivre et du zinc .....</b>	<b>40</b>
<b>3.2.1. Effet du cuivre sur l'assimilation chlorophyllienne (Chl a et b) chez la plante <i>Triticum astivum</i> .....</b>	<b>40</b>
<b>3.2.1. Effet du cuivre sur l'assimilation chlorophyllienne (Chl a + b) .....</b>	<b>41</b>
<b>3.3. Effet du Zinc sur l'assimilation chlorophyllienne (Chl a et b) .....</b>	<b>41</b>

<b>3.3.1. Effet du Zinc sur l'assimilation chlorophyllienne (Chl a + b) .....</b>	<b>42</b>
<b>3.4. Effet des concentrations de zinc et de cuivre sur les sucres totaux et les protéines du blé tendre .....</b>	<b>43</b>
<b>3.4.1. Effet des concentrations de zinc (ZnSO<sub>4</sub>) sur les sucres totaux du blé tendre .....</b>	<b>43</b>
<b>3.4.2. Effet des concentrations de cuivre (CuSO<sub>4</sub>) sur les sucres totaux du blé tendre .....</b>	<b>44</b>
<b>3.4.3. Effet des concentrations du zinc sur les protéines totales de <i>Triticum aestivum</i> .....</b>	<b>45</b>
<b>3.4.3. Effet des concentrations de cuivre sur les protéines totales de <i>Triticum aestivum</i> .....</b>	<b>45</b>
<b>3.5. Evolution de la hauteur des plantes de <i>Triticum aestivum</i> L .....</b>	<b>45</b>
<b>3.5.1. Effet du Zinc sur la hauteur des plantes de <i>Triticum aestivum</i> L .....</b>	<b>45</b>
<b>3.5.2. Effet du cuivre sur la hauteur des plantes de <i>Triticum aestivum</i> L .....</b>	<b>46</b>
<b>3.5.3. Effet du zinc sur la longueur des tiges et des racines de <i>Triticum aestivum</i> L .....</b>	<b>46</b>
<b>3.5.4 Effet du cuivre sur la longueur des tiges et des racines de <i>Triticum aestivum</i> L .....</b>	<b>47</b>
<b>3.6. Effet du zinc et cuivre sur la biomasse fraîche et sèche de la plante <i>Triticum aestivum</i> L .....</b>	<b>48</b>
<b>3.6.1. Effet du zinc sur la biomasse fraîche et sèche de la plante <i>Triticum aestivum</i> L .....</b>	<b>48</b>
<b>3.6.2 Effet du cuivre sur la biomasse fraîche et sèche de la plante de <i>Triticum aestivum</i> L .....</b>	<b>49</b>

<b>Discussion .....</b>	<b>50</b>
<b>Conclusion .....</b>	<b>55</b>
<b>Références bibliographique .....</b>	<b>57</b>
<b>Annexe .....</b>	<b>65</b>

## **Introduction :**

Le monde connaît actuellement un vrai problème de pollution touchant les compartiments ; atmosphère, hydrosphère et lithosphère ; la biosphère dans son ensemble est menacée. La pollution par les métaux lourds est la plus problématique des pollutions vue la nature non biodégradable des métaux, et leur persistance dans l'environnement.

En outre, la biodisponibilité, la spéciation et l'accumulation des métaux dans divers organismes amplifient leur toxicité.

Si les métaux sont souvent indispensables au déroulement des processus biologiques (oligo-éléments), nombre d'entre eux peuvent s'avérer contaminants pour diverses formes de vie, lorsque leur concentration dépasse un seuil, lui-même fonction de l'état physico-chimique (spéciation) de l'élément considéré. C'est le cas du fer (Fe), du cuivre (Cu), du zinc (Zn), du nickel (Ni), du cobalt (Co), du vanadium (V), du sélénium (Se), du molybdène (Mo), du manganèse (Mn), du chrome (Cr), de l'arsenic (As) et du titane (Ti) (Miquel, 2001).

D'autres ne sont pas nécessaires à la vie et peuvent être même préjudiciables comme le mercure (Hg), le plomb (Pb), le cadmium (Cd) et l'antimoine (Sb) (Chiffolleau *et al*, 2001).

Les végétaux constituent un maillon clé dans les processus de génération et de cyclisme des espèces métalliques, et c'est à travers lesquels, que ces polluants majeurs atteignent les voies alimentaires des humains, d'autre part, c'est sur les végétaux que les effets préjudiciables des métaux, sont immédiatement discernables.

Le blé tendre est une céréale importante de la famille des graminées, en termes de consommation humaine dans de nombreux pays du monde. Il sert principalement à la production de la farine utilisée en boulangerie, biscuiterie, pâtisserie.

La qualité technologique du blé tendre (*Triticum aestivum*) et son amélioration sont parmi les principales préoccupations des céréaliers, elle dépend essentiellement de ses protéines de réserve, dont principalement le groupe des prolamines qui englobent les gliadines et les gluténines. En effet, ces protéines sont déterminantes à la capacité du gluten à former un réseau viscoélastique, essentiel aux processus technologiques (Shewry, 1997).

Le zinc (Zn) et le cuivre sont deux oligo-éléments essentiels pour la croissance et le développement du blé tendre (*Triticum aestivum*), mais leur effet dépend de leur concentration disponibilité dans le sol, et équilibre entre eux. Un apport adéquat de ces

éléments est crucial pour assurer une bonne santé de la culture, une meilleure résistance à la verse et des rendements optimaux.

Des 1930, le cuivre (Cu) est reconnu comme élément trace essentiel pour les végétaux (Alloway B.J., 1995) Il joue un rôle important dans divers processus métaboliques, en participant à la constitution de différentes protéines (Marschner H., 1995) la plastocyanine pour la photosynthèse , le Zinc est aussi un élément trace essentiel pour les végétaux, l'homme est l'animal ,il est contenu dans certaines enzymes et il est indispensable pour beaucoup de processus biologiques et biochimiques à faible concentration.

Ce travail à porte sur l'impact de différents doses de métaux lourds (zinc et cuivre) sur la germination et la croissance de blé tendre (*Triticum aestivum*), dans le but d'évaluer leur toxicité potentielle et leur influence sur la physiologie de l'espèce.

# CHAPITRE I

## RECHERCHE

## BIBLIOGRAPHIQUE

## **Chapitre I Recherche bibliographique**

### **1.1 Généralités sur les céréales :**

Les céréales et leurs dérivées constituent l'alimentation de base dans beaucoup de pays en développement, particulièrement dans les pays maghrébins (Djermoun, 2009).

Les céréales occupent à l'échelle mondiale une place primordiale dans le système agricole. Les céréales sont considérées comme une principale source de la nutrition humaine et animale (Slama *et al.* 2005). La plupart des céréales appartiennent à la famille des graminées (Poacées). Ce sont le blé, l'orge, le seigle, le maïs, le riz, le millet, le sorgho (Moule. 1971).

Les deux espèces de blé les plus cultivées au monde sont le blé tendre (*Triticum aestivum L.*) qui représente plus de 90% de la production mondiale et le blé dur (*Triticum durum Desf.*) qui constitue 5% de celle-ci et qui est traditionnellement cultivé dans le bassin méditerranéen (Ghennai *et al.* 2017).

La céréaliculture pluviale en régions semi-arides d'Algérie, évolue sous une pluviométrie annuelle moyenne variant de 300 à 630 mm/an. Bien que ces lames d'eaux reflètent des quantités théoriquement suffisantes pour combler les besoins des céréales (Smadhi et Zella , 2017).

#### **1.1.2 Importance et utilisation des céréales :**

Le secteur céréalier joue un rôle stratégique dans l'économie. Il est constaté comme l'une des sources alimentaires les plus considérables au monde, bien que le but primaire ait toujours été de garantir et protéger l'équilibre des coûts sur le marché international. (Moule ,1971).

Les céréales sont utilisées comme aliments du bétail avant de devenir de l'aliment individuel (Abecassis et Vermeersch ,2006).

Les principales utilisations des céréales et des graines sont :

- ✓ Alimentation des animaux et les humaines.
- ✓ Boissons : Bière de malt et orge.
- ✓ Industrie non alimentaire : biocarburants, industrie chimique (glucides, lipides)
- ✓ Huiles de table.

## 1.2. Biologie des céréales :

### 1.2.1 Caractère morphologique :

**Appareil végétatif** : comprend deux systèmes :

- **Système aérien** : formé d'une série d'unités biologiques (tige, feuilles) :

**Tige** : Formé des entrenœuds séparés par des nœuds et chaque nœud et le point de fixation d'une feuille.

**Feuilles** : disposées en 2 rangées le long de la tige.

- **Système souterrain**

**Système racinaire (fasciculé)** : Le développement du système racinaire fournit de l'eau et des minéraux (Soltner, 2005).

**Appareil reproducteur** :

**A. L'inflorescence** : L'unité morphologique de base est l'épillet.

**B. Grain** : Les grains ne se déhiscent pas et ne s'ouvrent pas naturellement à maturité, mais reste enveloppé de péricarpes. Un grain est dit nu : S'il a perdu son enveloppe ou sa glumelle, soit naturellement, soit après une opération de battage, si l'enveloppe est jointe ou soudée à elle-même après le battage, on dit vêtu.

### 1.2.2 Caractère biologique :

Le cycle de développement comprend trois grandes périodes, la période végétative, qui durent de la germination aux premiers signes d'élongation de la tige. Période de reproduction depuis le début de la montaison jusqu'à la fécondation et la 3<sup>ème</sup> période de maturation depuis la fécondation jusqu'à la maturité du grain (Soltner, 2005).

#### 1.2.2.1 Période végétative :

Comprend elle-même trois phases :

- **Démarrage de l'imbibition de la graine** : la germination se résulte par la sortie des racines séminales et de la coléorhize et la croissance d'un pré feuille.
- **Phase levée-début tallage** : Au fur et à mesure que la première feuille pénètre le bord la coléoptile fonctionnelle, la deuxième puis la troisième feuille s'étendent pour former un plateau de tallage, le bourgeon axillaire donne la naissance à des talles.
- **Phase début tallage début montée** : Au stade 3 feuilles, les pousses se forment de telle sorte que les racines secondaires deviennent actives et remplacent les racines primaires

### 1.2.2.2. Période reproductrice :

Comporte 3 phases principales :

**A. Phase de formation des ébauches (primordiales) d'épillets** : L'initiation de la différenciation des entre-nœuds et de l'allongement de la pousse principale est également connue sous le nom de stade d'initiation florale ou stade A. Puis d'autres contours d'épillets apparaissent les uns après les autres.

**B. Phase de spécialisation florale** : témoin de la différenciation des parties florales, marquant la fin de la croissance du tallage et le début de la montaison.

**C. Phase méiose fécondation** : l'annonce la sortie de l'épi et fécondation suivant de quelques jours l'épiaison (Soltner ,2005)

### 1.2.2.3. Période de maturation

Pendant ce temps, des substances de réserve (amidon, protéines) sont produites et transformées en protéines. En même temps, un embryon se forme. Cette période comprend trois phases principales :

**A. Phase de croissance cellulaire intensive** : une augmentation du poids d'eau et de matière sèche dans les grains. A la fin de cette phase, l'amande après sa forme définitive et albumen devient laiteux.

**B. Phase d'accumulation de glucides et de protéines** : Le poids de l'eau dans le grain est essentiellement constant. À ce stade, les amandes sont en fait de couleur rouge pâle, la coque résiste bien à la pression des doigts et la fin de la transition du réservoir de l'accordeur vers l'eau est d'environ 40% en poids frais.

**C. Une étape de séchage** : où seule une perte d'eau rapide se produit le grain devient alors successivement demi -dur puis dur (Soltner ,2005).

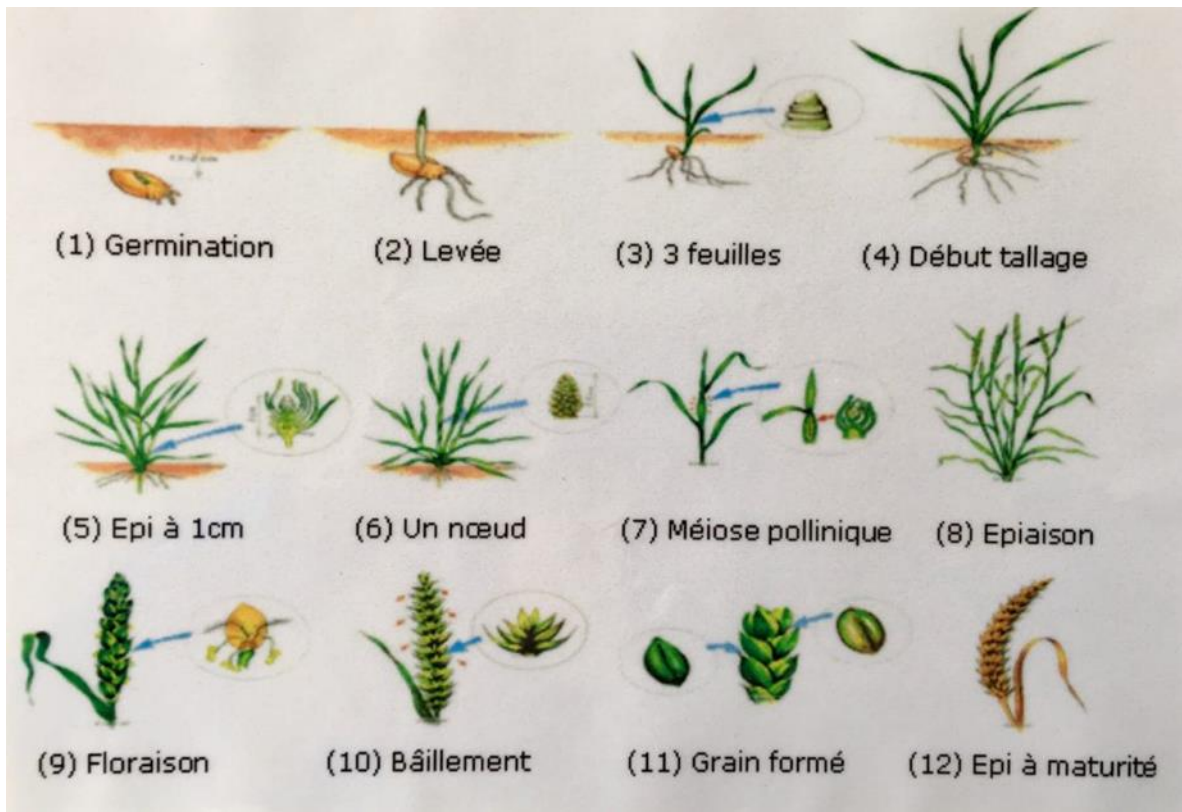


Figure 1. Les stades de développement de blé (Anonyme., 2006)

### 1.3. Les Céréales cultivées :

Les céréales représentent à peu près 80% de la superficie agricole du pays, avec une superficie de semis annuel de 3 millions d'hectares représentant 63%% de la superficie récoltées annuelles. Les cinq céréales les plus cultivées au monde sont le maïs, le blé dur, le blé tendre, le riz, l'orge et le sorgho.

#### 1.3.1. Le Blé :

Le blé appartient à la famille des Herbes, il appartient au groupe des céréales ou grains. Ce groupe comprend également d'autres cultures importantes telles que : le riz, le maïs, l'orge, le sorgho, l'avoine, le millet, le triticale et le seigle. Dans certaines parties de la surface de la Terre, le blé couvre la plus grande superficie de toutes les cultures vivrières.



Figure 2. Blé

### 1.3.2 Origine et historique du blé :

Le blé est l'une des principales ressources alimentaires de l'humanité. La saga du blé accompagne celle de l'homme et de l'agriculture, sa culture précède l'histoire et caractérise l'agriculture néolithique, née en Europe il y a 8000 ans. Le blé tendre est apparu entre 5000 et 6000 ans avant Jésus-Christ dans le croissant fertile puis s'est dispersé à partir de la Grèce en Europe (Doussinault *net al*, 1992).

En Algérie, Léon Ducellier (1878-1937) en particulier, parcourant le blé, fit au début du siècle le recensement d'une flore mal connue. Il découvrit et analysa les nombreuses variétés, qui peuplaient les champs cultivés, recueillit

Les échantillons les plus caractérisés, les plus productifs, les plus résistants à la sécheresse ou à quelques maladies. Le blé tendre était inconnu en Afrique du Nord avant l'arrivée des français (Lery, 1982). Les blés ont d'abord évolué en dehors de l'intervention humaine, puis sous la pression de sélection qu'ont exercée les premiers agriculteurs (Henry et Buyser, 2001).

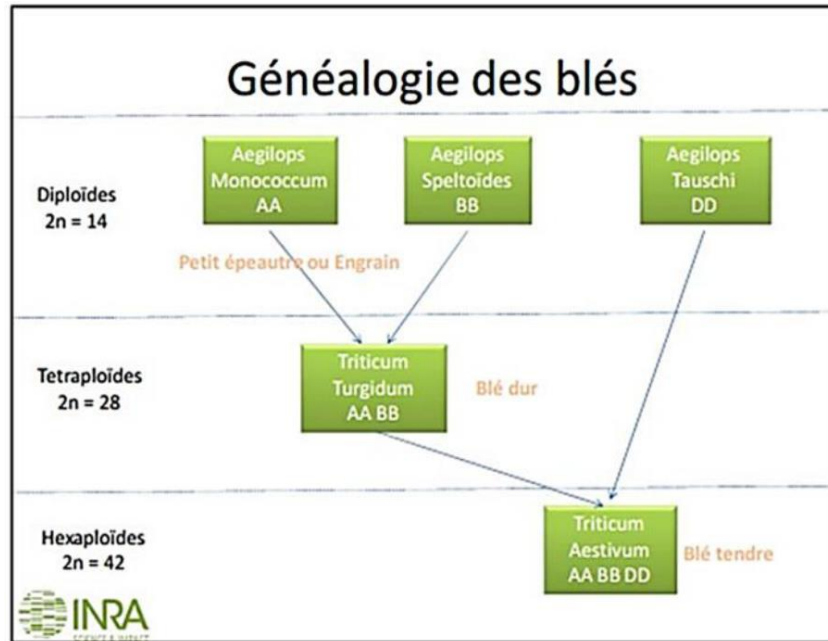


Figure 3. Généalogie des blés (INRA, 2016)

## 1.4 Classification du blé

### 1.4.1 Classification botanique

Tableau 1. Classification du blé tendre (Doumandji, 2003).

Classification	Blé tendre
Règne	Plantae (Règne végétale)
Division	Magnoliophyta (Angiospermes)
Classe	Liliopsida (Monocotylédons)
Sous classe	Commelinidae
Ordre	Poale
Famille	Poaceae (Graminées)
Sous famille	Triticeae
Genre	<i>Triticum</i>
Espèce	<i>Triticum aestivum</i> L.

## 1.5. Caractéristiques botanique du blé tendre et composition du grain :

Le blé tendre se distingue par sa robustesse et son adaptabilité à divers environnements. L'espèce présente une croissance rapide et un cycle de vie relativement court. Typiquement, le blé tendre atteint une hauteur de 60 à 120 cm à maturité, avec des épis bien fournis contenant de nombreux grains.

Cependant, pour une croissance optimale, le blé tendre préfère des sols bien drainés et fertiles, avec un pH légèrement alcalin. la composition de la graine du Blé :

- ❖ Le germe (3% du grain) riche en lipides, protéines, vitamines et éléments minéraux. Il est éliminé à la mouture pour éviter le rancissement et augmenter la durée de conservation.
- ❖ Les enveloppes (13 à 15%) : le tégument séminal (péricarpe extérieur, péricarpe moyen et le péricarpe intérieur) : essentiellement composés de cellulose et de matières minérales.
- ❖ L'assise protéique (endosperme) : riche en lipides, protéines, matières minérales et vitamines. Les enveloppes sont éliminées pendant la mouture et deviennent les sons.
- ❖ L'amande farineuse ou albumen amylicé (82 à 85% du grain) : composée essentiellement d'amidon (70 à 75%) et de protéines (10 à 12%). Une faible proportion de matières minérales et de vitamines est également présente (0,3 à 0,6%). C'est l'amande qui donnera la farine.

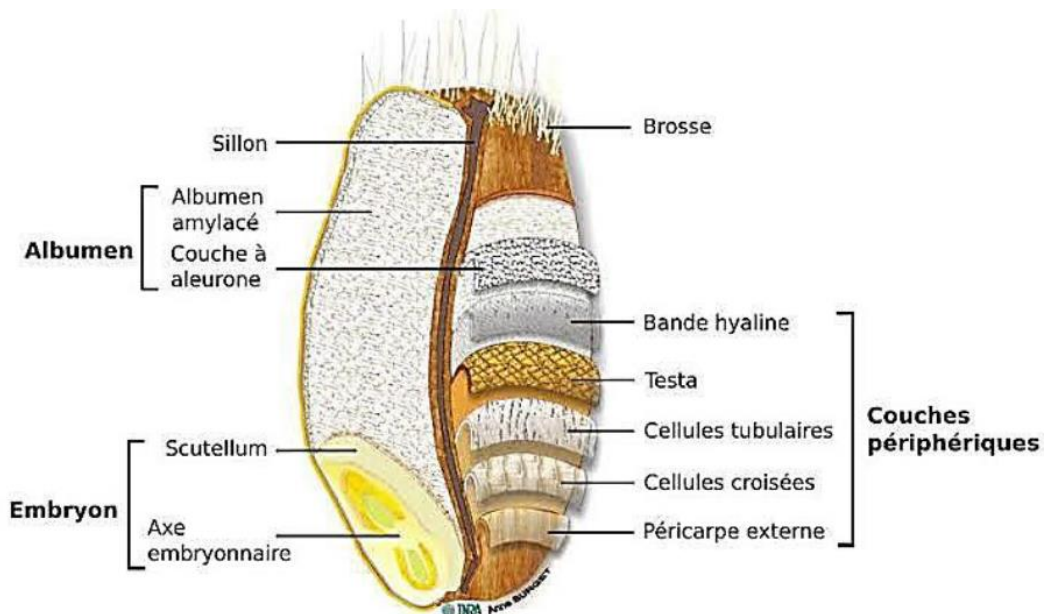


Figure 4. Anatomie du grain de blé tendre (Brahimi H., 2016)

## **1.6. Les exigences édaphoclimatiques**

### **1.6.1. Exigences climatiques :**

Une température de 5°C est exigée pour la germination, la température journalière moyenne nécessaire à la croissance optimale au tallage se situe entre 18 et 20°C. Il est sensible à la haute température surtout à la phase de maturité (cité in Akdif et Goudjil, 2001).

Dès la germination, l'eau peut constituer un facteur limitant important de la croissance du blé, la germination commence lorsqu'il absorbe 25 %. Par la suite, à partir de la phase reproductrice, l'eau peut encore constituer un facteur limitant.

La lumière est un paramètre climatique indispensable qui agit directement sur le bon fonctionnement de la photosynthèse et le comportement du blé, le bon tallage est garanti, si le blé est placé dans les conditions optimales d'éclairement (Soltner, 1988).

### **1.6.2. Les exigences édaphiques :**

Le blé favorise le sol bien préparé, meulé et stable, résistant à la dégradation d'une texture douce et argileuse pour fournir la relation avec et entre les racines fibreuses (Baldy, 1993).

Le pH idéal est entre 6 et 8. Le blé tolère suffisamment l'alcalinité du sol et les électrolytes ne doivent pas dépasser 04 mm/cm (Clement, 1971).

### **1.6.3. Les exigences de fertilisation :**

#### **1.6.3.1. Estimations des besoins du blé en unités fertilisantes N.P.K :**

L'estimation des nécessités du blé en unités fertilisant NPK, s'est réalisée sur la base des exigences unitaires, en ces trois éléments, pour rapporter un quintal de grain de blé, et d'après le potentiel des diverses zones céréalières. Il faut éviter d'épuiser le sol en entretenant sa fertilité, particulièrement en matière organique et en sels minéraux (Kamel *et al.*, 2017).

La fertilisation azotée phosphatée et potassique est nécessaire pour la culture du blé. Selon Pousset, (2000), l'azote est une partie très majeure de la substance organique. L'azote joue un rôle dans la formation des protéines, de la chlorophylle, des enzymes et des vitamines(Christian .,2005).

Un bon apport d'engrais phosphaté favorise le développement racinaire et accélère la maturité (Abdelmadjid, 2013).

Le potassium est un élément primordial. Il joue un rôle majeur dans le perfectionnement de l'association azote/potasse (Kamel *et al.* 2017).

### 1.7. Production de blé tendre :

#### ➤ Dans le monde :

Le blé tendre est l'une des premières plantes domestiquées par l'homme, il est largement cultivé dans le monde (Xiaojie *et al.*, 2012). Cette culture représente plus de 90% de la production mondiale des blés (Ghennai *et al.*, 2017). Le blé tendre est principalement utilisé pour faire du pain, des nouilles, des biscuits et des gâteaux (Lopes *et al.*, 2012).

Selon le Conseil International du Grain (CIC, 2016), la production mondiale du blé tendre est passée, de 611 à 736 millions de tonnes, au cours de la période allant de 2007-2008 à 2015-2016.

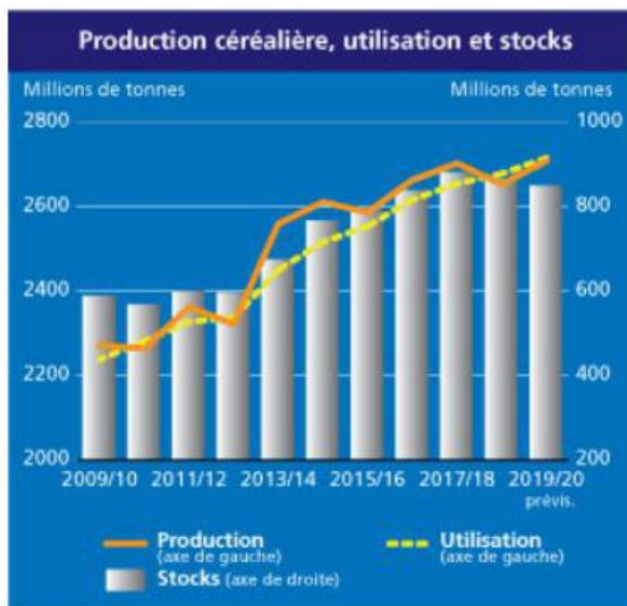


Figure 5. Production mondiale des céréales (Ait kaki Y., 1993)

#### ➤ En Algérie :

La production algérienne en blé tendre reste très faible. Elle a atteint, au cours de la campagne 2014-15, les 0,63 millions de tonnes (INRA, 2016). Du point de vue

productivité, le rendement moyen de blé tendre enregistré au cours de la campagne 2014-15 est de 1,26 t/ha (INRA, 2016). La variation des rendements des céréales des zones semi-arides tire son origine en grande partie des effets de ces contraintes abiotiques (Bouzerzour *et al*, 1994).

Actuellement, l'Algérie est un grand importateur de blé notamment le blé tendre (Djermoun, 2009) et se trouve dépendante du marché international.

### ➤ **A Mostaganem :**

La wilaya de Mostaganem est reconnue pour sa production agricole diversifiée, notamment en matière de céréales telles que le blé tendre. Les données disponibles indiquent que lors de la campagne 2020/2021, la production de blé tendre a atteint 614 100 quintaux, enregistrant une diminution par rapport aux 835 450 quintaux produits durant la campagne précédente.

Cette baisse peut être attribuée à des conditions climatiques défavorables, notamment la sécheresse qui a sévèrement impacté les cultures céréalières dans la région. En effet, sur les 23 918,58 hectares dédiés à la céréaliculture, environ 18 683,48 hectares ont été convertis en pâturages en raison du manque de précipitations.

Il est également pertinent de noter que lors de la campagne labours-semailles 2024/2025, environ 7 hectares ont étéensemencés en blé tendre, avec une distribution de 418,5 quintaux de semences dédiées à cette culture.

## **1.8. Physiologie de blé tendre :**

Le Blé tendre est semé en automne, se développe en hiver et mûrit en fin de printemps ou en début d'été. Les stades de croissance à partir de la germination sont : la levée, le tallage, la montaison, l'épiaison, la floraison et la maturité physiologique. La majorité des Stades de croissance sont eux même subdivisée en plusieurs sous étapes.

### **1.8.1. Période Végétative :**

Elle se caractérise par le développement strictement herbacé et s'étend du semis jusqu'à fin du tallage. Elle se divise en deux étapes :

#### **Phase de germination- levée :**

La germination de la graine se caractérise par L'émergence de coléorhize donnant naissance à des racines séminales et du Coléoptile qui protège la sortie de la première feuille fonctionnelle. La levée se fait réellement dès la sortie des feuilles à la surface du sol. Au sein d'un peuplement, la levée est atteinte lorsque la Majorité des lignes de semis sont visibles (Gate, 1995).

Durant la phase Semis levée, l'alimentation de la plante dépend uniquement de son système Racinaire primaire et des réserves de la graine. Les principaux facteurs édaphiques qui interviennent dans la réalisation de Cette phase sont, la chaleur, l'aération et l'humidité (Eliard, 1979).

Les Caractéristiques propres à la graine comme la faculté germinative et la Quantité de réserves (taille des graines) jouent aussi un rôle déterminant. En Effet, les plus grosses graines lèvent les premières et donnent des plantules Plus vigoureuses (Masle-Meynard, 1980).

De plus, la composition des réserves (teneur en protéines) agit favorablement sur la vitesse de la Germination-levée (Evans et Rawson, 1975). La production de talles commence à l'issue du Développement de la troisième feuille (Moule, 1971).

### **Phase levée-tallage :**

L'apparition de ces talles se fait à un rythme régulier égal à celui de l'émission des feuilles. A partir des bourgeons situés à l'aisselle Des talles primaires initiées à la base du brin maître, les talles secondaires Peuvent apparaître et être susceptibles d'émettre des talles tertiaires. Le Nombre de talles produites dépend de la variété, du climat, de l'alimentation Minérale et hydrique de la plante, ainsi que la densité de semis (Masle-Meynard, 1980).

La nutrition minérale notamment azotée est faible jusqu'au stade 2-3 feuilles car elle est satisfaite par les ressources de la graine et L'azote minéral présent dans le sol. Le facteur nutritionnel peut modifier la Vitesse du tallage herbacé, la durée du tallage et le nombre de talles (Austin et Jones, 1975).

### **1.8.2. Période Reproductrice :**

Dite aussi période de montée, elle est dominée par l'apparition de l'épi et la formation du grain. Elle comprend :

#### **Phase montaison-gonflement :**

La montaison débute à la fin du tallage, elle est Caractérisée par l'allongement des entre-nœuds et la Différenciation des pièces florales. A cette phase, un certain nombre de talles Herbacées commence à régresser alors que, d'autres se trouvent couronnées Par des épis. Pendant cette phase de croissance active, les besoins en Éléments nutritifs notamment en azote sont accrus (Grancourt et Prats, 1971). La montaison s'achève à la fin de l'émission de la dernière feuille et Des manifestations du gonflement que provoquent les épis dans la gaine.

### **Phase épiaison-floraison :**

Elle est marquée par la méiose pollinique Et l'éclatement de la gaine avec l'émergence de l'épi. C'est au cours de cette Phase que s'achève la formation des organes floraux (l'anthèse) et s'effectue La fécondation. Cette phase est atteinte quand 50% des épis sont à moitié Sortis de la gaine de la dernière feuille (Gate, 1995). Elle Correspond au maximum de la croissance de la plante qui aura élaboré les Trois quarts de la matière sèche totale et dépend étroitement de la nutrition Minérale et de la transpiration qui influencent le nombre final de graines par Épi (Masle-Meynard, 1980).

### **1.8.3 Période de formation et de maturation du grain :**

Durant cette période les substances de réserve (amidon, matières rotéiques) S'élaborent et migrent dans l'albumen ; parallèlement l'embryon se forme. Cette période Comprend :

#### **Grossissement du grain :**

Cette phase marque la modification du fonctionnement de la plante qui sera alors orientée vers le remplissage des grains à partir de la biomasse produite. Au début, le grain s'organise, les cellules se multiplient. Les besoins des grains sont inférieurs à ce que fournissent les parties aériennes (plus de  $\frac{3}{4}$  de la matière sèche sont stockés au niveau des tiges et des feuilles). Par la suite, les besoins augmentent et le poids des grains dans l'épi s'élève, alors que la matière sèche des parties aériennes diminue progressivement. Seulement 10% à 15% de l'amidon du grain peut Provenir de réserves antérieures à la floraison (Boulelouah, 2002).

A l'issue De cette phase, 40 à 50% des réserves se sont accumulées dans le grain qui, Bien qu'il ait atteint sa taille définitive, se trouve encore vert et mou, c'est le Stade " grain laiteux.

#### **Maturation du grain :**

La phase de maturation succède au stade pâteux (45% D'humidité). Elle correspond à la phase au cours de laquelle le grain va Perdre progressivement son humidité en passant par divers stades (Gate, 1995).

Elle débute à la fin du palier hydrique marqué par la stabilité de la Teneur en eau du grain pendant 10 à 15 jours (Au-delà de cette Période, le grain ne perdra que l'excès d'eau qu'il contient, et Passera progressivement aux stades "rayables à l'angle" (20 % de L'humidité) puis, "cassant sous la dent" (15-16d'humidité).

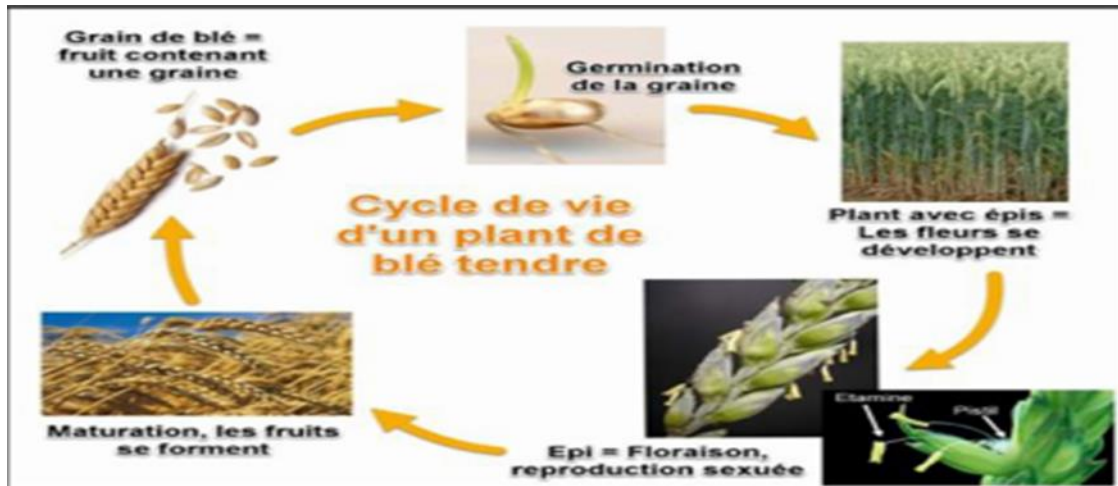


Figure 6. Cycle végétatif du blé tendre (Gate, 1995).

## 1.9. Généralités sur les métaux lourds

Selon Arris S, (2008) les métaux lourds désignent des éléments métalliques naturels ayant une densité supérieure à  $5 \text{ g/cm}^3$ . Ils se retrouvent fréquemment dans l'environnement sous forme de traces, tels que le mercure, le plomb, le cadmium, le cuivre, l'arsenic, le nickel, le zinc, le cobalt, le manganèse, etc.

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

D'un point de vue physique, l'expression « métaux lourds » désigne des éléments métalliques naturels, ainsi que, dans certains cas, des métalloïdes (environ 65 éléments), caractérisés par une densité élevée supérieure à  $5 \text{ g/cm}^3$  (Adriano D.C., 2001).

Enfin, d'un point de vue biologique, ces métaux sont classés en deux catégories en fonction de leurs effets physiologiques et toxiques : les métaux essentiels et les métaux toxiques.

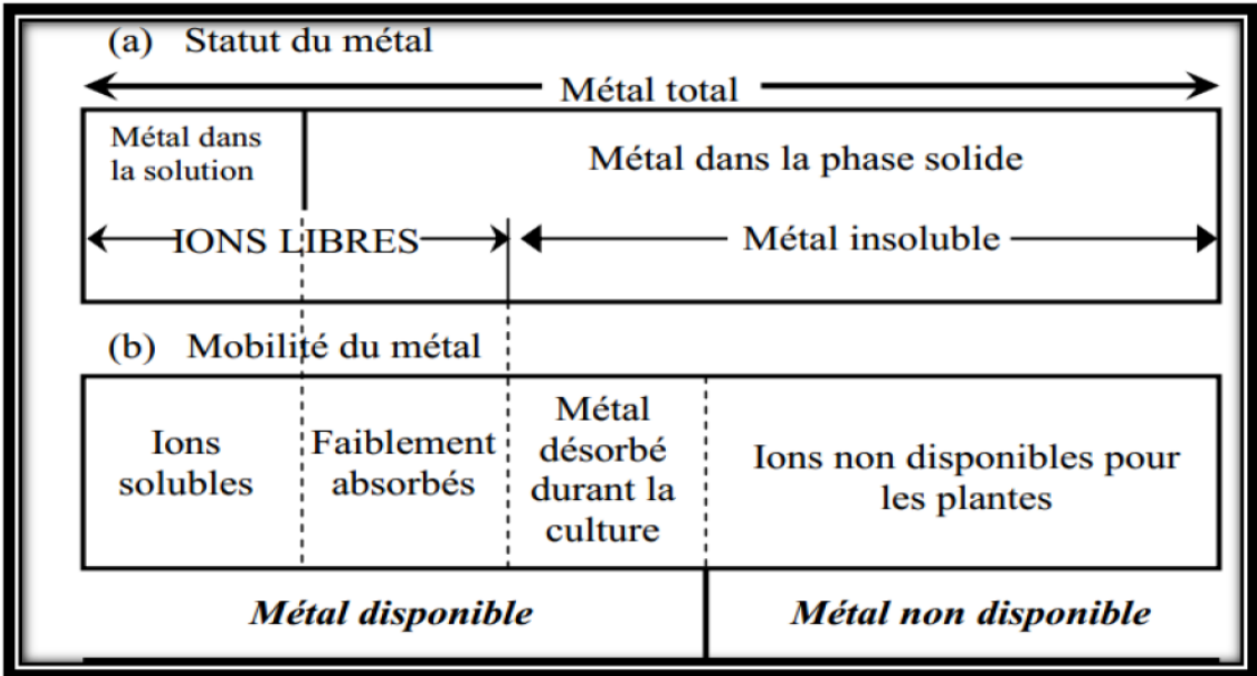


Tableau .2 Illustrant la mobilité des métaux lourds (Shallari, 1998)

### 1.9.1 Classification des métaux lourds

**Les métaux essentiels** : Ce sont des éléments indispensables en petites quantités pour différents processus cellulaires, et se trouvent en concentrations minimales dans les tissus biologiques. (Loue, 1993). Certains éléments, tels que le cuivre (Cu), le zinc (Zn) et même le fer (Fe), sont essentiels à faible dose mais peuvent devenir toxiques lorsque leur concentration dépasse un certain seuil. Par exemple le zinc (Zn) à une concentration de l'ordre du millimolaire est un oligo-élément qui joue un rôle majeur sur le métabolisme des protéines, des glucides et des lipides (Kabata-Pendias A., et Pendias H., 2001).

**Les métaux toxiques** : Ce sont des éléments qui possèdent des propriétés polluantes et peuvent être toxiques pour les organismes vivants, même à faible concentration. Aucun effet positif n'a été observé pour les plantes en général. C'est le cas du plomb (Pb), du mercure (Hg) et du cadmium (Cd).

## 1.9.2 L'origine des métaux lourds

### Les sources naturelles :

Les métaux lourds se trouvent naturellement dans les roches, sont libérés lorsqu'elles se dégradent, formant ainsi le fond géochimique (Bourrelier et Berthelin, 1998).

Selon Afnor (1988), les principales sources naturelles de ces éléments regroupent l'activité volcanique, l'altération des continents et les incendies de forêts. Lors d'éruptions violentes les volcans peuvent émettre de grandes quantités de gaz et de particules, généralement liées à l'activité géothermique et au dégazage du magma.

### Les sources anthropiques :

Les métaux dérivés d'apports anthropiques existent sous une forme chimique plutôt réactive et présentent donc un risque plus élevé que les métaux d'origine naturelle, qui sont généralement immobilisés sous des formes relativement inertes (Weiss, d et *al.* 1999).

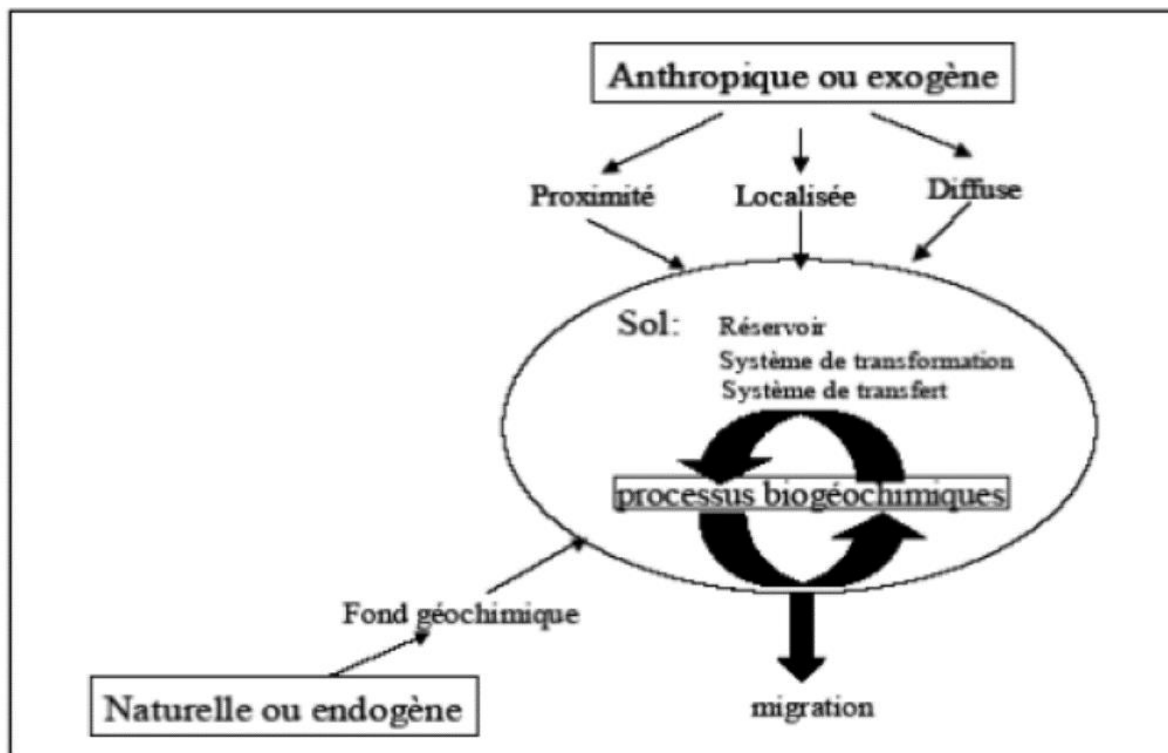


Figure 7. Source de métaux lourds dans le sol (Klute, 1986)

### 1.9.3 Pollution par les métaux lourds

Les métaux lourds représentent une menace sérieuse pour l'environnement, principalement parce qu'ils sont non dégradables. Ils ont tendance à s'accumuler progressivement à travers divers processus minéraux et biologiques. En outre, ces éléments peuvent pénétrer directement dans la chaîne alimentaire, ce qui engendre des effets néfastes à court ou à long terme, que ce soit sous forme de toxicité aiguë ou chronique.

### 1.9.4. Contamination des sols

Le sol joue un rôle central dans de nombreuses activités humaines telles que l'industrialisation, l'urbanisation et l'agriculture. Son importance pour l'environnement a été pleinement reconnue ces dernières décennies, car il agit à la fois comme réacteur, récepteur, accumulateur et filtre des polluants (Robert N., Juste C, 1999). En comparaison avec l'air et l'eau, le sol est le milieu qui reçoit les plus grandes quantités d'éléments traces issus des activités industrielles et agricoles. Ces éléments, y compris les métaux lourds, s'y accumulent au fil du temps, rendant le sol un véritable réceptacle pour ces substances nocives.

Au-delà de cette fonction passive, le sol participe activement à des processus de transformation chimique et biologique, où certaines substances peuvent être neutralisées ou rendues moins bio disponibles.

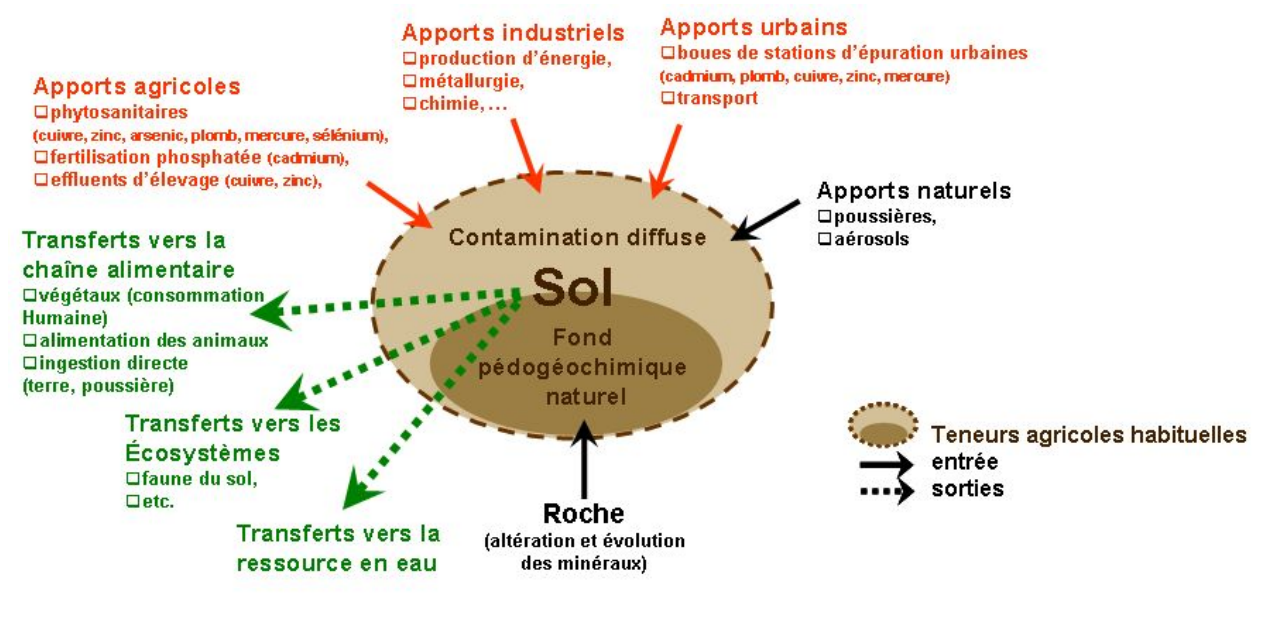


Figure 8. Contamination du sol

### 1.9.5. Facteurs modifiant la mobilité des éléments métalliques :

La biodisponibilité désigne la capacité d'un métal trace à migrer depuis un compartiment du sol, quel qu'il soit, vers un organisme vivant, tel qu'un animal, une plante ou une bactérie.

- ❖ La mobilité d'un métal trace se réfère à sa capacité à se déplacer à travers différents compartiments du sol, où il est progressivement moins retenu énergétiquement. Ce processus aboutit généralement à sa présence dans la phase liquide, voire, dans certains cas, dans l'atmosphère du sol (Juste, 1988).
- ❖ Plusieurs facteurs peuvent influencer la mobilité des métaux dans les sols. Parmi les plus significatifs, on retrouve ceux mentionnés par Colinet (2003) :

### **A. L'apport de matière organique**

L'apport de matière organique dans le sol peut entraîner l'immobilisation des éléments traces métalliques (ETM), car ces derniers présentent une forte affinité pour cette matière. Cependant, la minéralisation qui suit peut libérer à nouveau ces métaux dans la solution du sol, ce qui signifie que l'immobilisation est uniquement de nature temporaire (Perrono P., 1999).

### **B. Le pH :**

Le pH joue un rôle essentiel dans la mobilité des ions métalliques en influençant la quantité de charges négatives disponibles en solution (McLaughlin et al. 2000). Les protons, responsables de l'acidification, proviennent principalement de la respiration des plantes et des micro-organismes, ainsi que de l'oxydation des sulfures. En revanche, ils sont consommés lors de l'hydrolyse des minéraux altérables.

### **C. L'activité biologique**

Les principaux processus influençant la mobilité des polluants métalliques sont la solubilisation, l'insolubilisation et la volatilisation (Esteban R., 2006). Ces phénomènes déterminent la façon dont les métaux lourds se déplacent, se transforment et se concentrent dans différents compartiments écologiques tels que le sol, l'eau et l'air.

La solubilisation permet aux métaux lourds de se dissoudre dans l'eau, augmentant leur mobilité et leur biodisponibilité, ce qui facilite leur dispersion et leur absorption par les organismes, représentant ainsi un risque pour l'environnement. L'insolubilisation, au

contraire, empêche la dissolution des métaux, les rendant moins mobiles et réduisant leur impact sur les nappes phréatiques et la faune. Enfin, la volatilisation transforme certains métaux, comme le mercure, en formes gazeuses, qui se diffusent dans l'atmosphère et peuvent se propager sur de longues distances.

#### **D. La température**

La température du sol, influencée par le climat et l'activité biologique, affecte également la formation de complexes avec des ligands inorganiques, modifiant ainsi l'activité des éléments dissous (Deneux-Mustin et *al*, 2003).

La température influence directement la mobilité des éléments métalliques en perturbant les équilibres des réactions de dissolution-précipitation et de co-précipitation. Elle a également un impact indirect en affectant la teneur en eau du sol, le pH et l'Eh.

#### **E. Les carbonates (CaCO<sub>3</sub>)**

La forme dominante des carbonates dans la plupart des sols est la calcite (CaCO<sub>3</sub>), bien que d'autres métaux divalents présents dans les sols pollués, comme le Pb, Zn, Cu, ainsi que le Ca, Mg et Fe, puissent également se lier au CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>. Ce dernier, relativement soluble, joue un rôle clé dans le pH des sols et affecte la sorption des métaux, tandis que ses réactions de dissolution/précipitation aident à fixer les ions métalliques dans les cristaux formés (Blanchard, 2000).

### **1.9.6. Transfert des métaux lourds du sol vers les plantes**

Des concentrations excessives de métaux peuvent entraîner des dysfonctionnements métaboliques chez de nombreuses plantes, notamment par le remplacement des ions essentiels par des ions non essentiels, la compétition entre les ions métalliques et les métabolites nécessaires, ainsi que des modifications de la perméabilité des membranes cellulaires.

Les manifestations de la toxicité varient selon les espèces, mais les symptômes les plus fréquents incluent des taches chlorotiques ou brunes sur les feuilles, des racines abîmées et brunes, la nécrose, ainsi qu'une baisse notable des rendements. D'autres effets moins visibles peuvent également se produire, tels que l'inhibition de la croissance des racines, la réduction de la photosynthèse, etc. (Kabata-Pendias A., et Pendias H., 2001).

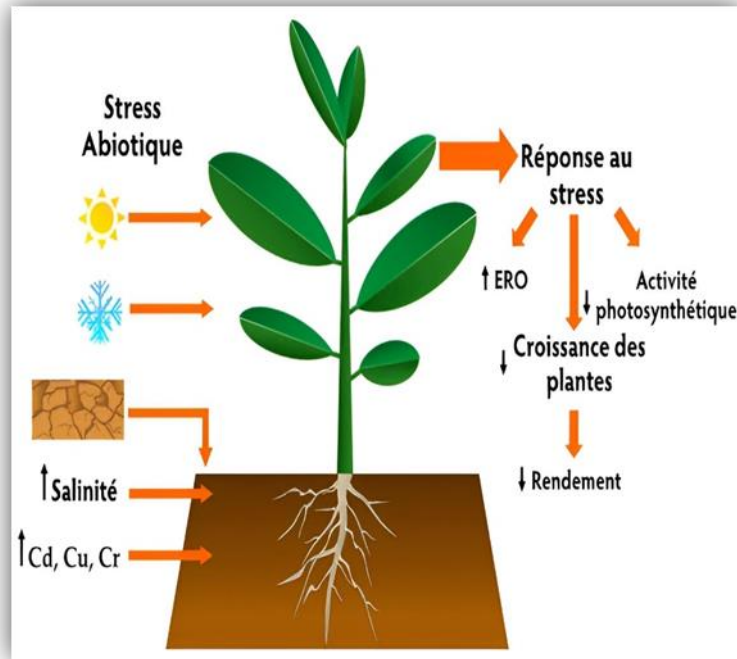


Figure 9. Effet des métaux lourds sur la plante

### 1.9.7. Pénétration des éléments-traces dans la plante

Les métaux sont principalement absorbés par diffusion passive au niveau du cortex racinaire et de l'endoderme.. Le transport des métaux se fait passivement via les pores de la paroi cellulaire, mais une partie peut être adsorbée par les charges négatives des pectines. Au niveau de l'endoderme, le transport devient actif au niveau de la membrane plasmique, permettant un transfert contre le gradient de concentration (Briat Et Lebrun, 1999).

Les éléments traces font partie intégrante des matériaux minéraux et organo-minéraux présents dans les fines particules en suspension dans l'air. Ces particules se déposent ensuite sur les surfaces des feuilles, des tiges et des fruits. La contamination par voie atmosphérique reste généralement faible, sauf dans des situations particulières où les retombées sont significatives, comme dans les zones industrielles ou pour certains éléments comme (Pb), principalement dû aux résidus des combustions d'essence plombée. Tant les éléments-traces essentiels que non-essentiels peuvent être absorbés par les feuilles sous forme gazeuse (par exemple, le sélénium, l'arsenic, ou le mercure), ces éléments peuvent pénétrer dans les feuilles par les stomates, tandis que sous forme ionique, ils passent principalement par les cuticules (Prasad Et Hagemeyer, 1999).

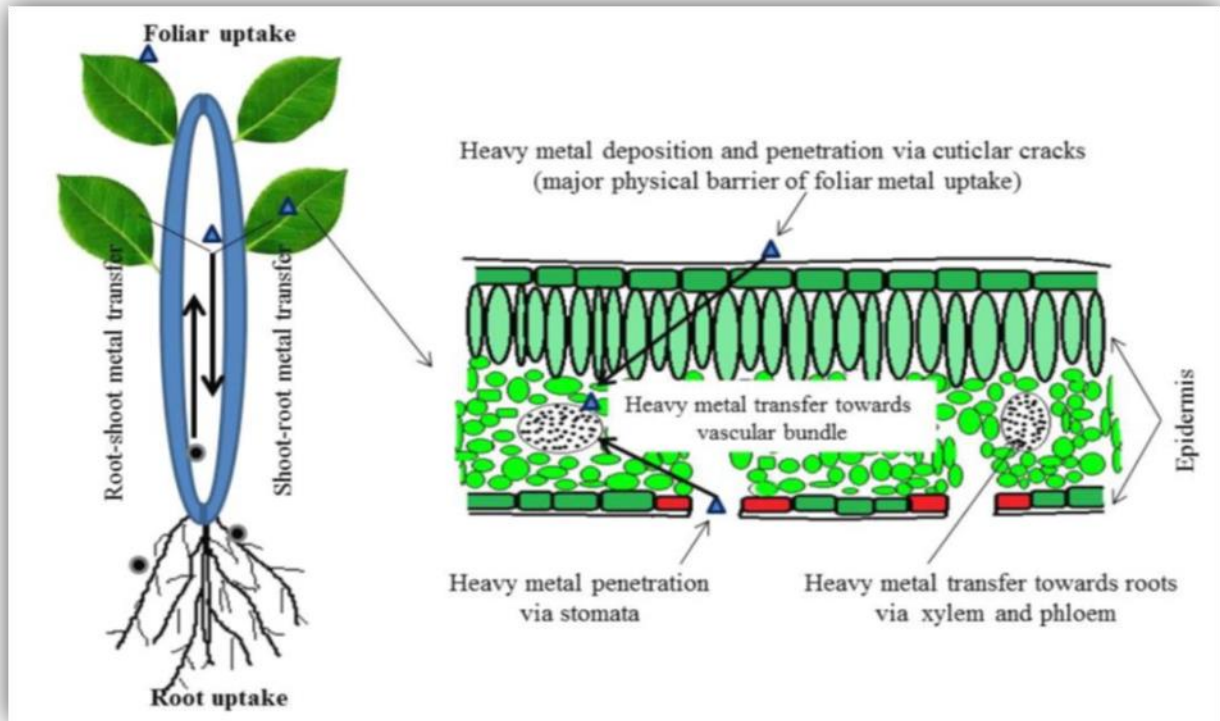


Figure 10. Absorption foliaire des métaux lourds (Shahid *et al*, 2016)

### 1.9.8. Tolérance aux métaux lourds chez les végétaux

Certains métaux sont nécessaires à la vie des organismes, mais seulement à des concentrations faibles. À des concentrations élevées, ces éléments peuvent devenir un facteur de stress, modifiant ainsi les réponses physiologiques de l'organisme. On parle de « sensibilité » pour désigner les conséquences de ce stress, qui peuvent aller jusqu'à provoquer la mort des plantes. En revanche, le terme « résistance » désigne la capacité de la plante à réagir de manière à surmonter ce stress métallique et à assurer sa reproduction (Levitt, 1980). Ce phénomène de résistance repose principalement sur deux stratégies clés :

La première est la stratégie d'évitement, par laquelle elles limitent l'absorption des métaux lourds. Cette approche permet aux plantes de réduire leur exposition aux concentrations dangereuses en régulant activement l'entrée des éléments métalliques dans leurs tissus. Cela peut se faire par divers mécanismes, comme l'altération des pores racinaires ou la modification des protéines de transport.

La seconde est la stratégie de tolérance, concerne les mécanismes internes permettant à la plante de gérer et d'atténuer les effets toxiques des métaux une fois qu'ils ont été absorbés. Cela inclut des processus tels que la détoxification des métaux par liaison avec des molécules comme les métallothionéines, ou encore l'accumulation de ces métaux dans des compartiments cellulaires spécifiques où leur toxicité est minimisée. Ainsi, la plante peut survivre, et même se développer, malgré une exposition à des niveaux élevés de métaux, tout en maintenant ses fonctions vitales.

Cette distinction entre évitement et tolérance montre que les plantes ne se contentent pas de subir les conditions environnementales, mais développent des réponses adaptatives pour gérer les menaces liées à la présence de métaux dans leur milieu. Ces deux stratégies, complémentaires mais distinctes, sont cruciales pour leur survie et leur reproduction dans des environnements pollués.

### **1.9.9. L'effet du Cuivre et du zinc sur la plante**

Le zinc (Zn) est un élément chimique métallique classé parmi les 7 oligo-éléments essentiels, identifié par le numéro atomique 30 et faisant partie des métaux de transition. Il joue un rôle crucial dans les systèmes biologiques, en intervenant notamment dans l'activation enzymatique, la stabilisation des protéines, la régulation de l'expression des gènes ainsi que dans les processus de croissance et de développement cellulaire (Prasad, A. S. 2013).

Il entre dans la composition de nombreuses enzymes, ou il joue un rôle catalytique, régulateur ou structural. Un déficit en zinc peut conduire à des dysfonctionnements tissulaires, mais aussi d'autres pathologies peuvent survenir en cas d'excès de zinc, provoquant une perturbation de l'homéostasie cellulaire (Muller et *al*, 2010).

Lorsque les végétaux sont exposés à des concentrations excessives de zinc (Zn), ce métal essentiel devient toxique, provoquant des perturbations physiologiques et biochimiques significatives (Marschner, 2012). Ces effets néfastes s'observent à divers degrés de structuration biologique. Une accumulation excessive de Zn entrave l'élongation des racines, provoquant leur raccourcissement et l'apparition des nécrose (line *et al.*, 2005), Les feuilles présentent fréquemment des symptômes de chlorose et des nécroses marginale, tandis que la tige montre un rabougrissement marqué (Broadley *et al*, 2007).

Le cuivre (Cu) est un métal rougeâtre reconnu pour sa grande malléabilité et ductilité, avec une masse atomique de 63.546 g/mol et un numéro atomique de 29. Il est

aussi réputé pour ses excellentes propriétés de conduction thermique. Dans la nature, le cuivre se trouve principalement sous forme de minerais, qu'il s'agisse de cuivre natif ou de minerais contenant des oxydes ou des sulfures.

Les concentrations actuelles de cuivre dans les sols résultent de l'accumulation de diverses sources. Celles-ci incluent des retombées atmosphériques d'origine naturelle, telles que l'érosion éolienne, les éruptions volcaniques, les sels marins et les incendies de forêts, ainsi que des sources anthropiques comme les activités industrielles, minières, agricoles et l'incinération de déchets (Tiller et Merry, 1981 ; Baker et Senft, 1995 ; Bourrelier et Berthelin, 1998).

En effet, le cuivre s'accumule principalement dans la couche superficielle du sol (Brun *et al.*, 1998 ; Pietrzak et Mc Phail, 2004) car il s'y complexe rapidement, notamment avec la matière organique. Le cuivre a donc peu de potentiel de contaminer les formations profondes ou les eaux souterraines par lessivage (Delas, 1963), bien qu'il existe un risque de contamination des eaux de ruissellement (Robert, 1995).

D'après Marschner, (1995) et Bravin, (2008) un excès de cuivre dans le sol entraîne d'abord une réduction de la biomasse racinaire, puis affecte la croissance des parties aériennes. La rhizotoxicité se manifeste par une coloration brune des racines, une diminution de la formation des poils absorbants, une réduction de l'élongation racinaire et un épaississement des racines (Kopittke et Menzies, 2006 ; Marschner, 1995 ; Panou-Filothéou et Bosabalidis, 2004).

Ces changements dans les racines entraînent une altération de la perméabilité des membranes plasmiques (Kabata Pendias, 2010), ce qui perturbe l'absorption d'autres oligo-éléments essentiels (Zn, Mn, Fe, Mo, Cl), ainsi que le potassium.

Au niveau cellulaire, l'excès de cuivre perturbe plusieurs processus vitaux. Il inhibe la division cellulaire (Eleftheriou et Karataglis, 1989) et empêche l'élongation des cellules en augmentant la rigidité des parois cellulaires. Cela se produit par le remplacement des ions  $\text{Ca}^{2+}$  par des ions  $\text{Cu}^{2+}$  dans l'apoplasme, perturbant ainsi la structure des parois et limitant l'expansion cellulaire (Arduini *et al.* 1994).

Ce phénomène conduit à une augmentation de la ramification racinaire, mais les racines ne parviennent pas à se développer correctement et restent sous forme de renflements au niveau subapical, incapables de s'allonger normalement (Kopittke *et al.* 2007 ; Bravin, 2008).

### 1.9.10. Germination et stress métalliques

Les effets chimiques dépendent principalement de la composition des nanoparticules. Certains métaux toxiques (Cu, Cd, Hg, etc.) peuvent se lier à certains composants cellulaires comme des protéines et ainsi modifier leurs propriétés ou leurs activités.

Ces interférences avec les processus cellulaires causent souvent des déséquilibres des potentiels redox et un stress oxydant chez les plantes exposées aux métaux (Sharma et Dietz, 2006).

L'augmentation du taux des métaux non essentiels dans les plantes exerce une toxicité (Prasad, 199), affectant plusieurs étapes de développement, de la germination à la formation des feuilles. D'une manière générale, la plupart des métaux peuvent inhiber la germination et la croissance racinaire lors des premiers stades de développement. Le mercure (Hg) est le métal le plus inhibiteur de la germination. Il provoque une inhibition complète dans les graines de blé et du concombre à des concentrations de 1.7mM et  $\geq 1.5$ mM (Seregin et Kozidzinska, 1998).

Même à faibles doses, le plomb inhibe la germination des grains qui ont les enveloppes perméables comme le petit pois *Pisum sativum* (Seregin et Ivanov, 2000). Par contre, les fortes doses conduisent à une inhibition totale de la (Munzuroglu & Geckil, 2002) et a été le plus souvent imputée à des perturbations dans le métabolisme respiratoire (Bansal & Sharma, 2000, 2002).

Chez la plupart des espèces, la germination est terminée lorsque la radicule émerge des téguments de la graine (Hopkins, 2003). La croissance de l'hypocotyle et de l'axe racinaire est plus sensible à l'action toxique des métaux et est souvent complètement inhibée par de faibles concentrations qui ont peu d'effets sur la germination (Aydinalp & Marinova, 2009 ; Kranner & Colville 2011).

### 1.9.11. Croissance et stress métalliques

Les racines sont les plus sensibles aux MT par rapport à d'autres organes végétaux, parce qu'elles sont les premières cibles de passage et d'accumulation de ces métaux (Seregin et Ivanov, 2000), particulièrement, les racines primaires qui sont plus sensibles que les racines latérales (Obrouscheva et al, 1998). Les MT affectent l'élongation racinaire par l'ordre croissant suivant : Cu > Cd > Fe = Zn > Pb.

La sensibilité des racines au cuivre (Stiborva et al, 1986 ; Jarvis et Whitehead, 1993) est probablement due à sa forte accumulation dans ces organes ainsi que sa faible translocation vers les parties aériennes. Jiang et al, (2000) ont montré que le  $\text{Cu}^{2+}$  inhibe la croissance des racines d'*Helianthus annuus* à des concentrations de  $10^{-4}$  à  $10^{-2}\text{M}$ . Muller et al, (2001) ont montré que, chez *Thypha latifolia*, l'élongation racinaire est le paramètre le plus sensible suite à des expositions au sulfate de cuivre présent dans l'eau ou dans le sédiment, alors que cette plante ne présente pas de signes de chlorose.

# CHAPITRE II

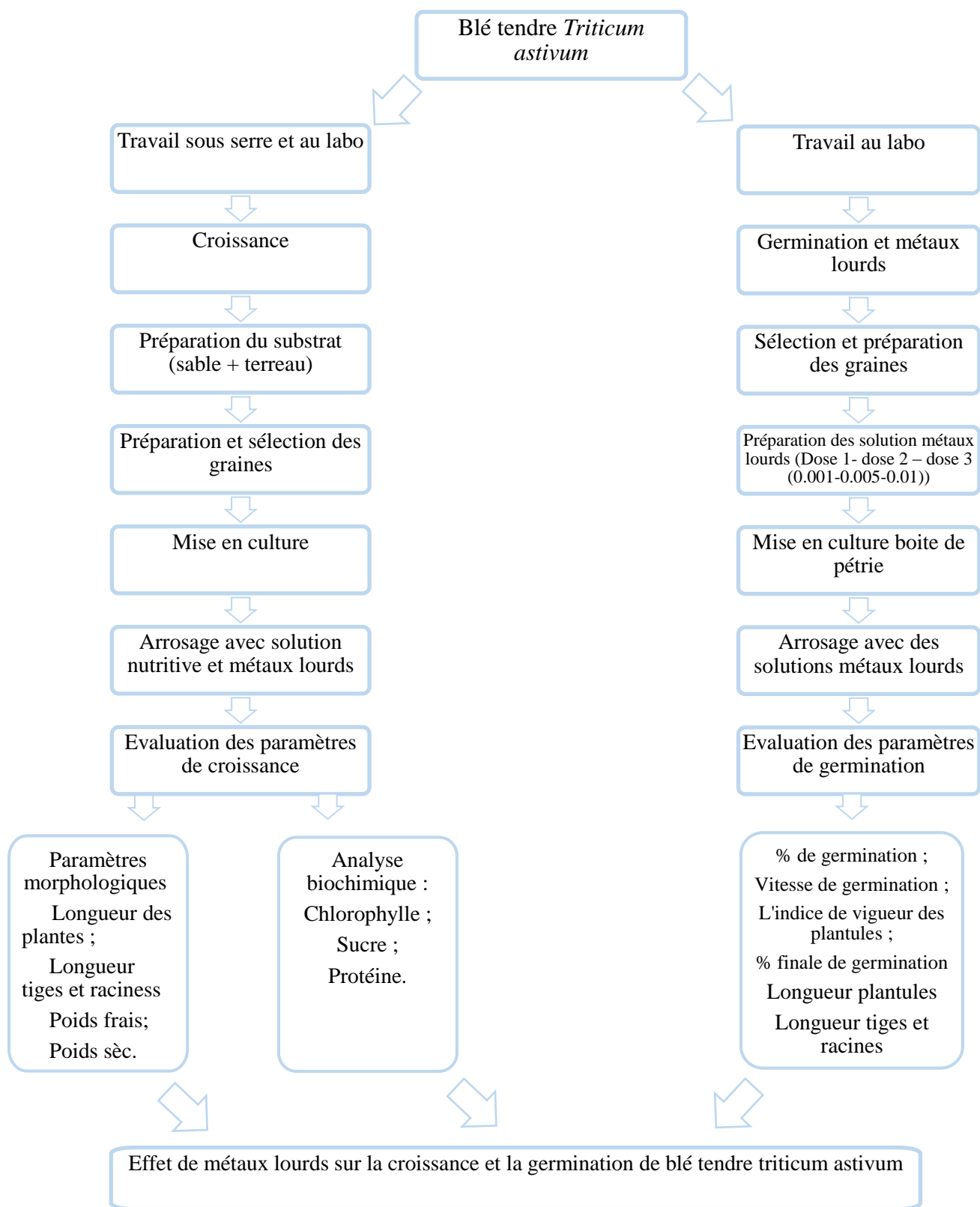
## MATÉRIELS ET MÉTHODES

## **Chapitre II Matériels et méthodes**

### **2.1 Objectif**

Étudier l'impact de différents métaux lourds (zinc et cuivre) sur la germination et la croissance de blé tendre (*Triticum aestivum*), dans le but d'évaluer leur toxicité potentielle et leur influence sur la physiologie de l'espèce.

### **2.2. Protocole expérimentale**



## 2.3. Choix de l'espèce

L'essai a porté sur une variété de Blé tendre (*Triticum aestivum L.*, variété *Ain Abid*) semences de l'année qui a fait l'objet de cette étude.

Les semences ont été fournies par l'atelier agricole de Mazargan de l'université Abdel Hamid Ibn Badis.

### 2.3.1. Caractéristiques de la variété étudiées

Tableau 3 Caractéristiques principales de la variété Ain Abid (INRAA)

<b>Origine</b>	Variété locale, adaptée aux conditions de culture d'Algérie.
<b>Tiges</b>	Taille moyenne, formant un plateau de tallage au niveau du sol.
<b>Capacité de tallage</b>	Bonne capacité de tallage, ce qui permet de former un plateau de tallage à partir duquel se développent les tiges feuillées.
<b>Épis</b>	L'épi de la variété Ain Abid présente une faible diminution de longueur par rapport à d'autres variétés, ce qui est un avantage.
<b>Rendement</b>	Les rendements peuvent varier, mais la variété est connue pour sa productivité.
<b>Utilisation</b>	La variété Ain Abid est principalement utilisée pour la production de farine et de pain, grâce à ses qualités boulangères.

## 2.4. Effet de métaux lourds zinc et cuivre sur la germination

### 2.4.1. Sélection et préparation des grains

Les graines de blé tendre (*Triticum aestivum L.*, variété *Ain Abid*) sont bien sélectionnées (en terme de calibre, de couleur, de dommage, ect) puis sont désinfectées par l'eau de javel pendant 10 min puis sont stérilisées par immersion dans l'alcool 95°. Elles sont ensuite soigneusement rincées plusieurs fois à l'eau distillée, puis placées dans des boîtes de Pétri contenant du papier filtre humidifié avec de l'eau distillée. La phase de germination est conduite dans l'obscurité dans une étuve, à une température contrôlée de 25 °C.

#### ❖ Conditions de culture :

La germination des graines de blé est effectuée dans des boîtes de Pétri, pour une période de 15 jours à une température moyenne stable de 25 °C.

### ❖ Préparation des concentrations

Au cours de cette étude, nous avons traité nos graines avec des concentrations croissantes (0.001, 0.005 et 0.01 g/l) de cuivre et de zinc.

Chaque traitement est réalisé en trois exemplaires afin d'assurer la fiabilité des résultats, qui sont ensuite exprimés sous forme de moyenne. Les échantillons non soumis au traitement servent de témoins.

## 2.4.2. Évaluation des paramètres de germination

### ❖ Taux de germination (%) (TG) :

Représente le nombre des graines germées par rapport au nombre de graines mises en germination. Ce paramètre constitue un meilleur moyen pour déterminer la faculté germinative des graines. Il s'exprime en pourcent et calculé à partir de la moyenne, le taux quotidien de germination (Mazliak, 1982) est exprimé par :

$$TG \% = (n/N) \times 100$$

n: nombre de graines germées; N: nombre total de graines mises en germination.

### ❖ Vitesse de la germination

Le coefficient de vélocité ( $C_v$ ), proposé par Kotowski (1926), ou le temps moyen de germination ( $T_m$ ) qui représente l'inverse x 100 de  $C_v$ .

$$C_v = \frac{N_1 + N_2 + N_3 \dots + N_n}{N_1 T_1 + N_2 T_2 + N_3 T_3 \dots + N_n T_n} \times 100$$

$$T_m = \frac{N_1 T_1 + N_2 T_2 + N_3 T_3 \dots + N_n T_n}{N_1 + N_2 + N_3 \dots + N_n} = \frac{1}{C_v} \times 100$$

$N_n$  = nombre de semences germées entre le temps  $T_{n-1}$  et le temps  $T_n$

### ❖ Pourcentage final de germination (% Gf):

$$\% Gf = (Nf / S) \times 100$$

Avec : Nf nombre de germinations obtenues à la fin de l'expérimentation (Nf), exprimé en pourcentage du nombre de graines testées (S).

#### ❖ **Indice de vigueur des plantules**

Au 5<sup>ème</sup> jour de germination des graines on mesure la longueur des plantules, ces mesures sont L'indice de vigueur des plantules (Shoot Vigor Index : SVI) déterminé au cinquième jour de mise en germination et exprimé comme étant le pourcentage de germination multiplié par la longueur de la plantule.

**L'indice de vigueur des plantules= % de germination X la longueur de la plantule.**

#### **2.4.3. Evaluation des paramètres morphologiques des jeunes plantules**

Au 15<sup>ème</sup> jour la fin de l'expérimentation on a mesuré les paramètres morphologiques des jeunes plantules, longueur plantules, longueur tiges et longueur racines. Les données collectées pour chaque plantule sont exprimées en moyenne.

### **2.5 Effet de métaux lourds zinc et cuivre sur la croissance du blé tendre**

#### **2.5.1. Dispositif expérimental**

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

Les pots utilisés ont 30 cm de hauteur et 15 cm de diamètre. Ils sont tapissés au fond par du gravier pour assurer le drainage suivi par un remplissage d'un substrat constitué d'un mélange de sable et de terreux. Les composants du substrat sont bien mélangés afin de les homogénéiser.

#### ❖ **Préparation des graines**

Les graines du blé sont désinfectées durant 5 min dans l'eau de javel après rincer à l'eau distillée plusieurs fois.

#### ❖ **Mise en culture**

L'expérimentation a été menée dans laboratoire de biologie végétale. Les graines sont semées dans des pots dans la tourbe à raison 3 plant/pots pendant une période de 45 jours à 25C° pour assurer une bonne germination. L'arrosage se fait 2 à 3 fois par semaine

avec de l'eau distillée et une fois tous les 15 jours par une solution nutritive de Hooshang, 1996 (Tableau 4).

Tableau 4 solution nutritive de Hooshang, (1996)

Sels	Poids (g /l)	Quantité (ml/l)
KNO <sub>3</sub>	100,1	5
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	136,09	1
Citrate de fer	38,91	1
ZnSO <sub>4</sub>	0,28	1
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	1,85	1
MgSO <sub>4</sub>	246,4	1
CaCL <sub>2</sub>	147	1
CuSO <sub>4</sub>	0,25	1
MnSO <sub>4</sub>	0,84	1

#### ❖ Calcule de la capacité de rétention(C.R)

Pour calculé la quantité d'arrosage de la solution des métaux lourds il faut calculer la capacité de rétention du sol :

L'arrosage est fait 2fois par semaine à 35.20% de la capacité de rétention du substrat soit environ 109.13 ml d'eau distillée substituée une fois sur trois par une solution nutritive de; cet apport est conçu pour éviter l'épuisement des éléments nutritifs et l'accumulation de sels dans les substrats de culture par évaporation de l'eau jusqu'à l'obtention d'un matériel végétal suffisant pour faire les analyses Pour calculer ces niveaux d'irrigation par apport a la capacité de rétention des pots. La différence entre p2 et p1et la quantité d'eau retenue par le sol et qui représente la capacité de rétention de pots (capacité au champ) (On estime la capacité de rétention (C.R) par l'équation suivante :

$$CR = (P2 - P1) / P1 \times 100$$

Nous avons pesé des pots contenant 201.13 g de substrat sec utilisé dans l'expérimentation P1 (P1 = poids de substrat sec), ensuite nous avons irrigué ces derniers jusqu'à saturation après 24h de repos, les pots ont été pesées de nouveau P2 (P2= poids à saturation).

### 2.5.2. Détermination de l'indice de tolérance

L'indice de tolérance est exprimé à partir des paramètres de croissance en incluant la longueur des racines, la longueur des feuilles, le poids sec des racines, le poids sec des feuilles IT est calculé selon Wilkins (1978) nous avons utilisés l'équation de la longueur feuille

- **LFSC** : longueur des feuilles dans le sol contaminé ;
- **LFST** : longueur des feuilles dans le sol témoin.

$$IT = 100 \times \frac{LF_{sc}}{LF_{st}}$$

## 2.6. Effet des métaux lourds sur les paramètres biochimiques

### 2.6. 1. Effet des métaux lourds sur l'assimilation chlorophyllienne

L'extraction de chlorophylle est réalisée par broyage de 1g de matière fraîche de la feuille de chaque échantillon qui est additionnée de carbonate de calcium et d'acétone (20ml à 80%). La solution obtenue est filtrée à labri de lumière pour éviter l'oxydation de la chlorophylle. On procède ensuite en mesures spectrométriques (Jenway 6300) à deux longueurs d'onde (Y1= 645 nm et Y2= 663 nm)(Rao et le blanc, 1965).

### 2.6.2. Effet des métaux lourds sur le taux des sucres solubles totaux

Les sucres solubles totaux (saccharose, glucose, fructose, leurs dérivés méthyles et les polysaccharides) sont dosés par la méthode au phénol de Dubois *et al.* (1956). Elle consiste à prendre 100 mg de matière fraîche, placées dans des tubes à essais, on ajoute 3 ml d'éthanol à 80% pour faire l'extraction des sucres. On laisse à température ambiante pendant 48h à l'obscurité. Au moment du dosage les tubes sont placés dans l'étuve à 80°C pour faire évaporer l'alcool. Dans chaque tube on ajoute 20ml d'eau distillée à l'extrait. C'est la solution à analyser.

Dans des tubes à essais propres, on met 2ml de la solution à analyser, on ajoute 1ml de phénol à 5% (le phénol est dilué dans de l'eau distillée); on ajoute rapidement 5ml d'acide sulfurique concentré 96% tout en évitant de verser de l'acide contre les parois du tube. On obtient, une solution jaune orange à la surface, on passe au vortex pour homogénéiser la couleur de la solution. On laisse les tubes pendant 10mn et on les place au bain-marie pour 10 à 20mn à une température de 30°C (La couleur de la réaction est stable pendant plusieurs heures.). Les mesures d'absorbances sont effectuées à une longueur d'ondes de 485 nm.

### **2.6.3. Effet des métaux lourds sur le taux des Protéines totale**

La technique utilisée pour le dosage des totales est celle de Bradford (1976) qui utilise le BSA (le sérum d'albumine de bovin) comme standard. On prend 100mg d'échantillon on procède à leur broyage à l'aide d'un mortier et un peu d'eau distillée. Après on récupère dans des tubes à essai un peu d'eau de chaque prélèvement broyé (0,1mg) auquel on ajoute 5 gouttes d'eau distillée.

Dans des tubes à essai propre on Prélève 0.2ml de la solution précédente et 1.6ml d'eau distillée (a l'aide d'une micropipette) 5 minutes avant la lecture on ajoute 0,2ml du réactif de Bradford (100mg de BBC) bleu brillant de Coumassie (G 250) + 50ml d'éthanol a 95% qui a été agiter avant grâce un agitateur pendant 2 heures rajouter 100ml d'acide ortho phosphorique a85% et complète à l'eau distillée jusque 1litre.

Le dosage se fait au spectrophotomètre a la longueur d'onde 595nm après l'étalonnage de l'appareil par une solution témoin contenant 108ml d'eau distillée + 0.2ml du réactif de Bradford.

## **2.7. Effet du zinc et cuivre sur paramètres morphologiques du blé tendre Etudiés :**

### **2.7.1. Paramètres morphologiques :**

Après plus de 45 jours de croissance On a mesuré :

#### **2.7.1.1. La longueur de la tige (LT) et de racine (LR) :**

On prend chaque plante puis on a séparé les parties aériennes du sol, et les racines sont rincées sous un jet d'eau et essorées entre deux papiers filtres. La longueur de la racine principale et de la tige sont mesurée à l'aide d'un ruban à mesurer (cm).

#### **2.7.1.2. Poids frais et poids sec de parties aériennes et souterraines :**

Après avoir séparé les parties aériennes et souterraines nous les pesons immédiatement pour obtenir leur poids frais (tige PF) (racine PF) a été mesurée l'aide d'une balance de précision.

Les deux organes sont rapidement placés dans une feuille d'aluminium, et les organes végétaux servant à déterminer le poids frais des parties aériennes et souterraines, des différents cultivars, sont ensuite placés à l'étuve à 105 °C pendant 24 heures pour déterminer le poids sec (PS tige) et (PS racine).

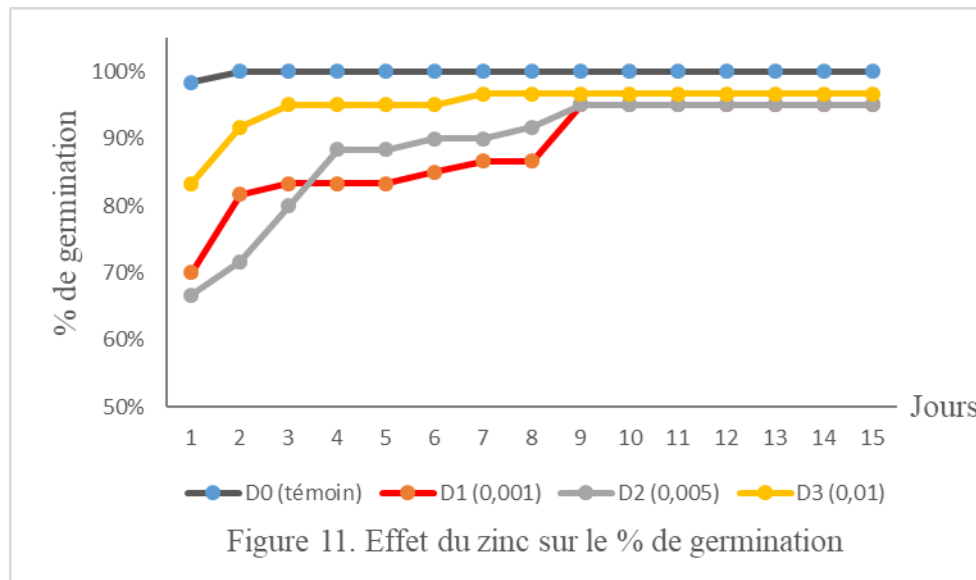
# CHAPITRE III

## RÉSULTATS

## ET DISCUSSION

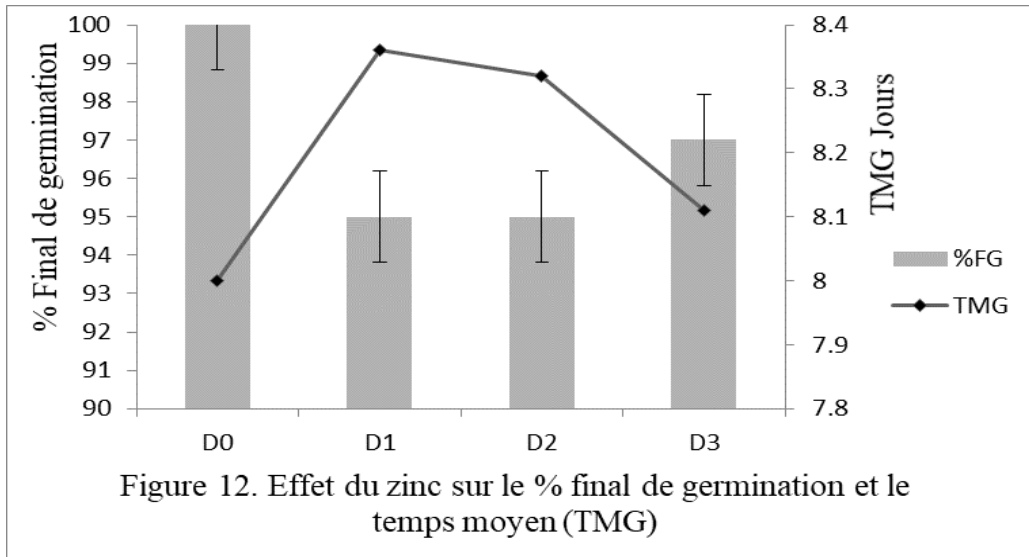
### 3.1. Effet des concentrations de zinc ( $Zn SO_4$ ) sur la germination des grains de *Triticum aestivum*

#### 3.1.1. Effet des concentrations de zinc ( $Zn SO_4$ ) sur le % de germination des grains de *Triticum aestivum*



D'après la figure 11. Les résultats montrent que le traitement témoin (0) présente la germination la plus rapide, atteignant 100 % dès le deuxième jour. Pour toutes les doses du zinc, les graines de blé ont atteint leurs maximums de germination au bout de 9 jours. Nous avons constaté que le zinc n'a pas affecté le pourcentage de germination puisque les taux dépassent 80% pour les différents concentrations étudiées 0.001, 0.005 et 0.01g/l.

#### 3.1.2. Effet des concentrations de zinc ( $ZnSO_4$ ) sur le % final et le temps moyen de germination (TGM) des graines de *Triticum Aestivum*



D0 (Témoin) D1 (0.001g/l) D2 (0.005g/l) ; D3 (0.01g/l)

Pour l'effet des concentrations du Zinc sur le pourcentage final de germination nous avons constaté que le temps moyen de germination observé est de 8.36 jour pour les grains traités avec une dose D1 de (0.001g/l) Tous de même les concentrations du zinc n'ont pas d'effet significatif sur le % finale de germination ou on enregistre des taux élevés de 95 à 100% de germination (Figure 12).

### 3.1.3. Effet du zinc sur Indice de vigueur des plantules

Tableau 4. Indice de vigueur des plantules (paramètre qui renseigne sur la qualité de la germination).

Traitements	Indice de vigueur des plantules
T0 (Témoin)	8
D1 (0.001)	6.34
D2 (0.005)	7.4
D3 (0.01)	10.45

Le tableau 4 montre une réduction dès la concentration de D1 (0.001g/l) et D2 (0.005g/l) de zinc. Cet effet est accentué davantage aux concentrations élevées de zinc pour atteindre IV=10.45 en présence de la concentration D3 (0.01g/l) (Tableau 4).

### 3.1.4. Effet des concentrations du Zinc sur la longueur des plantules, tiges et racines de *Triticum aestivum*

#### 3.1.4.1. Effet des concentrations du Zinc sur la longueur des plantules

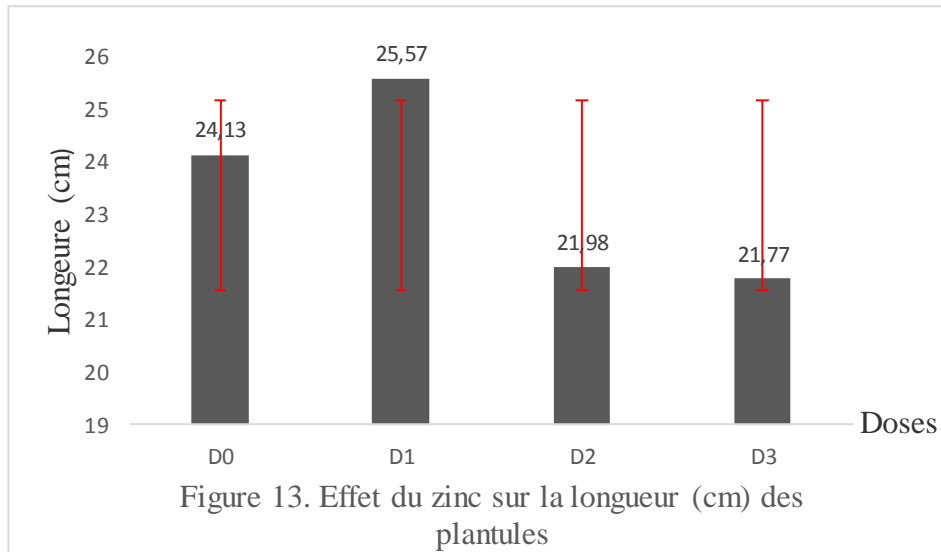


Figure 13. Effet du zinc sur la longueur (cm) des plantules

D0 (Témoin) D1 (0.001g/l) D2 (0.005g/l) ; D3 (0.01g/l)

D'après la figure 13. En remarque que les longueurs moyennes des plantules varient selon les traitements. Le témoin (0) enregistre une longueur moyenne de 24,13 cm la longueur de la plantule la plus élevée a été enregistrer chez le traitement 0.001 g/l avec 25.57 cm. Les traitements 0.005 et 0.01 montrent des longueurs moyennes (21.77 et 21.98 cm) moins que le témoin.

#### 3.1.4.2. Effet des concentrations du zinc sur la longueur des tiges

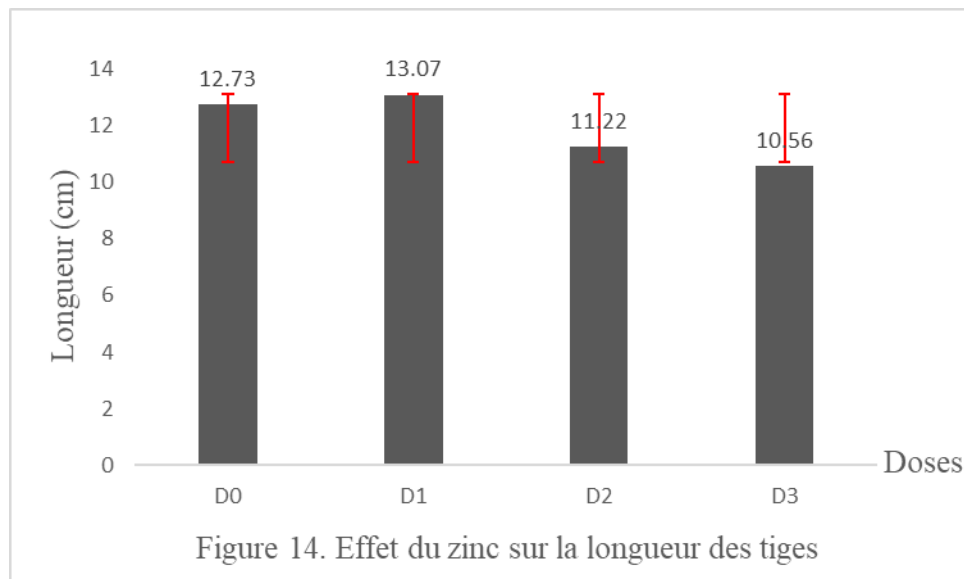
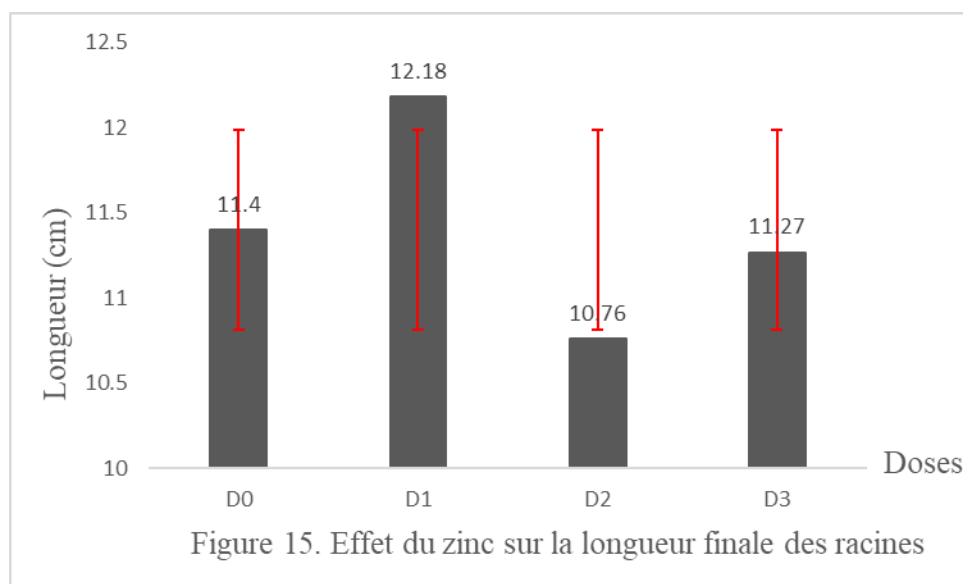


Figure 14. Effet du zinc sur la longueur des tiges

D0 (Témoin) D1 (0.001g/l) D2 (0.005g/l) ; D3 (0.01g/l)

La figure 14 montre une augmentation de la longueur des tiges à la dose de 0,001 g/l (13,07 cm) par rapport au témoin (12,73 cm), suivie d'une diminution progressive aux doses de 0,005 g/l (11,22 cm) et 0,01 g/l (10,56 cm).

### 3.1.4.3. Effet des concentrations du zinc sur la longueur des racines

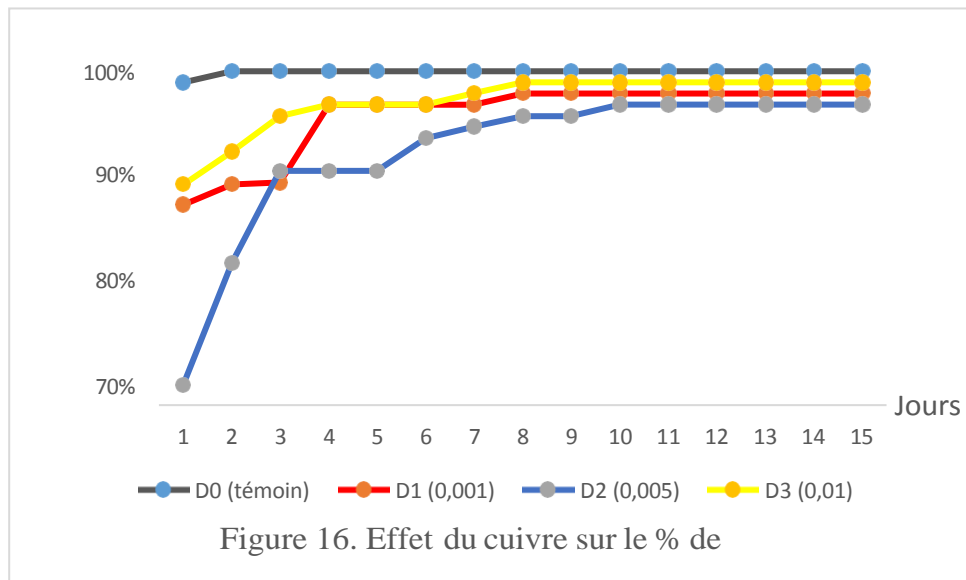


D0 (Témoin) D1 (0.001g/l) D2 (0.005g/l) ; D3 (0.01g/l)

La figure 15 montrent que sous effet de la dose D1 0.001g/l les résultats affichent une longueur de la tige la plus élevée 12.18 cm par rapport au témoin suivi pas la dose D3 0.01g/l avec une longueur de la tige de 11.27 cm, on remarque une augmentation de la longueur de la tige pour les doses utilisées D1, D3 sauf pour D2 qui affiche une longueur de 10.76 cm.

### 3.1.5. Effet des concentrations de cuivre (CuSO<sub>4</sub>) sur les grains de *Triticum aestivum*

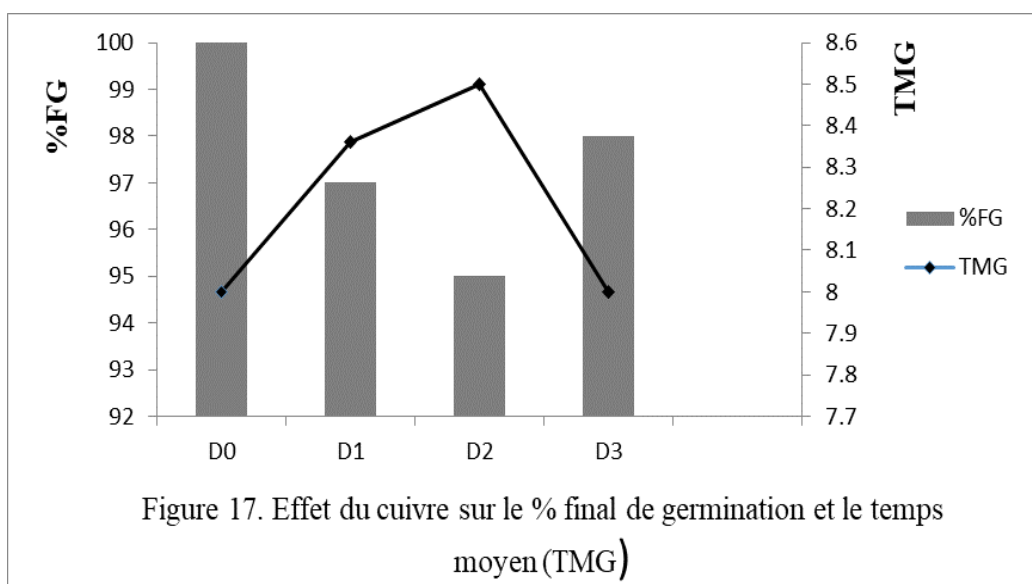
#### 3.1.5. 1.Effet des concentrations de cuivre sur le % de germination des grains de *Triticum aestivum*



Le témoin atteint 100 % de germination dès le deuxième jour, la germination s'étale sur dix jours avec des taux qui varient selon la concentration, sous l'effet de la concentration D2 (0.005g/l) on enregistre le premier jour seulement de 53%, le dixième jour le taux de germination atteint 95%.

Les résultats montrent que la concentration D3 (0.01g/l) affiche un taux de 98% proche du témoin le dixième jour.

### 3.1.5.2. Effet des concentrations de cuivre sur le % final et le temps moyen de germination (TMG) des graines de *Triticum aestivum*



D0 (Témoin) D1 (0.001g/l) D2 (0.005g/l) ; D3 (0.01g/l)

D'après la figure 17 on remarque une rapidité dans la germination et un taux finale de germination de 98% de germination quand la concentration en cuivre augmente a une dose de 0.01g/l. les doses du cuivre n'ont pas d'influence sur le % final de germination par contre le temps moyen de germination est affecté.

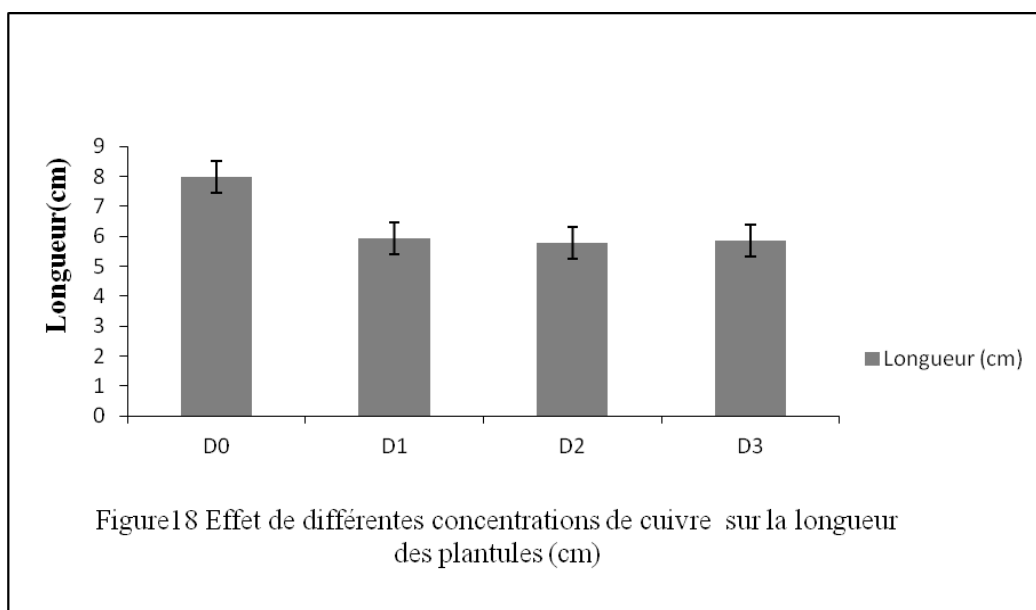
### 3.1.5.3. Effet du cuivre sur l'indice de vigueur des plantules

Tableau 5. Indice de vigueur des plantules

Traitements	Indice de vigueur des plantules
D0	8
D1	5.64
D2	4.91
D3	5.55

Le tableau 5 montre une réduction dès la concentration D2(0.005g/l) de cuivre Cet effet est accentué d'avantage aux concentrations élevées de cuivre pour atteindre IV=5.55 en présence de la concentration de 0.01 g/l. La concentration de 0.001 g/l présente un indice de vigueur le plus élevé (IV=5.64).

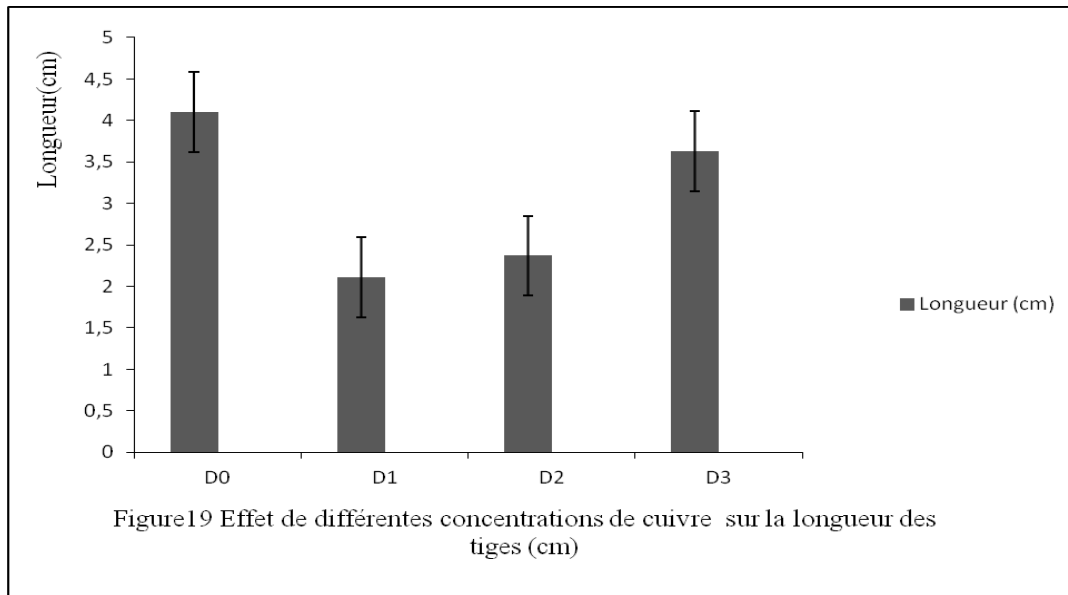
### 3.1.5.4. Effet des concentrations du cuivre (CuSo4) sur la longueur des plantules



D0 (Témoin) D1 (0.001g/l) D2 (0.005g/l) ; D3 (0.01g/l)

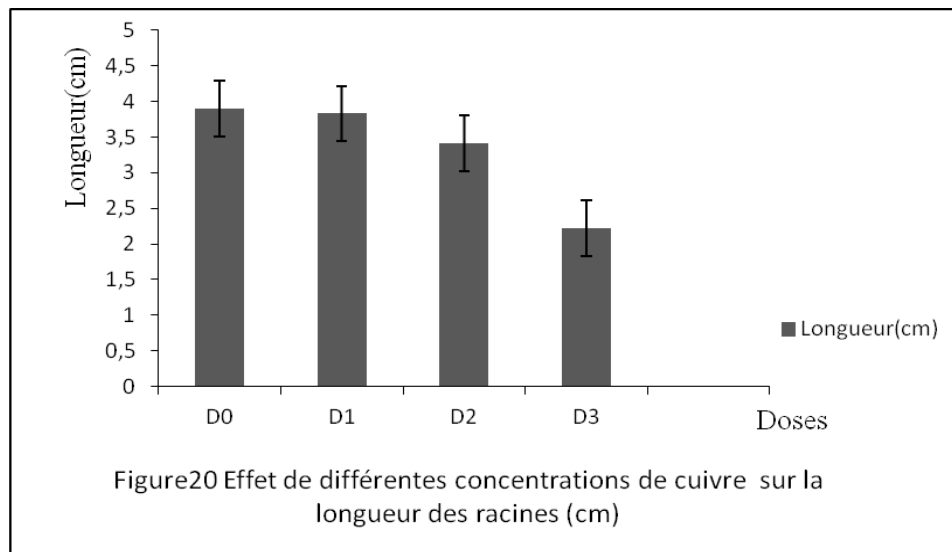
La longueur des plantules diminue fortement à la dose 0,001 g/l par rapport au témoin avec une longueur de 15,73 cm. Aux doses 0,005 et 0,01 g/l, la longueur augmente de manière marquée (22,66-22,73) par rapport à la dose 0,001 g/l et se rapproche de celle du témoin, avec une légère diminution entre 0,005 et 0,01g/l.

### 3.1.5.5. Effet des concentrations du cuivre sur la longueur des tiges



D0 : Témoin D1 :0,001g/l D2 :0.005g/l D3 :0,01g/l

La longueur moyenne des tiges diminue pour tous les traitements au cuivre de 3cm par rapport au témoin qui marque une longueur de 12.73 cm. La plus faible longueur est observée à la dose 0,005 g/l, suivie d'une légère augmentation à la dose 0,005 et 0.01 g/l, mais sans atteindre la valeur du témoin.

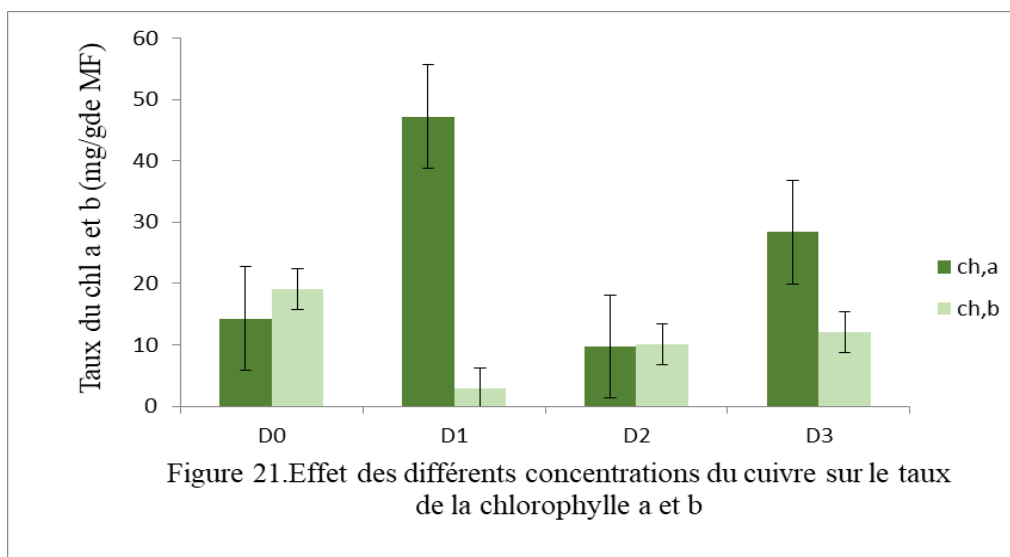


D0 : Témoin D1 :0,001g/l D2 :0.005g/l D3 :0,01g/l

La longueur des racines diminue fortement à la dose 0,001 g/l par rapport au témoin. Une augmentation est observée à la dose 0,005 g/l, suivie d'une légère diminution à la dose 0,01. La réponse des racines au cuivre montre une inhibition initiale, une reprise partielle à dose modérée, puis une nouvelle réduction à dose plus élevée.

### 3.2. Analyse biochimique du blé tendre sous effet du cuivre et du zinc

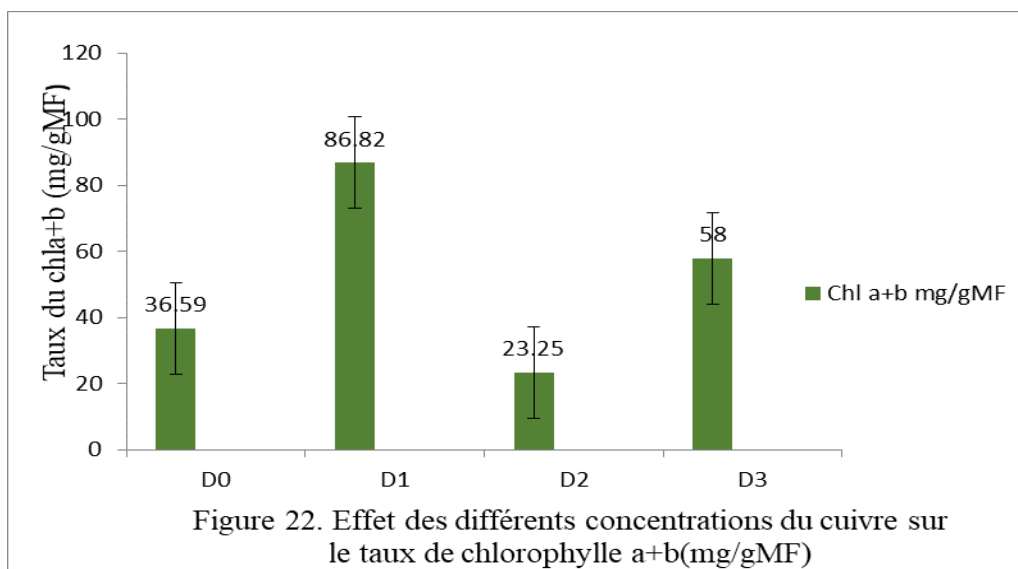
#### 3.2.1. Effet du cuivre sur l'assimilation chlorophyllienne (Chl a et b) chez la plante *Triticum astivum*



D0 : Témoin D1 :0,001g/l D2 :0.005g/l D3 :0,01g/l

Selon la figure 21 le taux le plus élevé en chlorophylle (a) est attribué la concentration D1 0.001g/l avec une valeur de 47.2 mg/g de MF. Une diminution de ces teneurs est notée pour les autres concentrations surtout la concentration D2 0.005 mg/g MF où on a enregistré la valeur minimale de 9.74 mg/g de MF. Néanmoins, Pour la chlorophylle (b) les valeurs enregistrées pour les concentrations D1 (0.001g/l) sont les plus faibles 2.82 mg/g de MF, les valeurs enregistrées pour les concentrations D2 et D3 sont assez voisines 10.04 et 12.09 mg/gde MF.

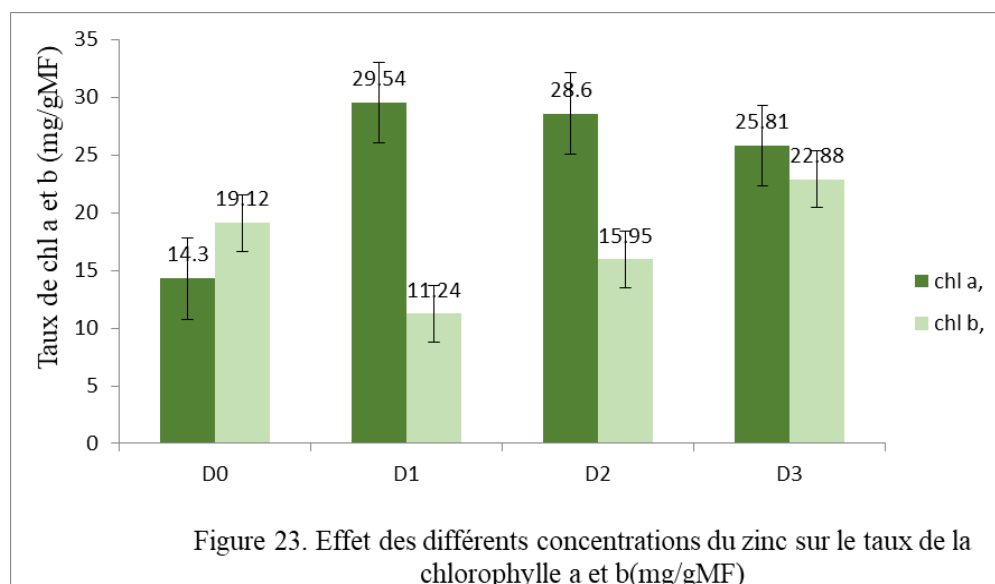
### 3.2.1. Effet du cuivre sur l'assimilation chlorophyllienne (Chl a + b)



D0 : Témoin D1 :0,001g/l D2 :0,005g/l D3 :0,01g/l

Les taux les plus élevés en chlorophylle sont observés pour D1 (0.001g/l) suivi par D3(0.01g/l) avec une valeur de 86.82 mg/g de MF (Figure 22). Une diminution de ces teneurs par rapport au témoin est constatée pour la concentration 0.005g/l où on a enregistré une valeur minimale de 23.25 mg/g de MF.

### 3.3. Effet du Zinc sur l'assimilation chlorophyllienne (Chl a et b)

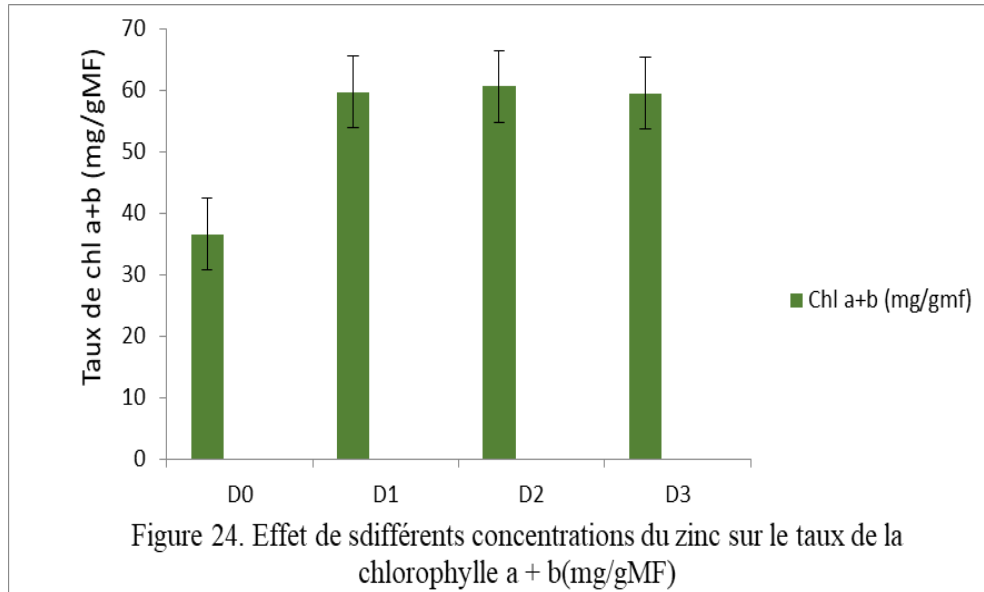


D0 :Témoin ; D1 :0,001g/l ; D2 :0,005g/l ; D3 :0,01g/l

Les taux les plus élevés en chlorophylle(a) sont observés pour les concentrations D1 (0.001g/l) et D2 (0.005g/l) avec une valeur de 29.54 et 28.6 mg/g de MF (Figure 23).

Une diminution de ces teneurs est constatée pour la concentration D3 (0.01g/l où on a enregistré une valeur minimale de 25.81 mg/g de MF. La teneur maximale de la chlorophylle (b) est enregistrée à la concentration D3 (0.01g/l) (22.88 mg/g de MF), alors que la minimale est celle de D1 (0.001g/l) (11.24 mg/g de MF).

### 3.3.1. Effet du Zinc sur l'assimilation chlorophyllienne (Chl a + b)



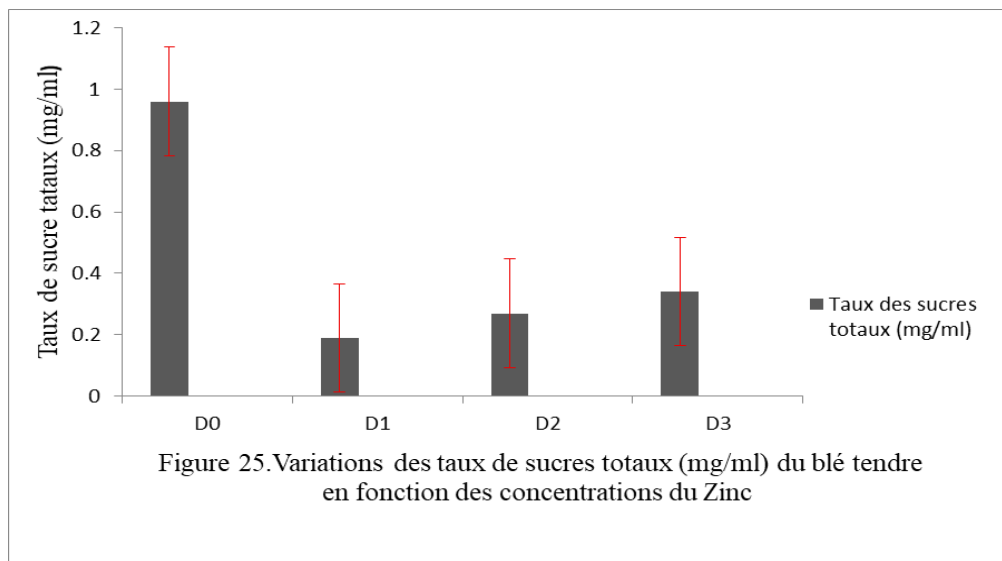
D0 : Témoin ; D1 :0,001g/l ; D2 :0,005g/l ; D3 :0,01g/l

La teneur moyenne la plus élevée de la chlorophylle (a+b) est enregistrée à la concentration D2(0.005g/l avec une valeurs de 60.62 mg/gde MF.

Les concentrations D1(0.001g/l) et D3(0.01g/l) présentent des taux de chlorophylles a+b voisines de 59.48 et 59.67 mg/gde MF, ces résultats dévoile une différence qui n'est pas significative entre la dose D1 et D3.

### 3.4. Effet des concentrations de zinc et de cuivre sur les sucres totaux et les protéines du blé tendre

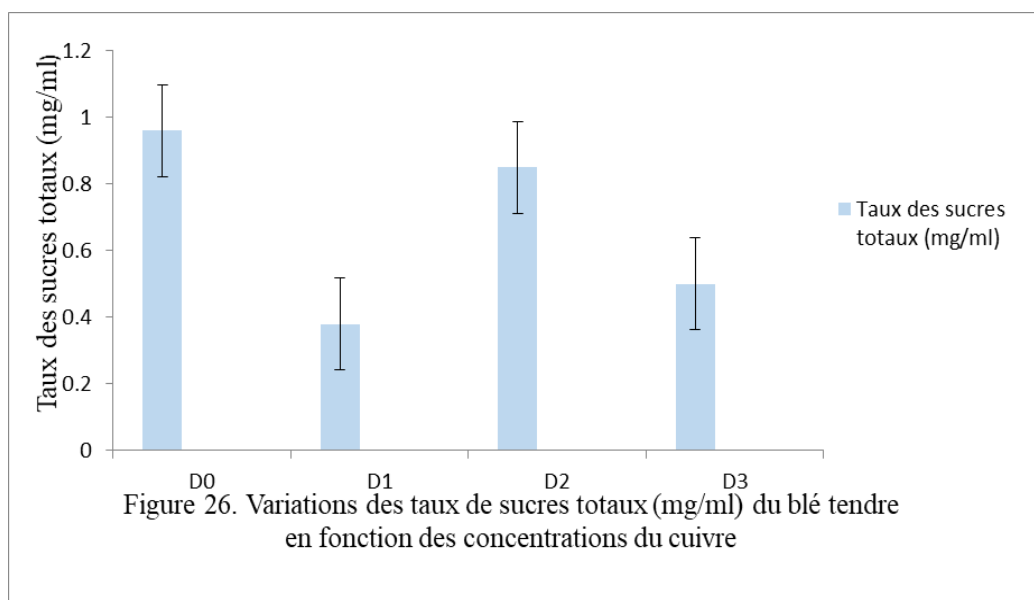
#### 3.4.1. Effet des concentrations de zinc (ZnSo4) sur les sucres totaux du blé tendre



D0 : Témoin ; D1 : 0,001g/l ; D2 : 0,005g/l ; D3 : 0,01g/l

L'effet du zinc sur les teneurs en sucres solubles est illustré dans la figure ci-dessus (Figure 25). On remarque que la dose D1 (0.001g/l) a un effet remarquable sur le taux des sucres solubles ou on enregistre un taux plus faible de 0.19 mg/ml. La dose D3 (0.01g/l) marque un taux de 0.34 mg/ml par rapport au témoin.

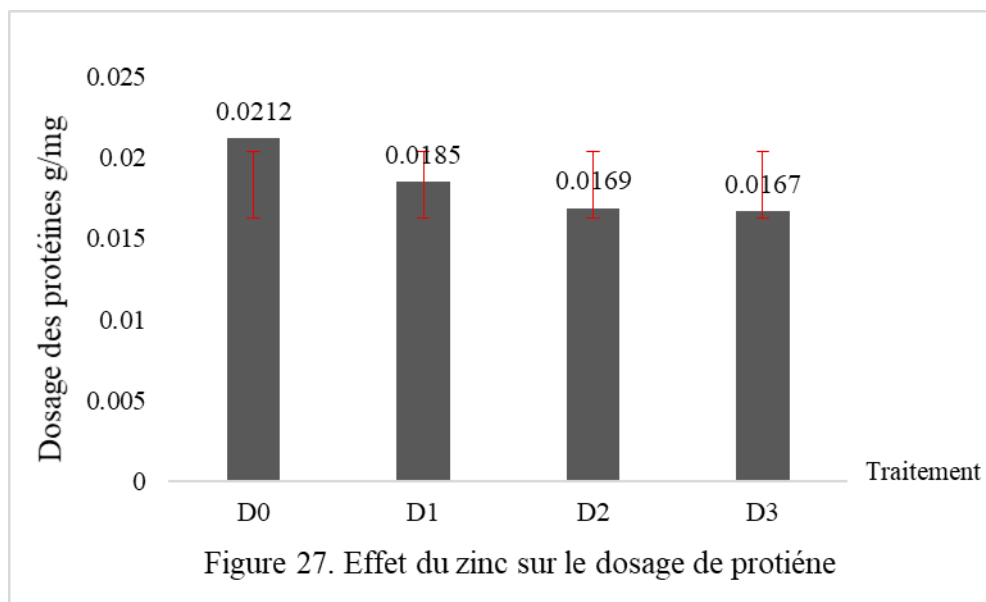
### 3.4.2. Effet des concentrations de cuivre ( $\text{CuSO}_4$ ) sur les sucres totaux du blé tendre



D0 : Témoin ; D1 : 0,001g/l ; D2 : 0,005g/l ; D3 : 0,01g/l

D'après la figure 26 on remarque que le taux des sucres totaux le plus élevé a été enregistré pour la dose D2 (0.005g/l) avec un taux de 0.85 mg/ml par rapport au témoin. La dose D1 (0.001g/l) a influencé le taux des sucres totaux avec un taux de 0.38mg/ml.

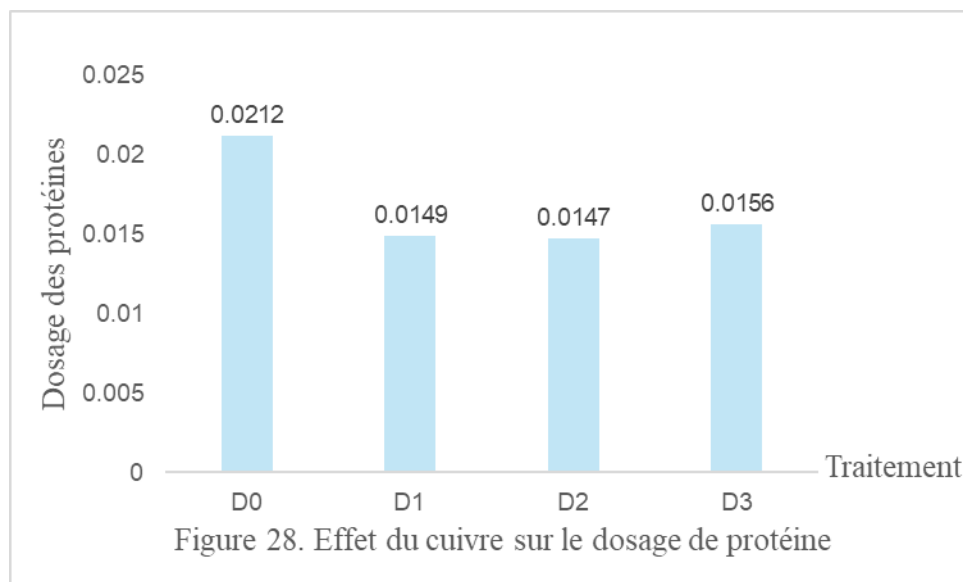
### 3.4.3. Effet des concentrations du zinc sur les protéines totales de *Triticum aestivum*



D0 : Témoin ; D1 :0,001g/l ; D2 :0,005g/l ; D3 :0,01g/l

D'après la figure27 on remarque que sous traitements D1 (0.001g/l) il y a une accumulation des protéines proche de celle du témoin 0.0221 avec un taux de 0.0185 les valeurs les plus faibles ont été obtenus en D2 et D3avec 0.0167et0.169 g/mg MF.

### 3.4.3. Effet des concentrations de cuivre sur les protéines totales de *Triticum aestivum*

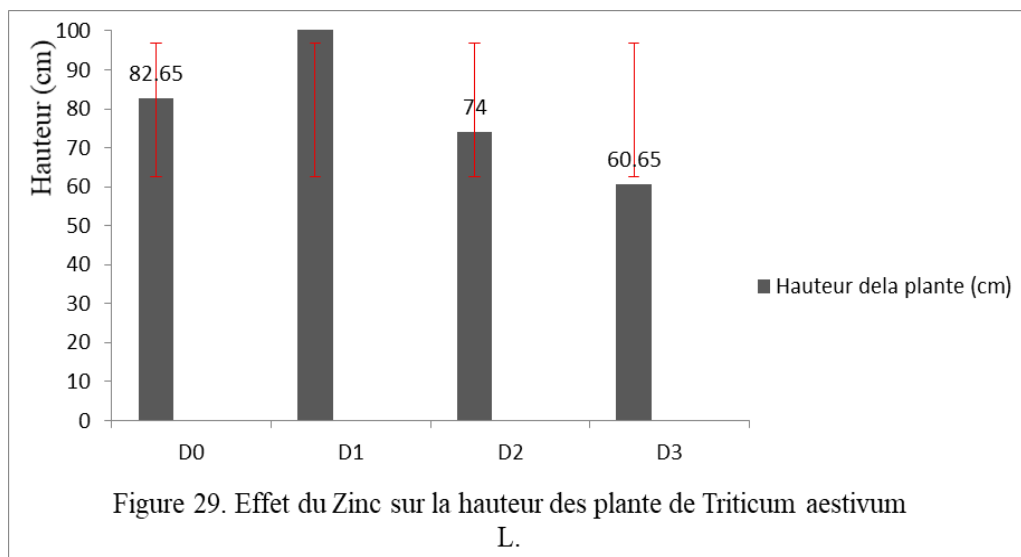


D0 : Témoin ; D1 :0,001g/l ; D2 :0,005g/l ; D3 :0,01g/l

Les teneurs en protéines, telles qu'elles apparaissent dans la figure 28, sont nettement moins élevée par rapport au témoins D0(0.0212g/mg MF). On remarque une nette diminution dans le taux des protéines avec l'augmentation des doses de cuivre, le traitement D2 (0.005g/l) semble provoquer une action inhibitrice sur le taux des protéines.

### 3.5. Evolution de la hauteur des plantes de *Triticum aestivum* L.

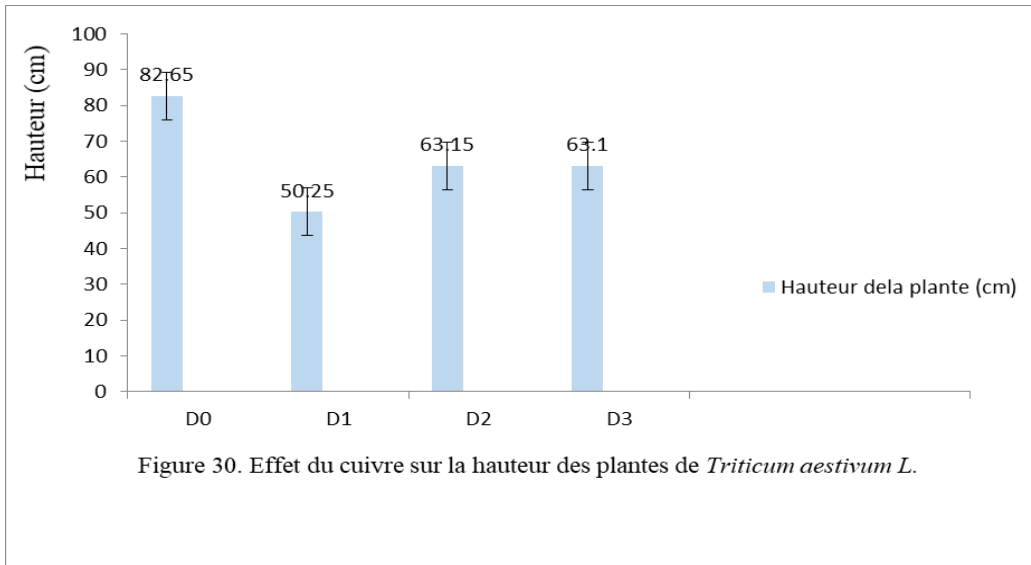
#### 3.5.1. Effet du Zinc sur la hauteur des plantes de *Triticum aestivum* L.



D0 (Témoin) ; D1 (0.001g/l) ; D2 (0.005g/l) ; D3(0.01g/l)

On peut distinguer d'après la figure 29 que le traitement, D3(0.01g/l) engendre une baisse de la hauteur des plantes soit une réduction comparativement au plantes non traité Témoin. Les plantes qui sont soumises à une dose D1 (0.001g/l) de zinc présentent les hauteurs les plus élevés avec 101.5 cm donc une stimulation de la croissance des plantes.

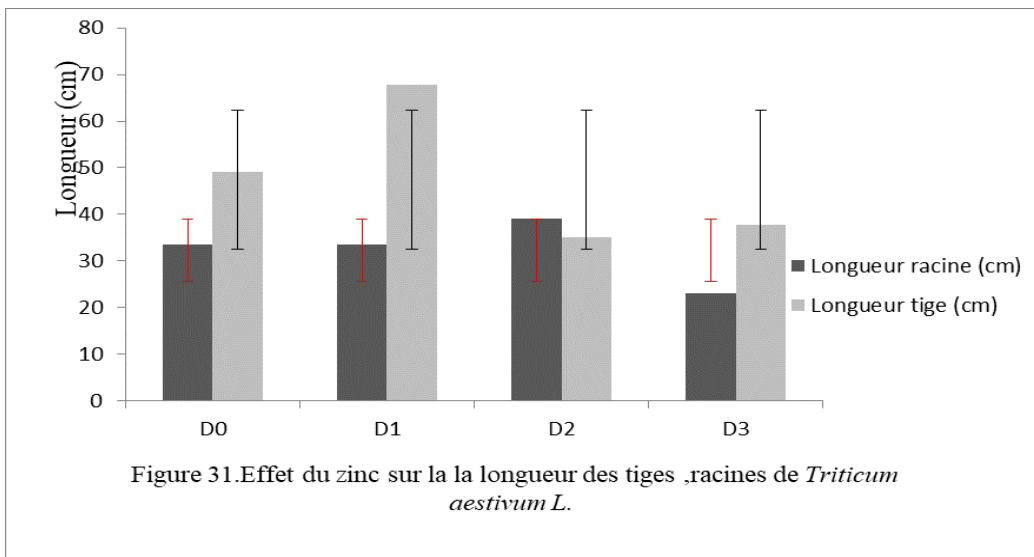
#### 3.5.2. Effet du cuivre sur la hauteur des plantes de *Triticum aestivum* L.



D0 (Témoin) D1 (0.001g/l) D2 (0.005g/l) D3(0.01g/l)

L'étude des résultats obtenus (figure 30) montre que la hauteur des plantes est influencée par la présence de cuivre (D1 0.001g/l). La hauteur des plantes est de 50.25cm par rapport au témoin (82.65cm), on remarque une croissance similaire entre les différentes doses cuivriques D2 et D3 avec 63.1 et 63.5 cm.

### 3.5.3. Effet du zinc sur la longueur des tiges et des racines de *Triticum aestivum L*

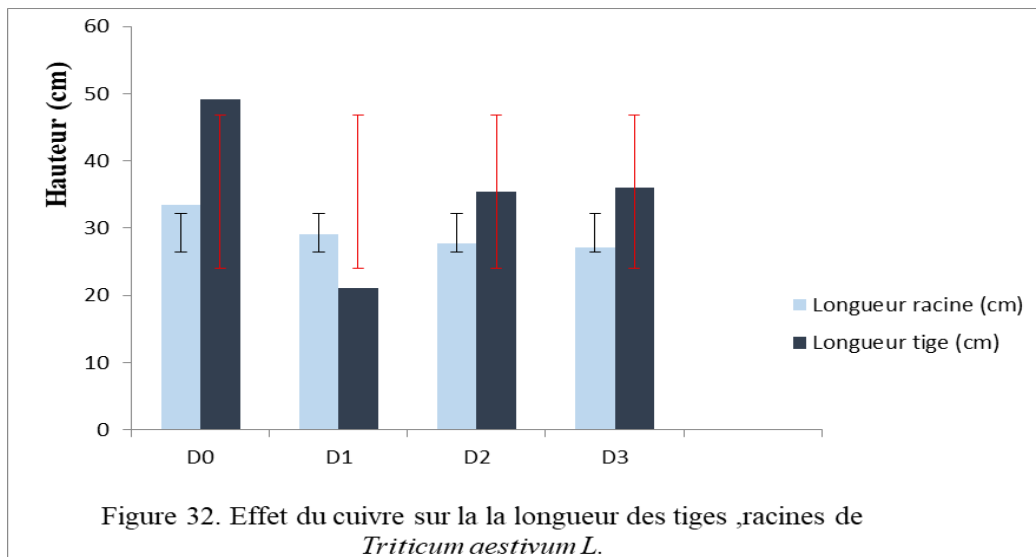


D0 (Témoin) D1 (0.001g/l) D2 (0.005g/l) D3 (0.01g/l)

La longueur des tiges est hautement affecté par la doses D2 (0.005g/l) avec une longueur de 35cm en revanche la dose D1 (0.001g/l) a stimulé nettement la longueur de la tige ou on enregistre une longueur de 67.9cm.

En général, la dose D2 (0.005g/l) a contribué à un meilleur développement en hauteur réalisant une longueur de la racine de 39cm par rapport au témoin 33cm, en revanche les plantes recevant une concentration de 0.01g/l, les racines apparaissent les plus basses avec 23cm cm de longueur.

### 3.5.4 Effet du cuivre sur la longueur des tiges et des racines de *Triticum aestivum L.*



D0 (Témoin) D1 (0.001g/l) D2 (0.005g/l) ; D3 (0.01g/l)

D'après la figure 32 On remarque que la croissance de la tige se caractérise par une croissance rapide dans les différents traitements notamment à 0.005 et 0.01g/l, en comparaison avec les plantes non traitées (Témoin), la longueur de la tige la plus élevé est 36cm sous effet de la concentration D3(0.001).

Pour la racine en général, les doses D2 (0.005g/l) de et D3 (0.01g/l) présente des résultats similaires de 27.1et 27.7 cm. Les plantes qui sont soumises à une dose de 0.001g/l de cuivre présentent longueurs des racines les plus élevés avec 29.15 cm.

### 3.6. Effet du zinc et cuivre sur la biomasse fraîche et sèche de la plante *Triticum aestivum L.*

#### 3.6.1. Effet du zinc sur la biomasse fraîche et sèche de la plante *Triticum aestivum L.*

Tableau 6. Le poids frais et sec de la Plante *Triticum aestivum L* en fonction de la dose de zinc appliquée.

Traitements	Biomasse fraîche (g)	Biomasse sèche (g)
D0 (Témoin)	4,75	0,587
D1 (0.001g/l)	4,863	0,6171
D2 (0.005g/l)	2,299	0,662
D3 (0.01g/l)	2,678	0,46

Les résultats montre que l'effet de l'application du zinc à une doses de D1(0.001g/l ) est très hautement significatif sur le poids frais de la plante(4.863g) par rapport au témoin(4.75g), nous remarquons aussi il existe une diminution du poids frais(2.299g) avec l'augmentation de la dose de zinc D2 de(0.005g/l) par rapport au témoin(4.75g).

Tous de même les résultats affiche une augmentation du taux de la matière sèche avec la dose D1 et D2 (0.6171 et 0.662g).

Une diminution du taux de matière sèche a été remarque pour une dose élevé en zinc de D3(0.001g/l) on enregistre seulement 0.46g (Tableau 6).

#### 3.6.2 Effet du cuivre sur la biomasse fraîche et sèche de la plante de *Triticum aestivum L.*

Tableau 7. Le poids frais et sec de la Plante *Triticum aestivum L* en fonction de la dose de cuivre appliquée

Traitements	Biomasse fraîche aérienne (g)	Biomasse sèche racinaire (g)
D0 (Témoin)	4,752	0,587
D1 (0.001g/l)	4,281	0,631
D2 (0.005g/l)	3,61	0,406
D3 (0.01g/l)	3,35	0,51

Les résultats rapportés sur le tableau 6 montrent qu'il existe une diminution du poids frais de la plante avec l'augmentation des doses de cuivre appliquée D2 et D3 avec un poids frais de 3.35 et 3.61g par rapport au témoin (4.752g).

La dose D1 (0.001g/l) affiche des résultats proches du témoin. En revanche, il faut noter que la dose D2 (0.005g/l) de cuivre provoque une baisse dans la production de la matière sèche ou on enregistre seulement 0.406g de matière sèche.

## Discussion

Notre étude sur l'influence du Zn et du Cu sur la germination du blé met en évidence des effets distincts en fonction de la concentration et du type d'élément. À faible concentration, le zinc favorise une germination plus régulière, tandis qu'à concentration plus élevée, le cuivre présente une meilleure performance.

Ces résultats sont cohérents avec les travaux de chercheurs tels qu'Abdul Rehman et *al.* (2015), qui ont observé que le zinc améliore la germination et la croissance des semis de blé, en particulier à des concentrations modérées. Cependant, des concentrations plus élevées de zinc peuvent entraîner une inhibition de la germination, comme l'ont noté Djelic (2015) et Gajalakshmi et *al.* (2019).

Concernant le cuivre, des études ont montré que des concentrations modérées peuvent stimuler la germination et la croissance des semis, tandis que des concentrations plus élevées peuvent avoir des effets inhibiteurs, comme l'ont observé Munzuroglu et Geckil (2002) et Ortega-Ortiz et *al.* (2020). Ces observations suggèrent que la concentration optimale de ces éléments est importante pour maximiser la germination et la croissance du blé. Ces effets n'ont pas affecté le % de la germination, mais ils affecté le temps moyen de germination, qui était lent pour certains concentrations qui sont généralement des concentrations élevé en cuivre et zinc, et qui était entre 7 et 9 jours, puis atteignait son pic de 95% pour le zinc (0.001-0.005 g/l) et 95%-97% pour le cuivre (0.001-0.005g/l), et ceci est proche du témoin (Figure 12 et 17).

En effet, certaines graines conservent un fort pouvoir germinatif, même lorsqu'elles sont exposées à des concentrations élevées de métaux lourds ce qui à été prouver par Ernest (1998), bien que la germination puisse être affectée par la présence de métaux lourds, elle demeure l'une des étapes les plus robustes du cycle de vie végétal. L'auteur avance que les téguments des graines jouent un rôle protecteur en limitant l'absorption de ces éléments toxiques.

En ce qui concerne les fonctions physiologiques et métaboliques, la réaction des plantes face aux métaux lourds dépendrait principalement des seuils de toxicité tissulaire. Ces propos s'opposent toutefois aux conclusions de Mihoub et *al.* (2005) sur le pois, ainsi que de Soughir (2009) concernant la fève.

Dans notre étude le cuivre à la concentration 0.005 g/l, stimule la croissance des plantules de blé, tandis que le zinc présente un effet optimal à une concentration plus faible 0.001 g/l, avec une diminution de la croissance à des concentrations plus élevées (Figure18). Ces observations sont en accord avec la littérature scientifique tel que Murad et *al.*, 2023 et Xiaoning Li et *al.*, 2012,

qui indique que les effets du cuivre et du zinc sur la croissance des plantes dépendent de la concentration et peuvent être bénéfiques ou nuisibles selon les doses appliquées.

De même le cuivre, à des concentrations faible 0.001 g/l et une concentration de 0.005 g/l, inhibe la croissance des tiges et des racines de blé tendre (figure 19), Nos observations rejoignent celles de Cuypers (2000), selon qui le cuivre s'accumule en priorité dans les racines, rendant ces dernières particulièrement vulnérables à ses effets toxiques, comme le confirment également Paschke et Redente (2002).

Cette atteinte racinaire entraîne une réduction de leur croissance, ce qui limite la zone d'absorption de la plante et, par conséquent, diminue sa capacité d'absorbance d'eau et de nutriments essentiels Brun *et al.*, (2003) ; Chen *et al.*, (2013). Tandis que le zinc présente un effet optimal à une concentration plus faible 0.001 g/l, avec une diminution de la croissance à des concentrations plus élevées. Au-delà d'un certain seuil ces éléments deviennent toxiques et inhibent la croissance racinaire (Figure 16).

La quantité de la chlorophylle des feuilles peut être influencée par beaucoup de facteurs tels que l'âge des feuilles, la position des feuilles, et les facteurs environnementaux tels que la lumière, la température et la disponibilité en eau (Hikosaka *et al.*, 2006)

La diminution de chlorophylle constitue un des événements primaires chez les plantes soumises au stress métallique et résulte de l'inhibition des enzymes responsables de la biosynthèse de chlorophylle (Stobart *et al.*, 1985 ; Mysliwa-Kurdziel et Strzalka, 2002).

Lorsque la plante subit un stress, le niveau de Chlorophylle diminue, affectant la coloration de la plante et ralentissant ses activités de croissance (Percival et Sheriffs, 2002)

Généralement la modification de la composition et des teneurs en pigments serait donc un caractère d'adaptation au milieu (Foyer *et al.*, 2002). Les métaux affectent les échanges gazeux au niveau des surfaces foliaires en contrôlant l'activité photosynthétique (Schultz E, Joutti A. 2007) ; (Vernay P *et al.*, 2009), celle-ci est souvent caractérisée par une diminution du taux de photosynthèse nette et de la conductance stomatique (He JY *et al.*, 2008).

L'altération des échanges gazeux au niveau des feuilles peut être due à la fermeture des stomates induite par la perturbation de l'état hydrique des plantes stressées par ces éléments (Shuur U *et al.*, 2006]. Par contre la chute des teneurs en chlorophylle est la conséquence de la réduction de l'ouverture des stomates visant à limiter les pertes en eau par évapotranspiration et par augmentation de la résistance à l'entrée du CO<sub>2</sub> atmosphérique nécessaire à la photosynthèse (Bousba *et al.*, 2009).

On note une réduction de l'assimilation chlorophyllienne (Chla) exprimée par la diminution de taux de chlorophylle suivant l'augmentation de la concentration du cuivre

Ces résultats ont été obtenus avec la concentration D2 (0.005 mg/g MF) où on a enregistré la valeur minimale de 9.74 mg/g de MF. Néanmoins, Pour la chlorophylle (b) la teneur la plus faible ( 2.82mg/g de MF) (Figure 22).

Une diminution de la teneur de la chlorophylle (a+b) par rapport au témoin est constatée pour la concentration D2 0.005g/l où on a enregistré une valeur minimale de 23.25 mg/g de MF ( Figure 23).

L'effet du cuivre, un métal lourd, sur le taux de chlorophylle chez les plantes est généralement négatif. Une exposition excessive au cuivre peut entraîner une baisse de la concentration de chlorophylle, ce qui a un impact sur la photosynthèse et la croissance de la plante

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*

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).

L'accumulation excessive de Cu dans les tissus végétaux peut perturber la structure du chloroplaste et provoque des altérations des constituants de la membrane de thylakoïde (Rehman *et al*, 2019).

Pour l'effet des concentrations du zinc sur le taux de la chlorophylle a, les résultats montrent qu'une diminution de la chlorophylles a est constatée pour la concentration D3 (0.01g/l où on a enregistré une valeur minimale de 25.81 mg/g de MF (Figure 24)

Pour la chlorophylle b les résultats obtenu montrent une teneur minimale est enregistré a une dose de D1 (0.001g/l) avec 11.24 mg/g de MF .Le taux de la chlorophylle a+b marque une augmentation a une concentration D2 (0.005g/l) avec une valeur de 60.62 mg/gde MF.

L'augmentation des teneurs en chlorophylle totale est la conséquence de la réduction de la taille des cellules foliaires (stomates réduire) sous l'effet d'un stress hydrique qui engendre une plus grande concentration (Siakhene, 1984). La quantité de la chlorophylle des feuilles peut être influencée par beaucoup de facteurs tels que l'âge des feuilles, la position des feuilles, et les facteurs environnementaux tels que la lumière, la température et la disponibilité en eau (Hikosaka *et al*, 2006).

Les sucres solubles sont synthétisés en réponse au stress osmotique, agissant comme des osmoprotecteurs qui stabilisent les membranes cellulaires et maintiennent la turgescence (Peshev et Ende, 2013). Dans des conditions de stress léger qui inhibent la croissance des plantes mais

permettent toujours la photosynthèse (partielle), une accumulation de disaccharides, de RFO et de fructanes est couramment observée (Keunen *et al*, 2013).

Les résultats obtenus sur l'effet du zinc sur les teneurs en sucres solubles montre un effet inhibiteur sur la quantité es sucres solubles, on remarque que la dose D1 (0.001g/l) a un effet remarquable sur le taux des sucres solubles ou on enregistre un taux plus faible de 0.19 mg/ml. La dose D3 (0.01g/l) marque un taux de 0.34 mg/ml par rapport au témoin.

La dose D1 (0.001g/l) a influencé le taux des sucres totaux avec un taux d e 0.38mg/ml (Figure 25).

Alaoui-Sossé *et al*. (2004) ont montré que l'exposition du concombre au cuivre conduit à l'accumulation des sucres solubles dans les feuilles, l'inhibition de la croissance diminue l'exportation des glucides des feuilles, ce qui entraîne une accumulation d'amidon et de saccharose et une inhibition en retour de la photosynthèse (Vinit-Dunand *et al*, 2002).

Certaines études ont détectées une diminution de la teneur en sucres solubles sous l'effet de stress de cuivre (Kumar *et al*. 2012 ; Singh *et al*, 2007), contrairement, d'autres études(Duraipandian *et al*. 2016 ; Ashraf *et al*, 2017) ont signalé une augmentation des sucres solubles en fonction de l'intensité du stress au cuivre appliqué.

Ces résultats concordent avec nos résultats ou on remarque que le taux des sucres totaux le plus élevé a été enregistré pour la dose D2 (0.005g/l) avec un taux de 0.85 mg/ml par rapport au témoin (Figure 26).

Les cellules végétales accumulent activement certains solutés solubles, tels que les sucres solubles, ce qui vise à réduire le potentiel osmotique intracellulaire pour assurer l'approvisionnement normal en eau dans des conditions de stress aux métaux lourds et maintenir les fonctions physiologiques normales des cellules (Jia *et al*, 2012).

L'amélioration de l'efficacité de croissance des organes végétale pourrait également être due aux effets bénéfiques des traitements du zinc sur les activités physiologiques et autres réactions enzymatiques dans la transformation des carbohydrates et des activités de hexokinase de la plante qui sont responsables de la stimulation de la croissance de la plante et ses organes composants influençant finalement le développement relative des différentes parties de la plante et leur efficacité de croissance (Vijayarengan et Mahalakshmi, 2013).

Dans cette étude, l'attention a également été portée aussi sur le taux de protéines totales. Ce dernier varie en fonction des concentrations des métaux lourds (ZnSo<sub>4</sub>, CuSo<sub>4</sub>) où on constate Une baisse graduelle de ce taux avec l'augmentation des concentrations de zinc (0.001 g/l 0.005 g/l et 0.01 g/l) (figure 27).

Ces résultats concorde avec les travaux de (1997) qui montre que la quantité de protéine est non affectée dans les parties stimulées par le Zn chez *phanseolus vuglaris*, d'autre reportent celle de Lamhamdi. Met *al*, (2011) montrent qu'il y a une stimulation de la production des protéines avec une régression de l'activité  $\alpha$ -amylasique. L'augmentation de la teneur en

protéines peut être expliquée en partie par une induction vrai semblable à la synthèse de protéines de stress.

À l'inverse, la baisse observée du taux de protéines dans notre étude pourrait traduire une perturbation du métabolisme de base. Étant donné que toute forme de stress est généralement associée à une production accrue de radicaux libres dans l'organisme (Aurousseau 2002), une détérioration des structures cellulaires peut survenir lorsque ces déséquilibres atteignent une intensité excessive.

Les modifications sur les acides aminés ne s'arrêtent pas que sur la simple oxydation elles peuvent être aller jusqu'à la fragmentation des chaînes peptidiques d'où la diminution de leur taux de protéine (Moller *et al*, 2007; Nizer, 2014).

L'application de zinc et du cuivre peut avoir des effets positifs sur la matière sèche et la qualité du blé tendre, néanmoins l'absorption de ces éléments à des doses élevées peut nuire à la croissance des plantes en générale.

D'après les résultats obtenus on peut distinguer que le traitement D3 (0.01g/l) engendre une baisse de la hauteur des plantes, soit une réduction comparativement au plantes non traité Témoin Les plantes qui sont soumis à une dose D1 (0.001g/l) de zinc présentent les hauteurs les plus élevés avec 101.5 cm donc une stimulation de la croissance des plantes.

L'étude des résultats obtenus (figure 30) montre que la hauteur des plantes est influencée par la présence de cuivre (D1 0.001g/l) la hauteur des plante est de 50.25cm par rapport au témoin (82.65cm), on remarque une croissance similaire entre les différents doses cuivrique D2 et D3 avec 63.1 et 63.5 cm.

Dans notre travail, nous avons constaté que le zinc et le cuivre affectent négativement la croissance des plants de blé tendre.

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

Cependant, le cuivre à des niveaux élevés devient fortement phytotoxique pour les cellules et cause l'inhibition de la croissance (Mocquot *et al*. 1996; Weckx et Clijsters, 1996).

D'après Kaplan, (2010), la hauteur des plantes et la biomasse sèche des feuilles, tige et racines des plantes de tomate ont été affectés significativement par l'application de Cu au sol qui a causé un décroissement.

D'après nos résultats les concentrations élevés en zinc diminue la matière fraîche ainsi qu'une diminution intense en matière sèche, on a enregistré a une concentration D3 (0.01) un poids frais de 0.46 g.

L'effet du cuivre est plus inhibiteur sur le taux de matière fraîche a une concentration de D3 (0.01g/l)on obtient seulement un taux de 3.35g par contre le taux de matière sèche a diminué (0.406g)avec des concentrations élevé en cuivre D2 (0.005g/l) (Tableau 7).

Nos résultats vont dans le même sens que Lee *et al.* (2013) qui ont testé des concentrations croissantes des NPs de ZnO sur le sarrasin (*Fagopyrum esculentum*) et ont révélé une perturbation de plusieurs paramètres dont une diminution de la biomasse fraîche et sèche.

Des études similaires montrent que les ZnO-NPs réduisent la biomasse des plants du ray-grass, rétrécissait ainsi l'épiderme des cellules foliaires (Lin et Xing, 2008).

Les résultats de Trujillo- Reyes *et al.* (2014) montrent aussi une réduction de la biomasse chez les plants de *Lactuca sativa* exposées aux NPs d'oxyde de Fer.

Les travaux de Rao et Shekhawat (2014) ; Sheteiwy *et al.* (2015) révèlent que des nanoparticules de ZnO diminuent le poids frais et sec des plantules de *Brassica juncea* et d'*Oryza sativa*.

## Conclusion

L'approche en termes de tolérance différentielle de l'espèce *Triticum aestivum L* exposées à la toxicité du zinc et du cuivre est prometteuse pour l'enrichissement de notre compréhension de la tolérance des plantes aux métaux lourds. Les connaissances de la physiologie et la biochimie face à la phytotoxicité, à l'absorption de ces métaux lourds zinc et le cuivre, ainsi que la tolérance et sa caractérisation sont aussi discutées dans ce travail.

Les résultats obtenus dans le cadre de la présente étude ont révélé les principaux effets du cuivre et du zinc sur le comportement physiologique du blé tendre. Les différents paramètres testés sur *Triticum aestivum L* ont permis de montrer que les deux éléments laissent des effets bénéfiques, au-dessous de certains seuils, aussi bien à l'échelle physiologiques que biochimiques.

De ce fait, l'objectif de la première étape est de montrer la réponse physiologique de l'espèce soumises à des concentrations croissantes du de zinc et cuivre de ce fait on peut dire que le zinc et le cuivre influe sur la vitesse de germination avec un retard nettement dans la germination des grains traités pat le cuivre .

L'effet du stress métallique sur les jeunes plantules les résultats nous indique que les plantules supportent bien le zinc par contre des concentrations élève en cuivre perturbe leurs la croissance. L'étude de l'effet des métaux lourds (cuivre et zinc) sur certains paramètres morphologiques montre clairement un effet inhibiteur de la croissance de la plante. L'élongation des racines semble être très sensible vis-à-vis des doses élevées du cuivre et du zinc. Néanmoins, quelques différences entre le comportement de la variété ont été observées en ce qui concerne l'effet du zinc et le cuivre sur la croissance de la plante. A l'issu de cette analyse, on a constaté une perturbation du processus photosynthétique, la réduction de l'assimilation chlorophylliennes a des concentrations élevé du zinc et du cuivre, ainsi pour les teneurs en sucres et en protéines dans la plante stressée. Une réduction importante de la biomasse végétative de l'espèce étudiée suivant l'augmentation du zinc du cuivre dans le milieu est enregistrée.

Ce travail qui reste au début du chemin dans nos recherches et il reste beaucoup de travail à réaliser afin de mieux comprendre ce phénomène. Cette étude pourrait être approfondie par l'étude de l'accumulation du zinc et du cuivre dans des stades avancés de la culture, les différents facteurs qui influent cette accumulation, l'effet du zinc et du cuivre sur la nutrition minérale et l'approche génétique visé à préciser le déterminisme, simple ou complexe, des caractères contrôlant l'accumulation de ces deux métaux chez le blé tendre.

En perspective, il serait intéressant d'étudier l'effet du zinc et du cuivre lorsqu'ils sont combinés, et d'évaluer leur effet à long terme et pourquoi pas jusqu'à le rendement des graines et la qualité nutritionnelle du blé tendre.

## Références Bibliographiques

**A.Yu. Muratova , E.V. Lyubun, S.N. Golubev, O.V. Turkovskaya (2022).** Effect of copper ions on the associations of *Azospirillum bacteria* with wheat seedlings (*Triticum aestivum* L.)

**Abdul Rehman, Abdul & Farooq, Muhammad & Ahmad, Riaz & Basra, Shahzad. (2015).** Seed Priming with Zinc Improves the Germination and Early Seedling Growth of Wheat. Seed Science and Technology.

**Abdul Rehman, Abdul & Farooq, Muhammad & Ahmad, Riaz & Basra, Shahzad. (2015).** Seed Priming with Zinc Improves the Germination and Early Seedling Growth of Wheat. Seed Science and Technology.

**Adriano, D.C (2001)** Trace Elements in Terrestrial Environments: Biogeochemistry, Bioavailability and Risks of Metals.

**Alaoui-Sossé, B., Genet P., Vinit-Dunand F., Toussaint M.L., Epron D., Badot, P.M. (2004).** Effet du cuivre sur la croissance des plants de concombre et ses relations avec l'accumulation de glucides et les changements dans les teneurs en ions. *Plant Science*, 166 : 1213–1218.

**Arduini I., Godbold D.L. et Onnis A., 1994.** Cadmium and copper change root growth and morphology of *Pinus pinea* and *Pinus pinaster* seedlings. *Physiol. Plant*, 92: 675-680.

**Ashraf, U., Kanu, A.S., Deng, Q., Mo, Z., Pan, S., Tian, H., Tang, X. (2017).** Toxicité du plomb (Pb) : mécanismes physio-biochimiques, rendement en grains, qualité et proportions de distribution du Pb dans le riz parfumé. *Frontiers in Plant Science*, 8 : 259.

**Aydinalp, C. and Marinova, S. (2009)** The Effects of Heavy Metals on Seed Germination and Plant Growth on Alfalfa Plant (*Medicago sativa*). *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 15, 347-350

**Baker D.E. et Senft J.P., 1995.** Copper. Heavy metals in soils. Ed. Alloway, 2nd Edition, Blackie academic and professional, 368

**Baker D.E. et Senft J.P., 1995.** Copper. Heavy metals in soils. Ed. Alloway, 2nd Edition, Blackie academic and professional, 368.

**Bansal, P. (2002)** The Corporate Challenges of Sustainable Development. *Academy of Management Executive*, 16, 122-131.

**Bourrelier, P.H. and Berthelin, J. (1998)** Contamination des sols par les éléments traces: Les risques et leur gestion.

**Bousba, R., Ykhlef, N., Djekoun, A. (2009).** Efficacité d'utilisation de l'eau et photosynthèse du limbe foliaire en réponse au déficit hydrique chez le blé dur (*Triticum durum* Desf). *World Journal of Agricultural Sciences*, 5(5) : 609-616.

**Bravin M., 2008.** Processus rhizosphériques déterminant la biodisponibilité du cuivre pour le blé dur cultivé en sols à antécédent viticole. Thèse de doctorat du Centre International d'Etudes Supérieures en Sciences Agronomiques, Montpellier Sup Agro, 203 p.

**Brun C., Guénoche A. et Jacq B., 2003.** Approach of the functional evolution of duplicated genes in *Saccharomyces cerevisiae* using a new classification method based on protein-protein interaction data. *J Struct Func Genom.* 3: 213

**Brun L.A., Maillet J., Hinsinger P. et Pepin M., 2001.** Evaluation of copper availability to plants in copper-contaminated vineyard soils. *Environmental Pollution.* 111: 293-302.

**Brun L.A., Maillet J., Richarte J., Herrmann P. et Remy J.C., 1998.** Relationships between extractable copper, soil properties and copper uptake by wild plants in vineyard soils. *Environmental Pollution.* 102 : 151-161.

**Caspi V., Droppa M., Horváth G., Malkin S., Marder J.B., Raskin V.I. (1999).** Effet du cuivre sur l'organisation de la chlorophylle durant la verdisation des feuilles d'orge. *Photosynthesis Research*, 62(2), 165-174.

**Chevrie-Muller, Claude & Maillart, Christelle & Simon, Am & Fournier, S.. (2010).**

Chevrie-Muller, Claude & Maillart, Christelle & Simon, Am & Fournier, S.. (2010). Langage oral, Langage écrit, Mémoire, Attention - 2ème édition (L2MA-2).

**Deneux-Mustin S., Roussel-Debet S., Mustin C., Henner P., Munier-Lamy C., Colle C., Berthelin J., Garnier-Laplace J. et Leyval C., 2003.** Mobilité et transfert racinaire des éléments en traces: influence des microorganismes du sol. *Technétium In: Tec&Doc.* Lavoisier, Paris, 233-240.

**Duraipandian, M., Sevugaperumal R., Ramasubramanian V., Ganesh D. (2016).** Atténuation des effets du chlorure de cuivre sur *Vigna unguiculata* (L.) à l'aide de *Ulva lactuca*. *Biochemistry & Physiology*, 5 : 213. <https://doi.org/10.4172/2168-9652.1000213>.

**Gill, Richard & Burke, Ingrid. (2002).** Influence of soil depth on the decomposition of *Bouteloua gracilis* roots in the shortgrass steppe. *Plant and Soil.* 241. 233-242. 10.1023/A:1016146805542.

**Hanane, Hamad & Reguieg Yssaad, Houcine & Abdelhakim, Houcine & Tayeb, Nouri & Ferrah, Nacer & Benaichata, Lazreg & Aicha, Benaoum & Neggaz, Nour Elhouda. (2019).** EFFECT OF LEAD ON THE GERMINATION OF *MORINGA OLEIFERA* L. SEEDS. *Plant Archives.* 19. 1597-1602.

**He J.Y., Ren Y.F., Zhu C., Yan Y.P., Jiang D.A. (2008).** Effet du cadmium sur la croissance, les échanges gazeux photosynthétiques et la fluorescence chlorophyllienne chez le riz sauvage et une variété sensible au Cd. *Photosynthetica*, 46 : 466-470. <https://doi.org/10.1007/s11099-008-0080-2>.

**Hikosaka K., Ishikawa K., Borjigidai A., Muller O., Onoda Y. (2006).**

Acclimatation de la photosynthèse à la température : mécanismes impliqués dans la modification de la dépendance à la température du taux photosynthétique. *Journal of Experimental Botany*, 57(2), 291–302.

**Hireche Y. (2006).**

Réponse de la luzerne (*Medicago sativa* L.) au stress hydrique et à la profondeur de semis. Thèse de magistère, Université El Hadj Lakhdar, Batna.

**Jia D., Yang J.L., Li C.H. (2012).**

Avancées dans les études sur les métallothionéines chez les arbres forestiers. *Plant Omics*, 5 : 46-51.

**Juste (1998)** Appréciation de la mobilité et de la biodisponibilité des éléments en traces du sol.

**Kabata-Pendias, A. and Pendias, H. (2001)** - Trace Elements in Soils and Plants. 3rd Edition, CRC Press, Boca Raton, 403 p.

**Kaplan, M., Sonmez, S., Sonmez, N.K., et Kaya, H. (2010).**

Influence des applications de cuivre et de soufre sur la croissance et la teneur en nutriments des plants de tomate. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, vol. 8 (3&4) : 728–732.

**Keunen E., Peshev D., Vangronsveld J., Van den Ende W., Cuypers A. (2013).**

Les sucres végétaux jouent un rôle crucial face au stress oxydatif lors du stress abiotique : extension du concept traditionnel. *Plant, Cell and Environment*, 36: 1242-1255.  
<https://doi.org/10.1111/pce.1206>.

**Kopittke P.M., Asher C.J., Blamey F.P.C. et Menzies N.W., 2007a.** Toxic effects of Pb<sup>2+</sup> on the growth and mineral nutrition of signal grass (*Brachiaria decumbens*) and Rhodes grass (*Chloris gayana*). *Plant Soil*, 300: 127-136.

**Kopittke P.M., Asher C.J., Kopittke R.A. et Menzies N.W., (2007b)** - Toxic effects of Pb<sup>2+</sup> on growth of cowpea (*Vigna unguiculata*). *Environ. Pollut.*, 150 : 280-287.

**Kranner, I. and Colville, L. (2011)** -Metals and seeds: Biochemical and molecular implications and their significance for seed germination. *Environmental and Experimental Botany*, 72, 93-105.  
doi:10.1016/j.envexpbot.2010.05.005

**Kumar V., Pandita S., Preet G., Sidhu S., Sharma A., Khanna K., Kaur P., Bali A.S., Setia R. (2021).**

Biodisponibilité, absorption, toxicité et tolérance du cuivre chez les plantes : une revue complète. *Chemosphere*, 262 : 127810.

**Kumar, Dr. Arvind & Denre, Manas & Prasad, Ruplal. (2018)-** Agronomic Biofortification of Zinc in Wheat (*Triticum Aestivum* L.). *Current Science*. 115. 944-948.  
10.18520/cs/v115/i5/944-948.

**Levitt, J. (1980)** - Responses of Plant to Environmental Stress: Water, Radiation, Salt and Other Stresses. Academic Press, New York, 365.

**Lin, D., et Xing, B. (2008).**-Absorption racinaire et phytotoxicité des nanoparticules de ZnO. *Environmental Science and Technology*, 42 : 5580–5585.

**Markovic, Marija & Ilić, Budimir & Miladinovic, Dragoljub & Stamenkovic, Slavisa & Trajković, Radmila & Stankov-Jovanovic, Vesna & Djelic, Gorica. (2015).** Activity of a catalase enzyme in plants from the burned areas of the Vidlič Mountain beech forest.. *Oxidation Communications*. 2. 860-868.

**Markovic, Marija & Ilić, Budimir & Miladinovic, Dragoljub & Stamenkovic, Slavisa & Trajković, Radmila & Stankov-Jovanovic, Vesna & Djelic, Gorica. (2015).** Activity of a catalase enzyme in plants from the burned areas of the Vidlič Mountain beech forest.. *Oxidation Communications*. 2. 860-868.

**Marschner, P. (2012)** Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants. 3rd Edition, Academic Press, Cambridge, 649 p.

**Mocquot, B., Vangronsveld, J., Clijsters, H., et Mench, M. (1996).** Toxicité du cuivre chez les jeunes plants de maïs (*Zea mays* L.) : effets sur la croissance, la teneur en minéraux et en chlorophylle, ainsi que sur les activités enzymatiques. *Plant and Soil*, 182 : 287–300.

**Muller, S & Huggett, Duane & Rodgers, John. (2001)-** Effects of Copper Sulfate on *Typha latifolia* Seed Germination and Early Seedling Growth in Aqueous and Sediment Exposures. *Archives of environmental contamination and toxicology*. 40. 192-7. 10.1007/s002440010163.

**Munzuroglu, O. and Geckil, H. (2002)-** Effects of Metals on Seed Germination, Root Elongation, and Coleoptile and Hypocotyls Growth in *Triticum aestivum* and *Cucumis sativus*. *Archives of Environment Contamination and Toxicology*, 43, 203-213.

**Mysliwa-Kurdziel B., Strzalka K. (2002).** Influence des métaux sur la biosynthèse des pigments photosynthétiques. In *Physiology and Biochemistry of Metal Toxicity and Tolerance in Plants*, chap. pp. 201–222.

**Nazir F., Hussain A., Fariduddin Q. (2019).** Le peroxyde d'hydrogène module la photosynthèse et le système antioxydant chez la tomate (*Solanum lycopersicum* L.) sous stress cuivrique. *Chemosphere*.

**Percival G.C., Sheriffs C.N. (2002).** Identification de plantes ligneuses pérennes tolérantes à la sécheresse à l'aide de la fluorescence chlorophyllienne. *Journal of Arboriculture*, 28 : 215–223.

**Perrono, P. (1999)** Les micropolluants métalliques des boues de stations d'épuration urbaine et l'épandage agricole. Mém DUESS, DEP, Université de Picardie, Amiens.

**Peshev D., Van den Ende W. (2013).**

Les sucres comme antioxydants chez les plantes. In : Tuteja N., Gill S. (éds) *Amélioration des cultures en conditions défavorables*. Springer, New York, NY.

**Prasad, M.N.V. and Hagemeyer, J. (1999)** Heavy Metal Stress in Plants—From Molecules to Ecosystems. Springer-Verlag, Heidelberg, Berlin, New York, 401.

**Prasad, V.R., Rao, A.S., Reddy, N.B., Vasu, B. and Beg, O.A. (2013)** Modelling Laminar Transport Phenomena in a Casson Rheological Fluid from a Horizontal Circular Cylinder with Partial Slip. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 227, 309-326.

**Rao, S., et Shekhawat, G.S. (2013).**

Toxicité des nanoparticules de ZnO et évaluation de leur effet sur la croissance, le métabolisme et l'accumulation spécifique dans les tissus chez *Brassica juncea*. *Journal of Environmental Chemical Engineering*.

**Rehman M., Maqbool Z., Peng D., Lijun L. (2019).**

Caractéristiques morpho-physiologiques, capacité antioxydante et phytoextraction du cuivre par le ramie (*Boehmeria nivea* L.) cultivé comme fourrage dans un sol contaminé au cuivre. *Environmental Science and Pollution Research*.

**Robert, M. and Juste, C. (1999)** Dynamique des éléments traces de l'écosystème sol. Club CRIN Environnement et Ministère de l'environnement. Spéciation des métaux dans le sol, CRIN, Paris, 495.

**Saleem M.H., Ali S., Irshad S., Hussaan M., Rizwan M., Rana M.S., Hashem A., Abd Allah E.F., Ahmad P. (2020).**

Absorption et accumulation du cuivre, altérations ultra-structurales, rendement et qualité des fibres chez le jute (*Corchorus capsularis* L.) cultivé dans deux types de sols chinois. *Plants*, 9(3), 404.

**Schultz E., Joutti A. (2007).**

Écotoxicité de l'arsenic dans les sols. *Publications diverses du Service Géologique de Finlande*, 53 p.

**Schurr U., Walter A., Rascher U. (2006).**

Dynamiques fonctionnelles de la croissance et de la photosynthèse des plantes : de l'état stationnaire à la dynamique, de l'homogénéité à l'hétérogénéité. *Plant Cell and Environment*, 29 : 340–352.

**Seregin, I.V. and Ivanov, V.B. (2001)** Physiological Aspects of Cadmium and Lead Toxic Effects on Higher Plants. *Russian Journal of Plant Physiology*, 48, 523-544.

**Seregin, Ilya & Kozhevnikova, Anna. (2005)** - Distribution of Cadmium, Lead, Nickel, and Strontium in Imbibing Maize Caryopses. *Russian Journal of Plant Physiology*. 52. 565-569. 10.1007/s11183-005-0084-8.

**Sharma S.S. et Dietz K.J., 2006-** The significance of amino acids and amino-derived molecules in plant responses and adaptation to heavy metal stress. *J Exp Bot* 57: 711-726.

**Sharma, S. (2000).** Managerial Interpretations and Organizational Context as Predictors of Corporate Choice of Environmental Strategy. *Academy of Management Journal*, 43, 681-697.

**Sheteiwy, M.S., Guan, Y., Cao, D., Li, J., Nawaz, A., Hu, Q., Hu, W., Ning, M., et Hu, J. (2015).**

La priming des graines avec du polyéthylène glycol régule les mécanismes physiologiques et moléculaires chez le riz (*Oryza sativa* L.) soumis au stress des nanoparticules de ZnO. *Scientific Reports*, 5 : 14278.

**Siakhene, N. (1984).**

Effet du stress hydrique sur quelques espèces de luzernes annuelles. Mémoire d'ingénieur agronome, INA El Harrach, 1-84.

**Singh D., Nath K., Sharma Y.K. (2007).**

Réponse de la germination et de la croissance des plantules de blé au stress cuivrique. *Journal of Environmental Biology*, 28 : 409-414.

**Sonmez, S., Kaplan, M., Sonmez, N.K., Kaya, H., et Uz, I. (2006).**

Une application élevée de cuivre au sol et sur les feuilles réduit la croissance et le rendement des plants de tomate. *Scientia Agricola* (Piracicaba, Brésil), 63(3) : 213-218.

**Stobart A.K., Griffiths W.T., Ameen-Bukhari I., Sherwood R.P. (1985).**

Effet du Cd<sup>2+</sup> sur la biosynthèse de la chlorophylle dans les feuilles d'orge. *Physiologia Plantarum*, 63 : 293-298.

**Vargas, Manuel & Fernando, & Elorriaga-Verplancken, Fernando & Olivos, Aramis & Morales-Guerrero, Blanca & Liñán-Cabello, Marco & Christian, & Ortega-Ortiz, D & Ortega-Ortiz, Christian. (2021).** Ecological aspects of killer whales from the Mexican Central Pacific coast: Revealing a new ecotype in the Eastern Tropical Pacific. *Marine Mammal Science*. 37. 674-689. 10.1111/mms.12748.

**Vargas, Manuel & Fernando, & Elorriaga-Verplancken, Fernando & Olivos, Aramis & Morales-Guerrero, Blanca & Liñán-Cabello, Marco & Christian, & Ortega-Ortiz, D & Ortega-Ortiz, Christian. (2021).** Ecological aspects of killer whales from the Mexican Central Pacific coast: Revealing a new ecotype in the Eastern Tropical Pacific. *Marine Mammal Science*. 37. 674-689. 10.1111/mms.12748.

**Vernay P., Austruy A., Gauthier-Moussard C., Hitmi A. (2009).**

Germination et fonctionnement du système photosynthétique des végétaux comme bioindicateurs de la pollution des sols. *Étude et Gestion des Sols*, 16 (3/4) : 349-357.

**Vijayarengan P., Mahalakshmi G. (2013).**

Toxicité du zinc chez les plants de tomate. *World Applied Sciences Journal*, 24 (5) : 649–653.

**Vinit-Dunand F., Epron D., Alaoui-Sossé B., Badot P.M. (2002).**

Effets du cuivre sur la croissance et la photosynthèse des feuilles matures et en développement chez le concombre. *Plant Science*, 163 : 553–558.

**Weckx, J.E.J., et Clijsters, H.M.M. (1996).**

Domages oxydatifs et mécanismes de défense dans les premières feuilles de *Phaseolus vulgaris* résultant de l'assimilation racinaire de quantités toxiques de cuivre. *Physiologia Plantarum*, 96 : 506–512.

**Weiss, Allen & Anderson, Erin & Macinnis, Deborah. (1999).**- Reputation Management as a Motivation for Sales Structure Decisions. *Journal of Marketing*. 63. 10.2307/1251975.

**Xiaoning Li , Haizhen Ma , Pengxiang Jia , Juan Wang , Lingyun Jia , Tengguo Zhang , Yingli Yang , Haijian Chen et Xia Wei** Responses of seedling growth and antioxidant activity to excess iron and copper in *Triticum aestivum* L. 12 2012

**Kumar, Dr. Arvind & Denre, Manas & Prasad, Ruplal. (2018)**- Agronomic Biofortification of Zinc in Wheat (*Triticum Aestivum* L.). *Current Science*. 115. 944-948. 10.18520/cs/v115/i5/944-948.

**Xiaoning Li , Haizhen Ma , Pengxiang Jia , Juan Wang , Lingyun Jia , Tengguo Zhang , Yingli Yang , Haijian Chen et Xia Wei** Responses of seedling growth and antioxidant activity to excess iron and copper in *Triticum aestivum* L. 12 2012

**Yu.A; Muratova , E.V. Lyubun, S.N. Golubev, O.V. Turkovskaya (2022)**- Effect of copper ions on the associations of Azospirillum bacteria with wheat seedlings (*Triticum aestivum* L.)

## Annexe

Tableau 1. Effet du zinc sur le % de la germination

	Jour1	Jour2	Jour3	Jour4	Jour5	Jour6	Jour7	Jour8	Jour9	Jour10	Jour11	Jour12	Jour13	Jour14	Jour15
Traitements															
D0(témoin)	98%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
D1 (0,001)	70%	82%	83%	83%	83%	85%	87%	87%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%
D2 (0,005)	67%	72%	80%	88%	88%	90%	90%	92%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%
D3 (0,01)	83%	92%	95%	95%	95%	95%	97%	97%	97%	97%	97%	97%	97%	97%	97%

Tableau2.Effet du cuivre sur le % de germination

	Jour1	Jour2	Jour3	Jour4	Jour5	Jour6	Jour7	Jour8	Jour9	Jour10	Jour11	Jour12	Jour13	Jour14	Jour15
Traitements															
D0(témoin)	98%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
D1 (0,001)	80%	83%	83%	95%	95%	95%	95%	97%	97%	97%	97%	97%	97%	97%	97%
D2 (0,005)	53%	71%	85%	85%	85%	90%	92%	93%	93%	95%	95%	95%	95%	95%	95%
D3 (0,01)	83%	88%	93%	95%	95%	95%	97%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%

Tableau3. Effet du zinc sur le temps moyen et le % final de germination

Traitements	Temps moyen de germination	% finale de germination
D0	8	100%
D1	8,36	95%
D2	8,32	95%
D3	8,11	97%

Tableau4.Effet du zinc sur le temps moyen et le % finale de germination

Traitements	Temps moyen de germination TMG	% finale de germination
D0	8	100%
D1	8,36	97%
D2	8,5	95%
D3	8	98%

Tableau5. Effet du zinc sur la croissance finale des plantules (Après 15 jours de germination)

Doses	Traitements	Longueur plantule (cm)	Longueur racine (cm)	Longueur tige (cm)
Témoin	D0	24,13	11,4	12,73
0,001	D1	25,57	12,18	13,07
0,005	D2	21,98	10,76	11,22
0,01	D3	21,77	11,27	10,56

Tableau 6. Effet du cuivre sur la longueur plantules ,tige et racine(cm)

Doses	Traitements	Longueur plantule (cm)	Longueur racine (cm)	Longueur tige (cm)
	D0	24,13	11,4	12,73
0,001	D1	15,73	6,1	9,66
0,005	D2	22,73	9,23	9,23
0,01	D3	22,66	7,33	9,75

Tableau 7.Effet du zinc sur la hauteur des la plante, longueur tige et racine (cm)

Traitements	Longueur (cm)		
	Plante	Racine	Tige
D0	82,65	33,5	49,15
D1	101,5	33,6	67,9
D2	74	39	35
D3	60,65	23	37,65

Tableau 8. Effet du cuivre sur la hauteur de la plante, longueur tige et racine(cm)

Traitements	Longueur (cm)		
	Plante	Racine	Tige
D0	82,65	33,5	49,15
D1	50,25	29,15	21,1
D2	63,15	27,7	35,45
D3	63,1	27,1	36

Tableau 9. Effet du zinc et du cuivre sur le poids frais de plante

Traitements	Poids (g) zinc	Poids (g) cuivre
D0	4,75	0,587
D1	4,863	0,6171
D2	2,299	0,662
D3	2,678	0,46

Tableau 10. Effet du zinc et du cuivre sur le poids sec de plante adulte

Traitements	Poids (g) zinc	Poids (g) cuivre
D0	0,587	0,587
D1	0,6171	0,631
D2	0,662	0,406
D3	0,46	0,51

Tableau 11. Effet du zinc sur les sucres totaux

Traitements	Taux des sucres totaux (mg/ml)
D0	0,96
D1	0,38
D2	0,85
D3	0,5

Tableau 12. Effet du cuivre sur les sucres totaux

Traitements	Taux des sucres totaux (mg/ml)
D0	0,96
D1	0,19
D2	0,27
D3	0,34

Tableau 13. Effet du cuivre sur le taux de chlorophylle a et b

Traitements	ch,a	ch,b
D0	14,3	19,12
D1	47,2	2,82
D2	9,74	10,04
D3	28,35	12,09

Tableau 14. Effet du cuivre sur le taux de chlorophylle a+b

Traitements	Chl a+b mg/gMF
D0	36,59
D1	86,82
D2	23,25
D3	58

Tableau 15. Effet du zinc sur le taux de chlorophylle a et b

Traitements	chl a,	chl b,
D0	14,3	19,12
D1	29,54	11,24
D2	28,6	15,95
D3	25,81	22,88

Tableau 16. Effet du zinc sur le taux de chlorophylle a + b

Traitements	Chl a+b (mg/gmf)
D0	36,59
D1	59,67
D2	60,62
D3	59,48

Tableau 17. Effet du zinc sur le dosage de protéines

Traitements	Effet du zinc sur dosage de protéine
D0	0,0212
D1	0,0185
D2	0,0169
D3	0,0167

Tableau 18. Effet du cuivre sur dosage de protéine

Traitements	Effet du cuivre sur dosage de protéine
D0	0,0212
D1	0,0149
D2	0,0147
D3	0,0156