



République Algérienne Démocratique et Populaire Ministère de
l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Amar Telidji- Laghouat

FACULTE DES SCIENCES

DEPARTEMENT : SCIENCES AGRONOMIQUES

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par : CHETTOUH Ahmed

DOMAINE : SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE (SNV)

FILIERE : SCIENCES AGRONOMIQUES

OPTION : AMELOIRATION DES PLANTES

Thème

**Etude du seuil de tolérance au zinc chez la tomate
(*Lycopersicon esculentum*) et le blé dur (*Triticum
durum*) au stade de germination.**

Soutenu devant le jury :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
SARIDI Abdelkader	MAA	Président
AMEUR Djamilia	MAA	Examineur
MALLEM Hamida	MCA	Encadreur

Promotion : 2023

Titre : Etude du seuil de tolérance au zinc chez la tomate (*Lycopersicon esculentum*) et le blé dur (*Triticum durum*) au stade de germination.

Résumé :

L'utilisation irresponsable d'engrais chimiques contenant des éléments en excès de métaux lourds toxiques pour les sols agricoles menace les fonctions vitales de la plante. Le zinc qui est un oligoélément nécessaire pour favoriser une croissance et un développement normaux, mais lorsqu'il est présent à des teneurs élevées dans le sol, il devient toxique et peut causer la mort des plantes. L'objectif de ce travail est d'étudier le seuil de tolérance du zinc sur la germination de la tomate (*Lycopersicon esculentum*) et le blé dur (*Triticum durum*). Les graines sont mises à germer à une température de 25°C, en présence de la solution de Zinc à différentes concentrations (50, 100, 300, 500 ppm). Les paramètres de germination (faculté de germination, l'indice de vigueur, la durée médiane) ont été analysés. Les résultats ont montré que le stade de la germination pour les deux espèces est plus tolérant aux doses de Zn que le stade de la levée. Pour la durée médiane, le blé dur est plus tolérant au Zn que la tomate. L'enracinement et l'émergence chez les deux espèces sera ralenti à partir de 300 ppm de zinc. Concernant les résultats de l'indice de vigueur montre que les doses 300 et 500 ppm sont les basses moyennes. Ces résultats peuvent contribuer à la connaissance de la voie technique agricole appropriée à l'utilisation responsable des fertilisants pour éviter la toxicité en zinc.

Mot clé : les engrais, la toxicité, les métaux lourds (Zn), la germination, le blé dur, la tomate,

Title: Study of the zinc tolerance threshold in tomato (*Lycopersicon esculentum*) and durum wheat (*Triticum durum*) at the germination stage.

Abstract:

The irresponsible use of chemical fertilizers containing excess elements of heavy metals toxic to agricultural soils threatens the vital functions of the plant. Zinc is a trace element necessary to promote normal growth and development. But when it is present at high levels in the soil, it becomes toxic and can cause plant death. The objective of this work is to study the tolerance threshold of zinc on the germination stage of tomato (*Lycopersicon esculentum*) and durum wheat (*Triticum durum*). The seeds are germinated at a temperature of 25°C., in the presence of the Zinc solution at different concentrations (50, 100, 300, 500 ppm). The germination parameters (germination faculty, vigor index, median duration) were analyzed. The results showed that the germination stage for both species is more tolerant of Zn doses than the emergence stage. For the median duration, durum wheat was more Zn-tolerant than tomato. Rooting and emergence in both species will be slowed down from 300 ppm Zn. The vigor index results show that the doses 300 and 500 ppm are the lowest averages. These results may contribute to our knowledge of the appropriate agricultural technique for the responsible use of fertilizers to avoid zinc toxicity.

Key words: fertilizers, toxicity, heavy metals (Zn), germination, durum wheat, tomato,

العنوان: دراسة عتبة تحمل الزنك في الطماطم (*Lycopersicon esculentum*) والقمح الصلب (*Triticum durum*) في مرحلة الإنتاش.

الملخص :

الاستخدام غير المسؤول للأسمدة الكيماوية التي تحتوي على عناصر زائدة من المعادن الثقيلة السامة للتربة الزراعية يهدد الوظائف الحيوية للنبات. الزنك عنصر ضروري لتعزيز النمو والتطور الطبيعي. ولكن عندما تكون موجودة بمستويات عالية في التربة، فإنها تصبح سامة ويمكن أن تسبب موت النبات. الهدف من هذا العمل هو دراسة عتبة تحمل الزنك على الإنبات والنمو الخضري المبكر للطماطم (*Lycopersicon esculentum*) والقمح الصلب (*Triticum durum*) من خلال تحليل البيانات الفسيولوجية. تثبت البذور عند درجة حرارة 25 C درجة مئوية ، في وجود محلول الزنك بتركيز مختلفة (50 ، 100 ، 300 ، 500 جزء في المليون). تم تحليل معاملات الإنبات (قدرة الإنبات، مؤشر القوة، متوسط المدة). أظهرت النتائج أن مرحلة الإنتاش لكلا النوعين أكثر تحملاً لجرعات الزنك من مرحلة الإنبات. بالنسبة لمتوسط الهدة ، فإن القمح القاسي وتحمل الزنك أفضل من الطماطم. سوف يتباطأ التجذير والظهور في كلا النوعين من 300 جزء في المليون من الزنك. فيما يتعلق بنتائج مؤشر القوة يظهر أن الجرعات 300 و 500 جزء في المليون تمثل متوسط الإنخفاضات . يمكن أن تساهم هذه النتائج في معرفة التقنية الزراعية للاستخدام المسؤول للأسمدة لتجنب سمية الزنك.

الكلمات المفتاحية : الأسمدة، السمية، المعادن الثقيلة (الزنك)، الإنبات، القمح الصلب، الطماطم.

Dédicace

Je dédie ce travail à :

*A mes chers parents ma mère et mon père,
Pour leur patience, leur soutien et leurs encouragements.*

A mes chères sœurs : Amina et Khadidja

A mon seul cher frère : Mohammed

*A Toute ma famille. Tous mes amis, Tous mes professeurs durant tous
mes études.*

Ahmed

Remerciements

Tout d'abord, je remercie Allah Tout-Puissant de m'avoir comblé de bénédictions et de m'avoir donné assez de force pour accomplir cette tâche et compléter cette éducation.

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de mon stage et qui m'ont aidé lors de la rédaction de ce mémoire.

*J'adresse l'expression de ma très vive gratitude et respects à mon encadreur, **Mme. Dr. MALLEM Hamida** pour son soutien, pour ses conseils utiles et sa gentillesse et pour ses appréciations sur ce travail, Je le prie de bien vouloir trouver ici le témoignage de ma très vive gratitude.*

*Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury **Dr. AMEUR Djamila** et **Dr. SARIDI Abdelkader** pour l'intérêt qu'ils ont porté à ma recherche en acceptant d'examiner mon travail et de l'enrichir par leurs propositions.*

Je remercie tous les enseignants du département d'agronomie à l'université de -Laghouat- qui m'ont permis de bénéficier de leurs expériences, de leurs compétences et de leur rigueur scientifique tout le long de ma formation universitaire.

Je tiens aussi à remercier tous ceux qui ont contribué et aidé à la réalisation de ce mémoire.

Ahmed

SOMMAIRE

Résumé	
Dédicace	
Remerciement	
Sommaire	
Liste des Tableaux	
Liste des Figure	
Liste des abréviations	

Introduction général

01

Chapitre 01 : Généralité sur la tomate

1.1. Description botanique.....	03
1.2. Caractéristiques morphologique de la tomate.....	03
1.2.1 L'appareil végétatif.....	03
1.2.1.1 Racines.....	03
1.2.1.2 Tiges.....	04
1.2.1.3 Feuilles.....	04
1.2.2. Appareil reproducteur.....	05
1.2.2.1. Les fleurs.....	05
1.2.2.2 Fruits.....	06
1.2.2.3. Graines.....	07
1.3. Le cycle biologique de la tomate.....	07
1.3.1. La germination.....	07
1.3.2. La croissance.....	07
1.3.3 La floraison.....	08
1.3.4. La pollinisation.....	08
1.3.5. La fructification et la maturité des fruits.....	08
1.4. Caractéristiques physiologiques de la tomate.....	09
1.4.1. Les exigences climatiques.....	09
1.4.1.1. La température.....	09
1.4.1.2. La lumière.....	10
1.4.1.3. Eau et humidité.....	11
1.4.2. Les exigences édaphiques.....	11
1.4.2.1. Le sol.....	11
1.4.2.2. Le pH du sol.....	11
1.4.2.3. La salinité du sol.....	11
1.5. Importance économique de la tomate.....	11

Chapitre 02 : Généralité sur le blé dur

2.1. Description botanique.....	13
2.2. Classification botanique.....	13
2.3. Caractères morphologiques de blé dur.....	14

2.3.1. L'appareil aérien.....	14
2.3.2. L'appareil racinaire.....	14
2.3.3. L'appareil reproducteur.....	14
2.3.4. Description d'un grain de blé.....	15
2.3.4.1. L'enveloppe.....	15
2.3.4.2. L'Albumen ou amande.....	15
2.3.4.3. Le germe.....	16
2.3.5. Le cycle de développement de blé dur.....	16
2.3.5.1 La période végétative.....	17
2.3.5.2. La période reproductrice.....	17
2.3.5.3. La période de formation et maturation des grains.....	18
2.4. Caractéristiques physiologiques de blé dur	20
2.4.3. Les exigences du blé.....	20
2.4.3.1. Le sol.....	20
2.4.3.2. L'eau.....	20
2.4.3.3. Les températures.....	22
2.5. Importance du blé dur dans le monde et en Algérie	23

Chapitre 03 : Le Zinc dans les végétaux

3.1. Généralités sur les métaux lourds	24
3.1.1. Origine naturelle	24
3.1.2. Origine anthropique.....	24
3.2. Le Zinc.....	25
3.2.1. Le zinc dans le sol.....	25
3.2.2. Le zinc dans la plante.....	25
3.2.2.1. L'absorption et distribution.....	25
3.2.2.2. Rôle physiologique.....	26
3.2.2.3. Répartition du Zn dans les racines et les sommités des plantes.....	27
3.3.1. Efficacité du zinc.....	27
3.3.2. Seuils critiques de Zn.....	27
3.3.3. Fertilisation au Zinc.....	28
3.3.4. La déficience en Zn et sa correction.....	30
3.4.1. Niveaux critiques de zinc dans les plantes	32
3.4.2. Toxicité du zinc.....	33
3.4.3. Effet du zinc sur l'activité microbienne.....	34
3.4.4. L'excès de zinc et sa correction.....	34

Chapitre 04 : matériel et méthodes

4.1. Objectif de l'expérimentation.....	36
4.2. Matériel végétal.....	36
4.3. Préparation des solutions du métal lourd testé (Zn)	36
4.4. Dispositif expérimental de l'essai de la germination	36
4.5. Les paramètres mesurés.....	39
4.5.1. Calcul de la faculté de germination (FG)	39
4.5.2. La cinétique de la germination.....	39
4.5.3. La durée médiane de la germination.....	39
4.5.4. L'indice de vigueur de semis (SVI)	40
4.6. Analyses statistiques	41

Chapitre 05 : Résultat et Discussion

5.1. Résultats.....	42
5.1.1. Effet du Zinc sur les paramètres de germination de la tomate (<i>Lycopersicum esculentum</i>) et le blé dur (<i>Triticum durum</i>)	42
5.1.1.1. Effet du Zinc sur la cinétique de germination de la tomate (<i>Lycopersicum esculentum</i>) et le blé dur (<i>Triticum durum</i>)	42
5.1.1.2. Effet du Zinc sur le taux de germination de La tomate et le blé dur.....	43
5.1.1.3. Effet du Zn sur la durée médiane de germination des graines de La Tomate et le blé dur.....	45
5.1.1.4. Effet du Zn sur la longueur de la partie racinaire de germination des graines : La Tomate et le blé dur.....	46
5.1.1.5 Effet du Zn sur la longueur de la partie aérienne des graines germées de la tomate et le blé dur.....	47
5.1.1.6. Effet du Zn sur L'indice de vigueur de germination des graines de La tomate et le blé dur.....	48
5.2. Discussion.....	50
Conclusion générale.....	53
Référencé Bibliographique.....	54
Annexe.....	62

Liste des tableaux

N°	Titre	Page
1	Températures requises pour les différentes phases de développement d'un pied de tomate	10
2	les principaux pays producteurs de tomates. (FAOSTAT, 2022).	12
3	Classification du blé dur d'après Feillet, (2000)	14
4	exigences du blé en somme de températures selon les stades physiologiques	22
5	Produits contenant du zinc (Katyal et Randhawa, 1986).	29
6	concentrations en métaux lourds (ppm) observées pour divers horizons de sols « ordinaires » de toutes granulométries selon (Baize 1997).	34

Liste des figures

N°	Titre	Page
1	Système racinaire pivotant de la tomate (graibeard / wikimedia.org)	4
2	La feuille de la tomate	5
3	Coupe longitudinale d'une fleur de tomate.	5
4	Fruit de la tomate, Schéma d'un fruit en coupe transversale et, coupe longitudinale (SEGARRA et al. (2014) et PEYCRU et al. (2010b)).	6
5	Cycle de vie d'un plant de tomate	9
6	Structure d'une talle de blé au stade floraison. Structure d'une talle (a) et d'un phytomère (b) (Sayah.2022).	13
7	Schéma d'une coupe d'un grain de blé (Fredot, 2005).	16
8	Les différents stades de développement du blé. (Soltner, 2005).	19
9	Schéma du dispositif expérimental adopté.	37
10	Photo du dispositif expérimental de <i>la tomate</i>	38
11	Photo du dispositif expérimental du <i>Blé dur</i>	38
12	mesure de la longueur de la racicule et de la pousse après 08jours de La germination des graines de <i>le Blé dur</i> (originale, 2023).	40
13	mesure de la longueur de la racicule et de la pousse après 08 jours de La germination des graines du <i>la tomate</i> (originale, 2023).	41
14	La cinétique de germination de <i>Blé dur</i> par jour sous l'effet du Zinc	42
15	La cinétique de germination de <i>la tomate (Lycopersicum esculentum)</i> par jour sous l'effet du Zinc.	43
16	Effet des Doses du Zn sur le taux de germination des graines des deux espèces (La tomate et Le Blé dur).	44
17	Effet des Doses du Zn sur la durée médiane (j) de germination des graines des deux espèces (La tomate et Le blé dur).	45
18	Effet des Doses du Zn sur la longueur de partie racinaire des graines d'espèce : La tomate et Le blé dur.	46
19	Effet des Doses du Zn sur la longueur de la partie aérienne des graines d'espèce : La tomate et Le blé dur.	47
20	Effet des doses du Zn sur l'indice de vigueur de germination des graines de (La tomate et Le blé dur).	49

Liste des abréviations

% : pourcentage

C° : Degré Celsius

CE : conductivité électrique

Cm : centimètre

DTPA : acide diéthylène triamine penta acétique

ET0 : évapotranspiration de référence

ETA : évapotranspiration actuelle

ETM : Éléments Traces Métalliques

ETR : évapotranspiration réelle

FG% : faculté de germination

G : gramme

KC : coefficient cultural

L : litre

PAMP : Pathogen-associated molecular pattern

PH : Potentiel hydrogène

Ppm : partie par million

T : témoin

Zn : zinc

Introduction général

Introduction

La libération de métaux lourds par des opérations industrielles telles que l'exploitation minière, la fonte, la combustion de combustibles fossiles (le pétrole) et les boues d'épuration, ont provoqué une augmentation significative des métaux en raison de leur nature persistante et non dégradable, entraînant leur bioamplification dans les aliments. Leur nature persistante et non dégradable, entraînant leur bioamplification dans la chaîne alimentaire (Rajkumar *et al.*, 2009). Parmi les différents métaux lourds, le Zn (Zinc) est un polluant majeur dans l'environnement en raison de son utilisation extensive dans l'industrie sans être récupéré (Taniguchi *et al.*, 2000). Le Zn est un oligo-élément essentiel pour toutes les formes de vie sur terre. Cependant, sa concentration élevée est également toxique pour le biote (He *et al.*, 2010).

En cas de concentration excessive, il est absorbé par les plantes, ce qui finit par perturber le métabolisme, la croissance et le développement. qui finit par perturber le métabolisme, la croissance, le développement et la production végétale (John *et al.*, 2008).

Bien que le Zn ne soit pas un élément redox actif d'oxydoréduction, la génération d'espèces réactives de l'oxygène (ERO), qui entraîne un stress oxydatif, est un aspect important de sa toxicité. qui finit par évoquer le système de défense de la plante. Malgré le stress oxydatif, la production d'éthylène, le déséquilibre nutritionnel, la chlorose et le ralentissement de la croissance sont des phénomènes courants chez les plantes, chlorose et un retard de croissance sont également des caractéristiques importantes de la toxicité du Zn, (Islam, 2014).

La carence en Zn chez les plantes céréalières, est un problème bien connu, qui entraîne une réduction de la productivité agricole dans le monde entier (Fageria *et al.*, 2002).

La fertilisation n'est pas toujours une option pour résoudre la carence en Zn à cause des facteurs agronomiques et économiques, tels que le coût relativement élevé des engrais (Graham et Rengel, 1993).

L'autre solution consiste à exploiter la variabilité génétique pour sélectionner des cultures de base à forte efficacité en Zn pourrait constituer une solution durable et efficace. Il est également possible d'exploiter la variabilité génétique pour sélectionner des cultures de base ayant une efficacité élevée en Zn, pourrait constituer un moyen durable et rentable de urmonter les problèmes de carence en Zn. Le terme ZE est défini comme la capacité d'un génotype à bien se développer dans des conditions d'apport en Zn (Graham *et al.*, 1992).

Selon Graham et al. (1992), le ZE est généralement exprimé comme le rapport entre le poids sec des pousses en cas de carence en Zn et le poids sec des pousses en cas d'apport adéquat en Zn.

Les géotypes de plantes cultivées peuvent varier considérablement en termes de ZE, comme cela a été rapporté pour le maïs (Ramani et Kannan, 1985), le blé (Cakmak *et al.*, 2001), le haricot commun (Hacisalihoglu *et al.*, 2004) et le riz de plaine (Sakal et al., 1989). Les mécanismes responsables de la variation géotypique de ZE ont fait l'objet d'une étude par Hacisalihoglu and Kochian (2003), il semble y avoir de nombreuses incertitudes sur les mécanismes qui contrôlent la tolérance à la carence en Zn. Il est très probable qu'il n'existe pas de mécanisme unique dans aucune espèce cultivée. L'expression d'un taux élevé de ZE dans les céréales blé, le seigle, l'orge, le triticale et l'avoine est liée à une meilleure capacité d'absorption et de translocation de Zn dans les pousses et à des quantités plus élevées de Zn physiologiquement actives dans les tissus foliaires (Cakmak *et al.*, 1998).

Dans ce mémoire, nous nous concentrons sur l'étude des seuils de tolérance et de la toxicité du zinc chez les plantes, en examinant les implications sur les paramètres de germination. Tout d'abord, il est important de comprendre les seuils de tolérance du zinc chez les plantes pour déterminer les doses de zinc appropriées lors de la fertilisation des cultures.

Ainsi, ce mémoire se concentrera sur l'étude des seuils de tolérance du zinc chez deux espèces de différents types de culture, la culture maraichère ; la tomate et la céréaliculture ; le blé dur, en tenant compte des implications pour une fertilisation responsable.

Ce mémoire est structuré en cinq chapitres, à savoir :

Dans les deux premiers chapitres, nous présentons une synthèse bibliographique sur : la tomate et le blé dur. Le troisième chapitre est réservé au zinc dans les végétaux. Le quatrième chapitre présente le matériel et les méthodes de travail.

Le Cinquième chapitre est l'ensemble des différents résultats et discussions des paramètres étudiés.

Et enfin nous terminerons par une conclusion générale et perspective.

Chapitre 01 :
Généralité sur la tomate

1.1. Description botanique

La tomate (*Solanum lycopersicum L.*) appartient à l'ordre des Solanales et à la famille des Solanacées (Atherton et Rudich, 1986). C'est une plante herbacée, vivace à l'état naturel, et annuelle en culture. Les variétés utilisées pour la consommation en frais sont à port indéterminé, c'est-à-dire que la tige peut se développer indéfiniment par empilement de sympodes (constitués de 3 feuilles et d'un bourgeon floral) se développant à partir de bourgeons axillaires après floraison du bourgeon terminal. Ces variétés nécessitent une culture tuteurée, majoritairement conduite sous abri. A l'inverse, les variétés destinées à l'industrie sont à port déterminé entraîné par la floraison du bouquet axillaire après la production de quelques sympodes. La maturation des fruits est alors plus groupée permettant une récolte mécanique en plein champ. La température optimale de croissance de la tomate se situe entre 21° et 24°C le jour et entre 15° et 17°C la nuit.

Selon **GUIGNARD (2000)**, la tomate appartient à la classification suivant :

Règne.....végétal.
EmbranchementSpermaphytes.
Sous embranchementAngiospermes.
Classe..... Dicotylédones
Sous classe..... Gamopétales.
Ordre.....Solonales.
Famille.....Solanaceae.
Genre.....*Solanum ou Lycopersicon*.
Espèce.....*Lycopersicon esculentum* Mill.

1.2. Caractéristiques morphologique de la tomate

La tomate est une plante herbacée annuelle, appartenant au groupe des légumes-fruits.

1.2.1 L'appareil végétatif

1.2.1.1 Racines

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



Figure 01 : Système racinaire pivotant de la tomate (graibeard / wikimedia.org)

1.2.1.2 Tiges

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

✓ **Les tiges à croissance déterminée** : leur croissance s'arrête après avoir émis un nombre variable de bouquets de fleurs. Elles donnent des pieds qui ont 60 à 80 cm de hauteur (Ex : cultures industrielles).

✓ **Les tiges à croissance indéterminée** : leur croissance ne s'arrête pas tant que la condition écologique est favorable. De telles variétés demandent à être palissées (Anonyme, 2007).

1.2.1.3 Feuilles

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



Figure 02 : La feuille de la tomate

1.2.2. Appareil reproducteur

1.2.2.1. Les fleurs

Les fleurs sont Bisexuées (fig.03), régulières et entre 1,5 et 2 cm de diamètre. Elles poussent opposées aux - ou entre les feuilles. Le tube du calice est court et velu, les sépales sont persistants. En général il y a 6 pétales qui peuvent atteindre une longueur de 1 cm, qui sont jaunes et courbées lorsqu'elles sont mûres. Il y a 6 étamines et les anthères ont une couleur jaune vif et entourent le style qui a une extrémité stérile allongée. L'ovaire est supère avec entre 2 et 9 carpelles. En général la plante est autogame, mais la fécondation croisée peut avoir lieu. Les abeilles et les bourdons sont les principaux pollinisateurs (PNTTA, 1999)

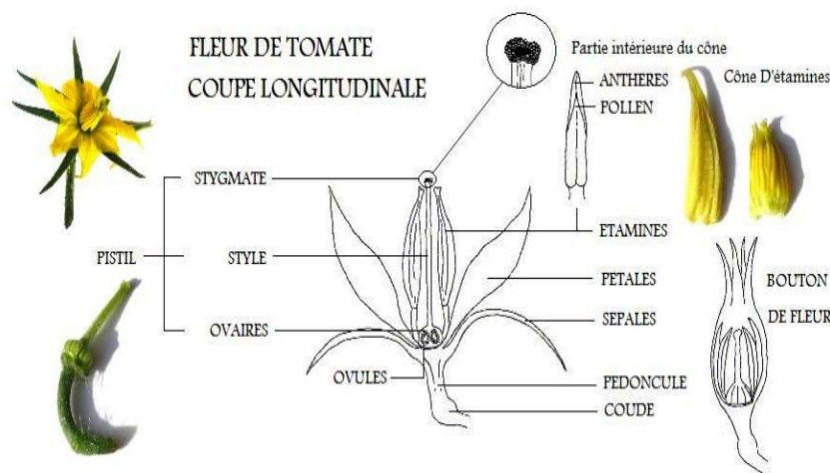


Figure 03 : Coupe longitudinale d'une fleur de tomate.

1.2.2.2 Fruits

Le fruit est une baie plus ou moins grosse, avec épiderme lisse brillant de forme variable (sphérique, oblongue, allongée), et de couleurs variées (blanches, rose, rouge, jaune, orange, verte, noire) selon les variétés (Renaud, 2003).

La paroi de l'ovaire évolue en péricarpe charnu et délimite des loges. Le placenta constitue la partie centrale du fruit et est à l'origine des tissus parenchymateux. Le nombre de loges, l'épaisseur du péricarpe et l'importance du gel sont dépendants des variétés (Grasselly et al, 2000).

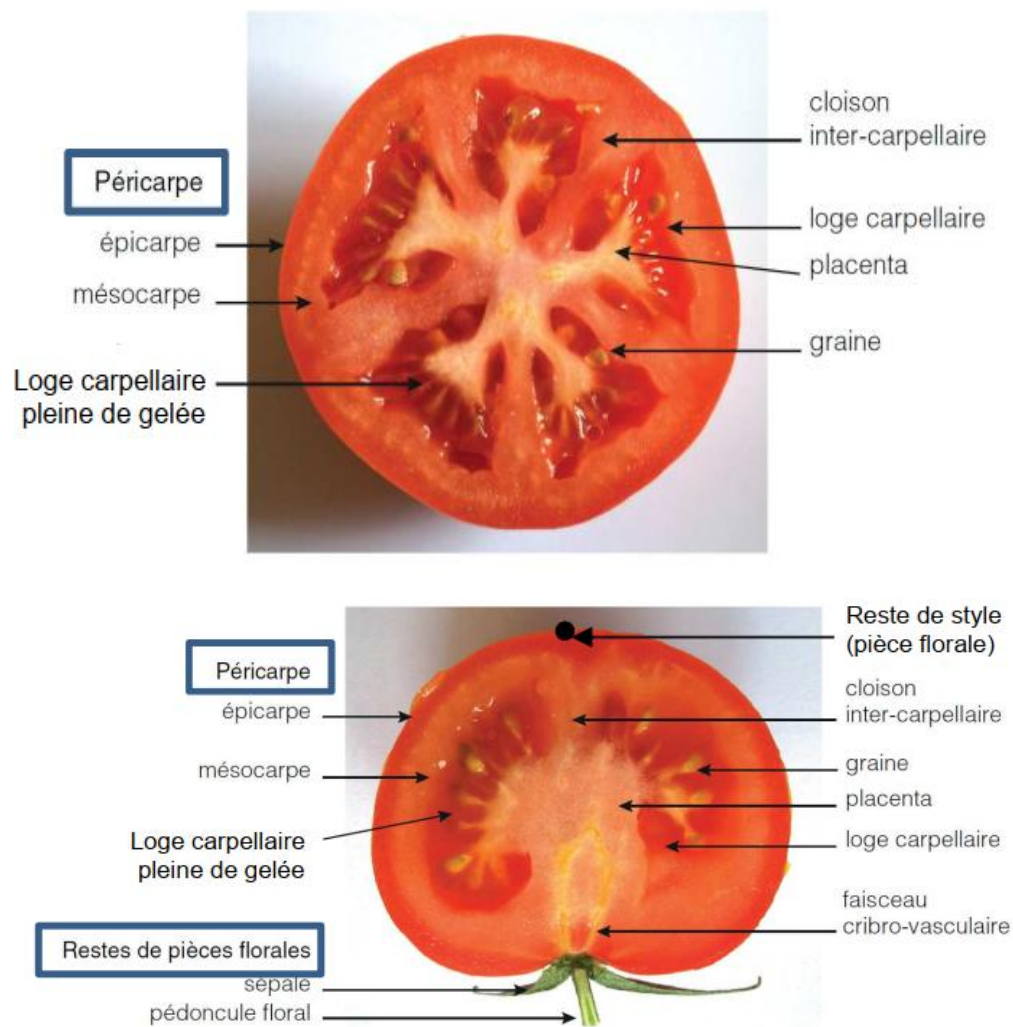


Figure 04: Fruit de la tomate, Schéma d'un fruit en coupe transversale et, coupe longitudinale (SEGARRA et al. (2014) et PEYCRU et al. (2010b)).

1.2.2.3. Graines

Les graines sont nombreuses, réparties dans des loges remplies de gel. En forme de rein ou de poire, poilues, beiges, de 3 à 5 mm de long et de 2 à 4 mm de large. Elles sont recouvertes d'un mucilage, L'embryon est enroulé dans l'albumen. Le poids de mille graines est en moyenne de 3 g (**Shankara, 2005 ; Naika et al., 2005**).

Le cycle de la graine à la graine, est variable selon les variétés et les conditions de culture, il est en moyenne de 3.5 à 4 mois (7 à 8 semaines de la graine à la fleur et 7 à 9 semaines de la fleur au fruit) (**Gallais et Bannerot, 1992**).

1.3. Le cycle biologique de la tomate

Le cycle végétative (fig. 05) complet de la graine à la graine de la tomate varie selon les variétés, l'époque et les conditions de culture ; mais il s'étend généralement en moyenne de 3,5 à 4 mois du semis, jusqu'à la dernière récolte (7 à 8 semaines de la graine à la fleur et 7 à 9 semaines de la fleur au fruit). Le cycle comprend les cinq étapes suivantes (**Gillaspy et al., 1993**) :

1.3.1. La germination

La germination et le stade de levée qui mène la graine jusqu'à la jeune plante capable de croître normalement (**Corbineau et Come, 2006**). Chez la tomate la germination est épigée, nécessite une température ambiante d'environ 20°C et une humidité relative de 70 à 80% (**Chaux et Foury, 1994**).

1.3.2. La croissance

C'est un changement quantitatif de la plante au cours du temps, qui s'effectue par une augmentation irréversible de ces dimensions (**Thiman, 1956**). Selon (**Laumonier ,1979**), cette étape se déroule en deux phases et en deux milieux différents.

- En pépinière : De la levée jusqu'au stade 6 feuilles, on remarque l'apparition des racines et des prés feuilles.
- En plein champ : Après l'apparition des feuilles à photosynthèse intense et des racines, les plantes continuent leur croissance. La tige s'épaissit et augmente son nombre de feuille.

1.3.3 La floraison

Lorsque le méristème passe de l'état végétatif à l'état reproducteur, les ébauches florales apparaissent et se développent, ce processus correspond à la floraison. Sous l'influence de plusieurs facteurs, naturellement la pollinisation se fait. Elle se traduit par l'apparition des fruits verts. La durée entre la pollinisation et la fécondation est de 2 à 3 jours (**Ray et Costes, 1965**).

Selon **Benton (1999)**, la première inflorescence apparaît deux mois et demi environ après le semis. La floraison chez la tomate commence du bas vers le haut. Ces fleurs étaient auparavant des boutons floraux. La floraison dépend de la photopériode, de la température et des besoins en éléments nutritifs de la plante.

1.3.4. La pollinisation

Les conditions climatiques ont un effet sur la libération et la fixation du pollen, par exemple si la température nocturne est inférieure à 13 °C, la plupart des grains de pollen seraient vides, et une faible humidité dessèche les stigmates qui causent une difficulté du dépôt de pollen (**Pesson et Louveaux, 1984**). L'intervention des agents extérieurs est nécessaire pour cette étape, le vent ou certains insectes comme le bourdon (**Chaux et Faury, 1994**). Lorsque des périodes de froid ou de chaleur perdurent pendant la floraison, la production de pollen sera réduite (**Shankara, 2005**).

1.3.5. La fructification et la maturité des fruits

La fructification débute par la nouaison des fleurs de l'inflorescence du bas vers le haut. Les fruits mûrissent quand ils atteignent leurs tailles définitives et ils se colorent en jaune puis en rouge (**Benton, 1999**). Il existe une relation proportionnelle entre la production d'auxine, le développement des fruits et la quantité des graines (**FAO, 1987**). La lumière intense permet la synthèse active qui affecte la mise et la couleur des fruits, pour cela une Température de 18 °C la nuit et 27°C le jour est favorable (**Ray et Costes, 1965 ; Shankara, 2005**).

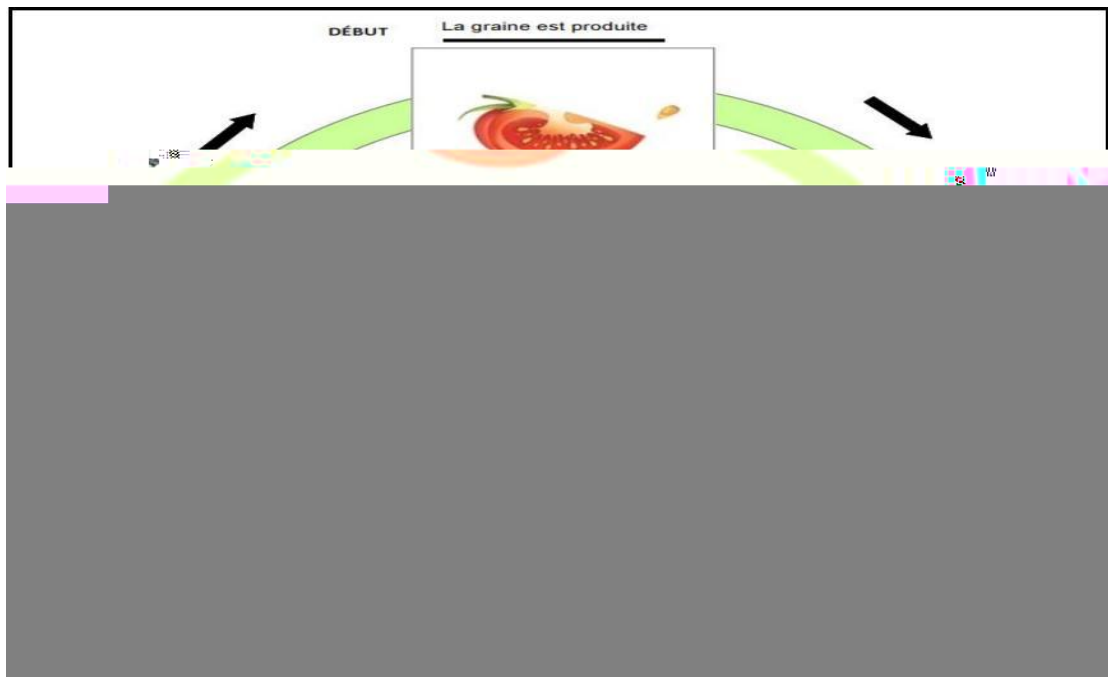


Figure 05. Cycle de vie d'un plant de tomate

1.4. Caractéristiques physiologiques de la tomate

1.4.1. Les exigences climatiques

Relativement frais et sec est le climat que la tomate exige pour fournir une récolte de quantité et de qualité.

1.4.1.1. La température

Selon (Chaux, 1994; Stickland, 1998) La température est un des facteurs essentiels qui intervient dans la physiologie de la tomate. En climat froid, les tomates sont cultivées comme plante annuelle. La tomate ne tolère pas le gel. La température optimale du substrat pour la germination se trouve entre 20 et 25°C (Tableau 01). La germination est quasiment impossible sous 10 °C et au-dessus de 35 °C. Des optimums de température du substrat existent aussi pour la croissance des systèmes aérien et racinaire, mais ils sont variables selon la variété.

La température du substrat a aussi une influence sur les fleurs ainsi que sur les fruits. Pour ce qui est de la température de l'air, les effets des différents niveaux de températures diffèrent selon la phase diurne ou nocturne.

On peut signaler que les températures nocturnes élevées limitent la croissance racinaire. De plus, la température nocturne a une grande influence sur l'élongation de la tige. Des températures nocturnes dépassant les 17 °C, surtout après une journée peu lumineuse, peuvent provoquer l'étiollement de la plante (à éviter !). C'est au cours de la phase nocturne que les produits de la photosynthèse migrent depuis les feuilles assimilatrices jusqu'aux autres parties de la plante. La température nocturne a aussi son rôle à jouer dans le nombre et la taille des fleurs, la quantité et la qualité du pollen ainsi que pour l'absorption du calcium. Il faut souligner que le niveau optimal nocturne est aussi fonction des températures diurnes.

Les températures diurnes ont moins d'effet sur la croissance végétative. Cependant, il faut savoir qu'une amplitude jour-nuit de 6 °C semble favorable à la croissance végétative ainsi qu'à la formation et au développement des inflorescences. Un autre fait important est que les températures optimales varient avec l'intensité lumineuse. Ainsi, elles tournent autour de 18 °C par temps couvert et sont plutôt de 21-22 °C lorsque le temps est ensoleillé (Chaux, 1994; Stickland, 1998).

Tableau 01 : Températures requises pour les différentes phases de développement d'un pied de tomate

Phases	Température (°C).		
	Min.	Intervalle optimal	Max.
Germination des graines	11	16-29	34
Croissance des semis	18	21-24	32
Mise à fruits	18	20-24	30
Développement de la couleur rouge	10	20-24	30

1.4.1.2. La lumière

La tomate aime les situations bien ensoleillées mais elle ne présente pas d'exigence photopériodique très marquée. Pendant les quatre à six semaines qui suivent le semis, les fortes intensités lumineuses encouragent le raccourcissement de l'axe et l'induction du premier bouquet, surtout à température basse. Pendant la floraison, une forte intensité lumineuse favorise la pollinisation et régularise la croissance du style, surtout lorsque la température du substrat est élevée. Par contre, l'insolation directe des fruits et l'élévation de température que cela entraîne est nocif quant à leur qualité (Chaux, 1994).

1.4.1.3. Eau et humidité

Une simple astuce permet de déterminer si les réserves en eau disponibles sont suffisantes pour cultiver la tomate, il faut pouvoir compter sur au moins trois mois de pluie. Le stress causé par une carence en eau et les longues périodes arides fait tomber les bourgeons et les fleurs et provoque le fendillement des fruits. Par contre, lorsque les averses sont très intenses et l'humidité est très élevée, la croissance des moisissures et la pourriture des fruits seront plus importants. Les temps nuageux ralentissent le mûrissement des tomates. (**Bouzaata, Ch., 2016**).

1.4.2. Les exigences édaphiques

1.4.2.1. Le sol

La tomate pousse bien sur la plupart des sols, avec une bonne aération et capacité de rétention d'eau, les plus préférés sont les sols limoneux profonds bien drainés, légère, meuble, riche en humus, s'échauffant rapidement et facilement (**Laumonier, 1979**). La perméabilité de la couche superficielle avec une profondeur de 15 à 20 cm est favorable à une bonne croissance d'une culture saine (**Shankara et al, 2005**). (**Khorsi, 1993**) a montré que la production de tomate peut être augmentée de près de 50% en passant des sols sableux légers, à des sols limoneux plus lourds.

1.4.2.2. Le pH du sol

La tomate supporte modérément un large intervalle de valeurs du potentiel d'hydrogène, mais pousse mieux dans les sols où la valeur du pH varie entre 5,5 et 6,8 (**Shankara, 2005**).

1.4.2.3. La salinité du sol

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

1.5. Importance économique de la tomate

La tomate est cultivée dans de nombreux pays du monde (170 selon la FAO) et sous divers climats, y compris dans des régions relativement froides grâce au développement des cultures sous abri. C'est, par le volume de production, le premier légume au niveau mondial, devant la pastèque et le chou, mais derrière la pomme de terre et la patate douce, ces deux dernières étant toutefois plutôt considérées comme des féculents (**FAOSTAT.2009**).

En 2021, la production de tomates dans le monde entier atteint 189 tonnes avec une superficie récoltée atteignant 5 millions d'hectares. Sur la base des données continentales, la production de tomates est répartie dans différentes zones. L'Asie est la principale région avec une production atteignant 119 millions de tonnes ou contribuant à 63% de la production mondiale de tomates, l'Amérique avec une production de 23 millions de tonnes ou contribuant à 13%, l'Europe avec une production de 24 millions de tonnes ou contribuant à 13 %, l'Afrique avec une production de 21 millions de tonnes ou contribuant à 11 % de la production mondiale de tomates. (Admin, 2023).

Tableaux 02 : les principaux pays producteurs de tomates. (FAOSTAT, 2022)

Rang	Pays	Production de tomates en 2021 (En Tonnes)
01	Chine	67, 538,340
02	Inde	21, 181,000
03	Turquie	13, 095,258
04	États-Unis d'Amérique	10, 475,265
05	Italie	6, 644,790
06	Égypte	6, 245,787
07	Espagne	4, 754,380
08	Mexique	3, 575,968
09	Brésil	4, 149,241
10	Nigéria	3, 679,160

Chapitre 02 :
Généralité sur le blé dur

2.1. Description botanique

La plante de blé adulte comporte généralement plusieurs axes. Le nombre d'axes par plante (généralement de 2 à 6) peut varier selon la variété et selon les conditions environnementales. Le tallage est un facteur important de plasticité qui joue un rôle dans les mécanismes de compensation observés en association variétale. Chaque axe comprend une partie végétative (la tige et les feuilles), une partie reproductive (épi) et un système racinaire. Chaque axe peut se diviser en plusieurs phytomères constitués d'un nœud, d'un entre-nœud, d'une gaine et d'un limbe. Le limbe et la gaine constituent la feuille et sont séparés par une ligule. La ligule sert de repère pour la mesure de la hauteur d'insertion des feuilles qui correspond à la distance entre le sol et la ligule de chaque feuille (Sayah.2022).

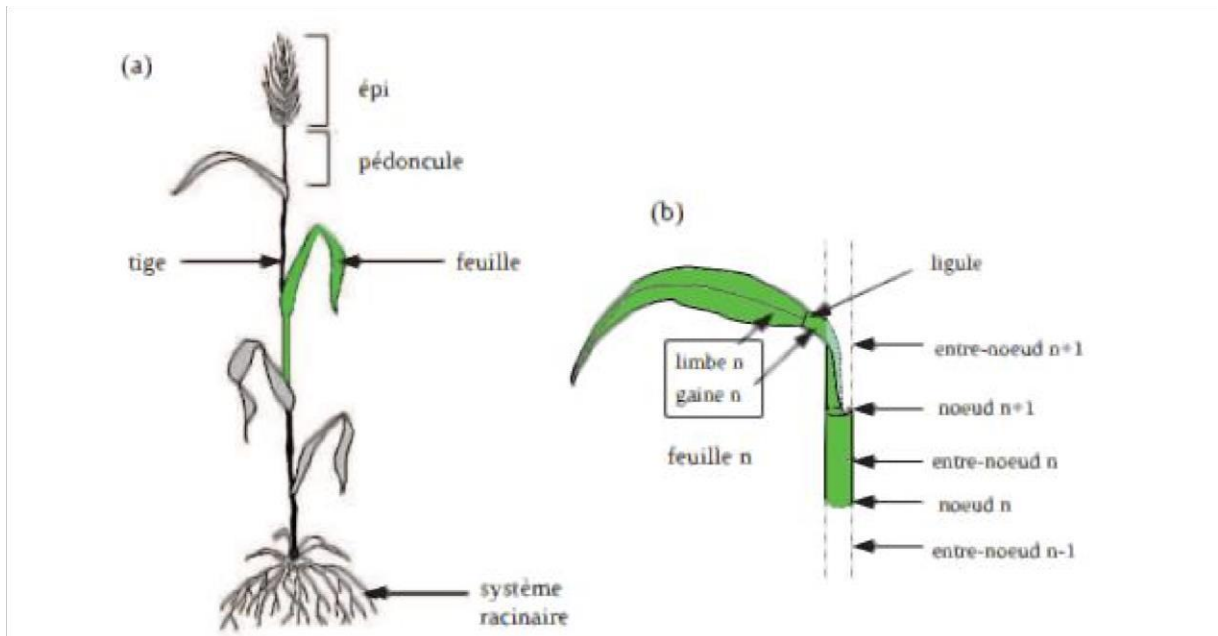


Figure 6 : Structure d'une talle de blé au stade floraison. Structure d'une talle (a) et d'un phytomère (b) (Sayah.2022).

2.2. Classification botanique

Selon Prats (1960), Crête (1965), Bonjean et Picard (1990) et Feillet (2000), le blé dur est une plante herbacée, appartenant au groupe des céréales à paille, qui sont caractérisée par des critères morphologiques particuliers. Le blé dur est une monocotylédone qui obéit à la classification suivante :

Tableau 03: Classification du blé dur d'après **Feillet, (2000)**

Embranchement	Angiospermes
Sous embranchement	Spermaphytes
Classe	Monocotylédones
Ordre	Glumiflorales
Super ordre	Comméliniflorales
Famille	Graminae et/ou Poaceae
Tribu	Triticeae
Sous tribu	Triticinae
Genre et espèce	<i>Triticum durum</i> Desf.

2.3. Caractères morphologiques de blé dur

2.3.1. L'appareil aérien :

Le système aérien est formé d'un certain nombre d'unités biologiques, Les talles, les feuilles et les gaines. Le tallo est formé d'une tige feuillée ou chaume portant à son extrémité une inflorescence (**Clarke et al. 2002**).les feuilles se composent d'une base (gaine) entourant la tige, d'une partie terminale qui s'aligne avec les nervures parallèles et d'une extrémité pointue.

Au point d'attache de la gaine de la feuille se trouve une membrane mince et transparente (ligule) comportant deux petits appendices latéraux, les oreillettes (**Bozzini, 1988**).

2.3.2. L'appareil racinaire

Le système racinaire comprend des racines séminales produites par la plantule durant la levée, ainsi que des racines adventives (latérales) qui se forment plus tard à partir des nœuds à la base de la plante et constituent le système racinaire permanent (**Bozzini, 1988**).

2.3.3. L'appareil reproducteur

L'inflorescence du blé est un épi. Ce dernier est constitué d'unités de base, les épillets. L'épillet est une petite grappe de un à cinq fleurs enveloppées chacune par deux glumelles (inférieure et extérieure). La grappe est incluse entre deux bractées ou glumes, les fleurs sont attachées sur le rachis et sont autogames (**Anonyme, 2003**).

2.3.4. Description d'un grain de blé

Le grain de blé est un fruit sec appelé caryopse d'une graine et de téguments selon (Anonyme, 2012). De forme ovoïde, plus ou moins allongée sa longueur varie de 6,5 à 8,5 mm et son diamètre de 3 à 4 mm. Le grain de blé comprend trois parties principales :

- l'enveloppe
- l'amande ou albumen
- le germe

2.3.4.1. L'enveloppe

Elle représente environ 17% du poids du grain .Elle est constituée par des couches de cellulose superposées comme suit :

❖ **Le péricarpe** : c'est une enveloppe avec des cellules dont la membrane est épaisse riche en fibres cellulosiques et hémi-cellulosique, son utilisation digestive est médiocre ; elle est riche également en sels minéraux et en acide phytique qui complexe le calcium et le fer et détermine sa disponibilité.

❖ **Le tégument séminal** : contient les colorants du grain qui lui donnent sa couleur jaune marron.

❖ **La bande hyaline** : c'est un ensemble de cellules transparentes ;

❖ **L'assise protéique ou couche à aleurone** : (aleurone étant une substance protidique de réserve) qui est riche en protéines, vitamines (elle contient près du 13 des vitamines B1 et B2 et environ les 2/3 des vitamines B6 et B3 du grain), minéraux, lipides. Cellulose et lignine.

2.3.4.2. L'Albumen ou amande

Il constitue un organe de réserve, riche en protéines et en lipides pour la jeune plantule et forme environ 2, à 3% grain de blé. Le germe comprend deux parties : la plantule (future plante) et le cotylédon (réserve de nourriture très facilement assimilable, destinée à la plantule) qui contient l'essentiel des matières grasses du grain. Enfin, le germe est riche en vitamines B1, B6 (Surget et Barron, 2005)

2.3.4.3. Le germe

Il représente 3% du poids du grain et il est riche en vitamines et en lipides. Il est constitué de 2 parties :

-l'**embryon**, formé de la coléoptile, de la gemmule, de la radicule, du coléorizhe et de la coiffe (**feillet. 2000**).

-le **scutellum** qui entoure l'embryon, le protège, et joue un rôle nourricier (**Fredot E., 2005**).

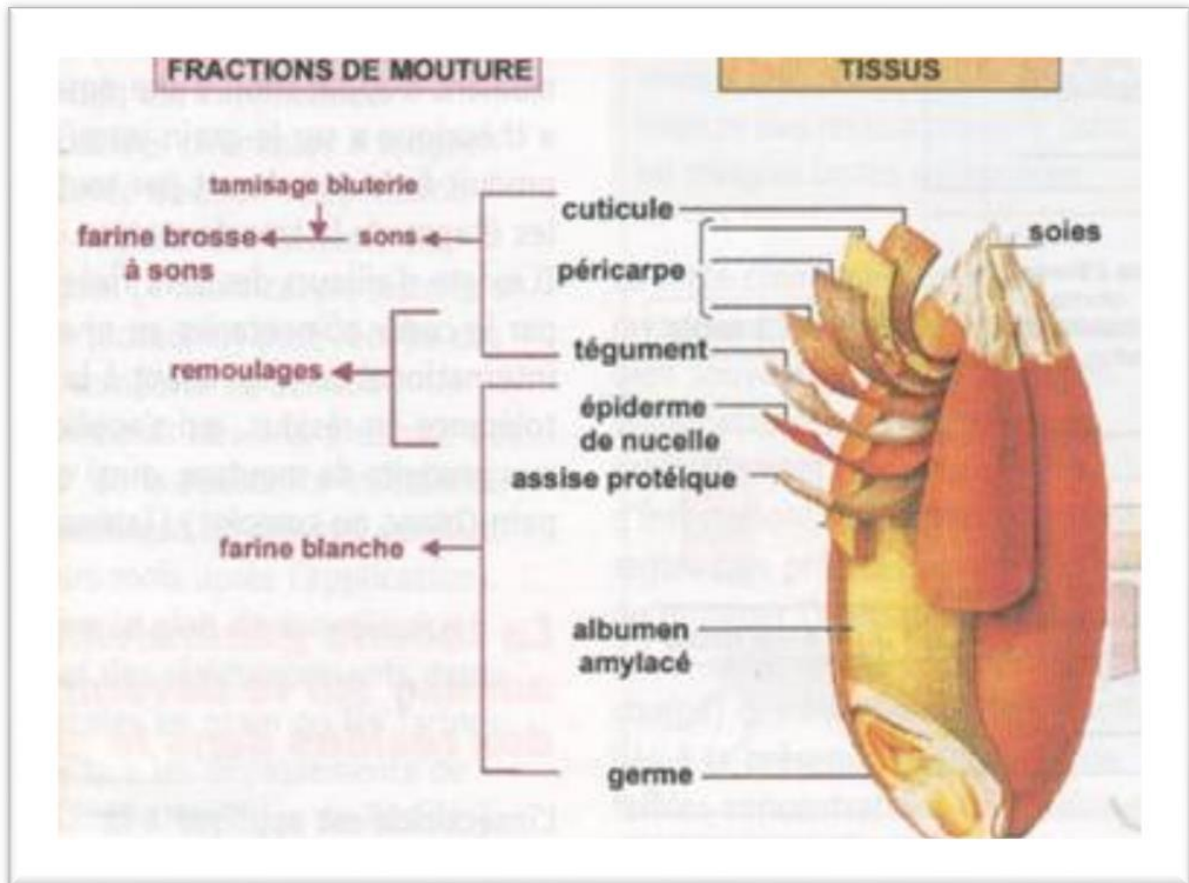


Figure 07 : Schéma d'une coupe d'un grain de blé (Fredot, 2005).

2.3.5. Le cycle de développement de blé dur

Comme toutes les céréales à paille, le blé possède un cycle biologique annuel, réparti classiquement en 2 périodes principales successives (végétative et reproductrice), subdivisées elles mêmes en phases délimitées par des stades (**Soltner, 1999**). Ces derniers sont définis par des changements morphologiques visibles et des modifications internes de la plante. La dynamique de développement des plantes et les principaux stades repères sont :

2.3.5.1 La période végétative

Elle débute par le passage du grain de l'état de vie ralentie à l'état de vie active au cours de la germination qui se traduit par l'émergence de la radicule et des racines séminales et celle de l'élongation de la coléoptile (**Bouffena et al, 2006**). Elle se divise en deux phases dont leur durée s'étale jusqu'au fin tallage avec une croissance complètement végétative.

• Phase germination-levée

Pour que le grain germe normalement, il faut que deux conditions soient réunies :

1- la graine soit capable de germer c'est-à-dire qu'elle est vivante et mure.

2- Le sol doit fournir à la graine l'eau et l'oxygène et la chaleur nécessaires pour sa germination. (**Soltner, 2005**).

• Stade levée-tallage

C'est un mode de développement propre aux graminées, il est caractérisé par 3 phases principales.

• Stade de formation du plateau de tallage

C'est le phénomène de *pré tallage* dans lequel le deuxième entre nœud qui porte le bourgeon terminal s'allongé à l'intérieur de la coléoptile, il stoppe sa montée à 2 centimètres sous la surface quelle que soit la profondeur du semis, à ce niveau il y aura l'apparition d'un renflement : c'est le futur plateau de tallage.

• Stade d'émission des talles

A l'aisselle des premières feuilles du blé des bourgeons axillaires entre alors en activité pour donner de nouvelles pousses : les talles (**Soltner, 2005 ; Gate, 1995**). Dans cette phase, la plante se base dans leur alimentation sur les ressources de la graine et l'azote du sol parce que ses besoins sont faibles en élément minéraux notamment l'azote jusqu'au stade 2-3 feuilles in (**Cherfia, 2010**). D'après (**Masle ,1981**), une alimentation azotée limitant pour la plante se manifeste simultanément par l'interruption du processus de tallage herbacé et par une réduction de la croissance des talles existantes.

2.3.5.2. La période reproductrice

C'est la formation et la naissance de l'épi. Le début de cette phase est marqué par une différenciation de l'ébauche d'épillet sur l'apex. Ce stade marque la fin de la période végétative et l'acheminement vers la fonction de reproduction (**Bouffenaar et al. 2006**).

- **Phase montaison et le gonflement**

Durant cette phase, il y a l'allongement des entre-nœuds d'un certain nombre de talles herbacées, les talles les plus âgées se trouvent couronnées par des épis alors que les talles suffisamment avancées meurent par la suite (Masle, 1982). Cette phase est marquée par un agrandissement de la demande en eau, lumière et l'azote (Gate, 1995 ; Clement *et al*, 1975). La durée de cette phase est très peu variable : 28-30 jours, elle se termine au moment de la différenciation des stigmates des fleurs (Bouffenaar *et al*, 2006). A partir de la montaison, les besoins en azote deviennent très importants et déterminent le nombre d'épis, le nombre de grain par épi et le poids maximal du grain (Hebert, 1975).

- **Phase d'épiaison et de fécondation**

Cette phase a une durée peu variable (32 jours en moyenne), c'est durant cette période que s'achève la formation des organes floraux et s'effectue la fécondation.

2.3.5.3. La période de formation et maturation des grains

- **Phase de grossissement du grain**

Durant cette phase, l'embryon se développe et ainsi l'albumen se remplit par des substances de réserve, c'est la phase laiteuse dont le grain s'écrase facilement (Bouffenaar *et al*, 2006).

- **Phase de maturation**

C'est la dernière phase du cycle végétative, la maturation correspond à l'accumulation de l'amidon dans les grains puis à leur perte d'humidité (Soltner, 2005). Le poids des grains continue d'augmenter contrairement au poids des tiges et feuilles. Elle se termine par le stade pâteux des grains (l'écrasement du grain à ce stade formant une pâte) (Bouffenaar *et al*, 2006), et en fin le stade de maturité physiologique dont le grain devient dur et accepte leur couleur jaunâtre.

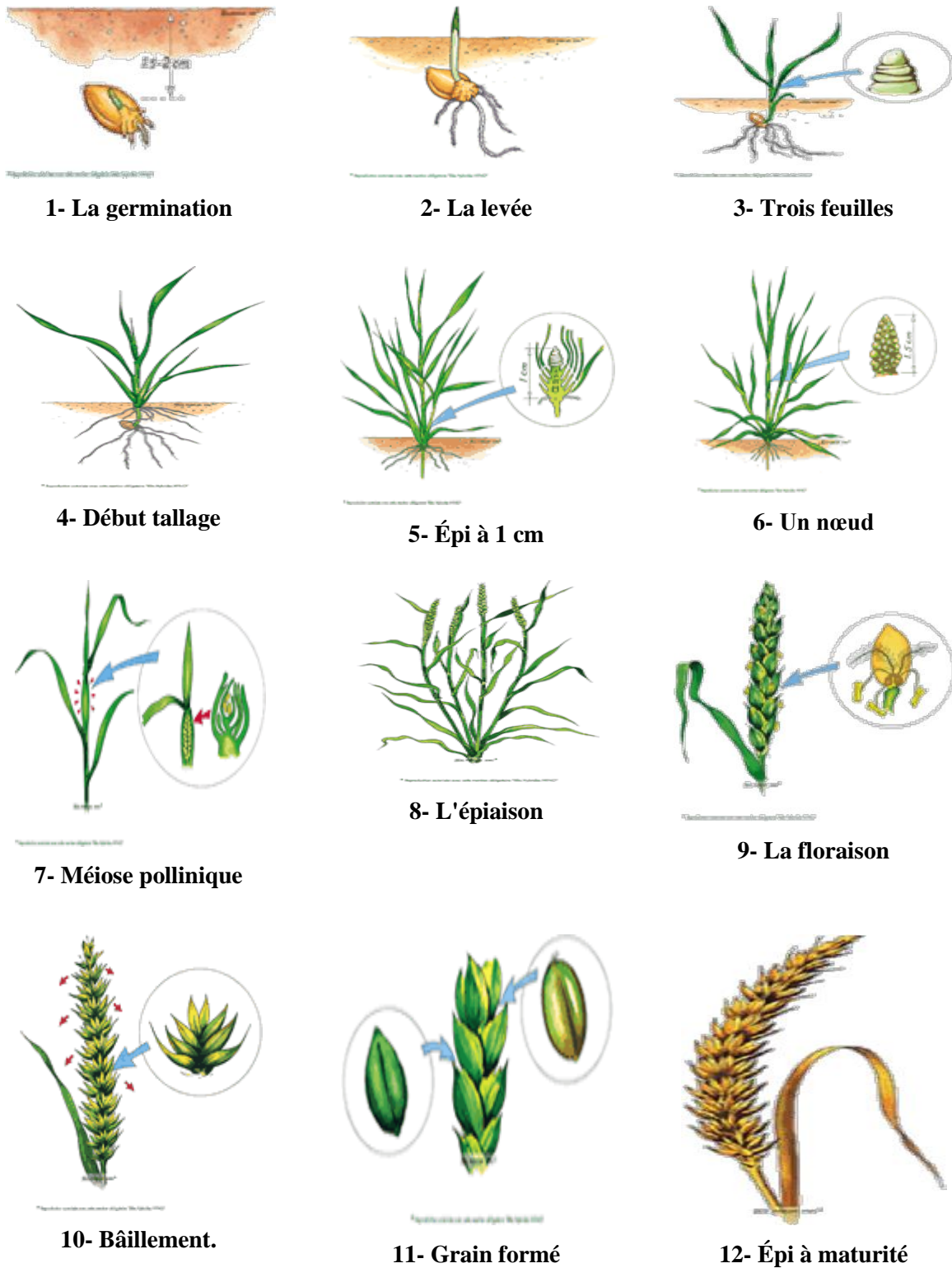


Figure 08: Les différents stades de développement du blé. (Soltner, 2005).

2.4. Caractéristiques physiologiques de blé dur

2.4.3. Les exigences du blé

2.4.3.1. Le sol

L'alimentation hydrique d'une plante ou d'un couvert végétal est gouvernée par les relations sol-plante fondées sur les caractéristiques du sol et des plantes (**Oliosio et al.2006**). Le sol est le support de la végétation, son garde-manger et son réservoir en eau (**Girard et al. 2005**). En effet, le sol agit par l'intermédiaire de ses propriétés physiques, chimiques et biologiques. Il intervient par sa composition en éléments minéraux, en matière organique et par sa structure, et jouent un rôle important dans la nutrition du végétal, déterminant ainsi l'espérance du rendement en grain. La plante, par son système racinaire en croissance, se comporte comme un ensemble de capteurs souterrains répartis spatialement jouant le rôle de surface d'échange avec le sol, et d'un système de transport de l'eau jusqu'au collet, à la surface du sol.

Les réserves en eau du sol sont définies par la réserve utile, calculée sur la profondeur maximale d'enracinement (**Oliosio et al, 2006**). La profondeur du profil du sol joue le rôle de réservoir d'eau. En absence d'obstacles, le blé colonise intensément et profondément les sols (**Nicoullaud, 1995**). Le sol constitue donc pour le végétal une retenue d'éléments nutritifs dont le niveau de disponibilité marque le rayon de développement racinaire (**Meartens et Clauzel, 1989; Bonnefoy, 2007**). Cependant, le blé s'accommode bien à la terre argilo-calcaire ou limoneuse à limono-argileuse, qui assure aux racines fasciculées du blé une grande surface de contact (**Soltner, 2000**). Par contre les sols, légers et acides, ne sont pas recommandés pour le blé dur (**Novak et al, 2006**).

2.4.3.2. L'eau

L'eau est un facteur de l'environnement qui influence la quasi-totalité des réactions physiologiques des végétaux. La littérature sur les recherches traitant les relations entre l'eau et la physiologie des plantes est riche. Les grandeurs liées au contenu en eau des tissus indiquent que l'eau est le principal constituants des végétaux, avec 60% à 80% de leur poids de matière fraîche (**Duthil, 1973; Catell, 2006**). L'eau constitue le véhicule des éléments nutritifs et assure les réactions métaboliques. Cet élément est indispensable à la croissance et au développement de la plante. En effet, l'eau et l'état d'hydratation des tissus des végétaux interviennent pour la production de matière sèche.

La réalisation des phases végétatives chez la culture du blé nécessite des besoins en eau. Ils sont exprimés par l'évapotranspiration réelle (ETR) qui est la somme de la quantité d'eau transpiration (T) par le végétal et celle évaporée du sol (Es). (**Doorenbos et Pruit,1975**) définissent les besoins en eau d'une culture par la hauteur d'eau exprimée en millimètre (mm) nécessaire pour compenser l'évapotranspiration d'une culture donnée en bon état sanitaire, cultivée sur un champ de conditions climatiques données, régie par des conditions de sols, d'eau et de fertilité non limitantes pour assurer un rendement cultural optimal.

L'évapotranspiration actuelle (ETA) de la culture est définie comme la fraction de l'évapotranspiration de référence (ET0), elle est estimée par le produit du coefficient cultural (kC) et l'évapotranspiration potentielle (ET0), $ETA = kC \times ET0$ (**Allen et al, 1998**).

L'expression du potentiel de production des génotypes de blé dur est liée à la quantité d'eau consommée par la culture au cours des phases végétatives (**Chennafi et al, 2006b**). Les besoins en eau de la culture varient de 450 à 650 mm (Baldy, 1974; FAO, 2010). Sur les hauts plateaux Sétifiens, la culture du blé dur a besoin de 672 mm au cours de son cycle de développement. Les besoins en eau décadaires sont 46 mm du stade de fin du tallage au stade de début de la montaison (mars-avril). Ils s'élèvent à 103 mm à la phase gonflement épiaison (**Chennafi et al, 2008b**).

En milieu méditerranéen semi-aride, les besoins en eau du blé s'accroissent en arrière saison, période critique de rareté de l'eau. Sur les hauts plateaux Sétifiens, seule la période d'hiver s'échappe au déficit pluviométrique. En effet, l'arrière saison coïncide avec les exigences les plus importantes, à un moment où l'eau est rare (**Kelkouli, 2000 ; Chennafi et al, 2008c**). De nombreuses études soulignent l'effet pénalisant du manque d'eau au cours du stade épiaison au stade grain laiteux pâteux. Un manque d'eau lors de la phase de reproduction engendre une chute importante du rendement.

Toutefois, les techniques culturales appropriées relatives à la préparation de lit de semence, pour créer une structure favorable à la germination et la levée de la plantule, et améliorer la disponibilité de l'humidité du sol, permettent une bonne implantation de la culture et réduisent des effets des stress au cours du cycle végétatif. De ce fait, la gestion des pratiques culturales est recommandée en milieu où l'évaporation est intense. Dans ce contexte, (**Molden et Oweis , 2007**) révèlent sous climat aride, au moins 90% des précipitations sont perdues par évaporation direct du sol, laissant seulement 10% disponible pour la transpiration.

2.4.3.3. Les températures

Le développement de la plante se réalise sur des étapes distinctes durant lesquelles se forment les composantes constitutives du rendement (Acedo, 1989). Le rendement dans un environnement donné est directement et indirectement influencé par des facteurs morphologiques, physiologiques, et environnementaux (Prasad *et al*, 2007). Le froid, la sécheresse et les fortes températures limitent la croissance et le développement des différentes composantes au cours des phases végétatives (Evans et Wardlaw, 1976). La température est la caractéristique environnementale qui contrôle le développement de la plante, elle conditionne à tout moment la physiologie du blé. Une température supérieure à 0°C est exigée pour la germination, le gel printanier affecte la formation de l'épi (Bouzerzour, 1998 ; Tahir *et al*. 1998). La germination du blé n'a lieu qu'au dessus de 0-3°C, température caractéristique du zéro de végétation (Eliard, 1974). La variabilité et l'interaction des éléments environnementaux sont à l'origine d'un rendement qui se caractérise par une basse héritabilité et une interaction génotype-environnement élevée (Jackson *et al*, 1996).

Sur les Hauts Plateaux Sétifiens, les gelées sont à craindre pendant la formation de l'épi, pour les génotypes précoces (Bouzerzour et Benmahammed, 1994). La température est d'une manière générale déterminante dans la croissance et le développement de l'apex de la plante. Elle affecte la valeur du rapport du poids sec de la matière sèche aérienne sur celui de la matière sèche racinaire. Elle intervient dans la régulation l'ouverture des stomates qui intervient entre 20 et 30°C (Hazmoune, 2006). Sous conditions optimales une somme de température de 150°C est nécessaire pour accomplir la phase semis - levée, 500°C pour la phase levée- fin tallage et 850°C pour la phase épiaison – maturité physiologique (Soltner, 1985).

Tableau 04: exigences du blé en somme de températures selon les stades physiologiques.

Les phases	Somme des températures (C°)
Semis levée	150
Levée fin tallage	500
Montaison floraison	850
Floraison maturation	850
Semis maturation	2350

2.5. Importance du blé dur dans le monde et en Algérie

Le blé occupe la première place dans la production mondiale et la deuxième après le riz, comme source de nourriture pour les populations humaines, il assure 15% de leurs besoins énergétiques. Il représente 30% de la production mondiale des céréales, 20% de la ration alimentaire consommée par la population mondiale (Bajji, 1999 in Bouakez et Hmadouche, 2015). Environ 80 % des superficies cultivées en blés dans le monde sont réservées au blé dur dont 70 % sont localisée en conditions méditerranéennes (FAOSTAT, 2007 in Douib, 2013).

L'Allemagne, l'Australie, le Pakistan, le Canada, la France, les Etats-Unis, la Russie et l'Inde sont les premiers producteurs durant l'année 2018 (FAOSTAT, 2018).

La production mondiale de blé fut en croissance constante durant les cinquante dernières années et s'élève pour la campagne 2010-2011 à 691,5 millions de tonnes (**Terrones et Burny, 2012**). La consommation totale est stable et se maintient à 688 millions de tonnes en 2014 du fait d'une contraction de 2 % que connaît l'utilisation aux fins de l'alimentation animale et 1,4 % de l'utilisation aux fins de l'alimentation humaine.

En Algérie, les céréales et plus particulièrement le blé sont très importantes sur le plan agronomique et économique que social, de même qu'elles occupent une place privilégiée dans les habitudes alimentaires des populations aussi bien dans les milieux ruraux qu'urbains (**Sanah, 2015**).

Le blé dur, est la première céréale cultivée dans le pays. En termes de superficies, il occupe plus de 2 millions d'hectares (**FAO STAT, 2018**). La production algérienne de blé dur est très instable d'une année à l'autre (**Mazouz, 2006**). Elle est très fortement dépendante des conditions climatiques.

Ainsi, la production nationale qui avoisine les 3.98 millions de tonnes (**FAO, 2018**), demeure tout de même loin du niveau réel de la consommation, elle ne couvre que 30 à 35% des besoins (**Haddad et al, 2016**). Cette faiblesse de production associée à une forte demande alimentaire fait que le pays se présente comme un gros importateur potentiel. Elle est due à des contraintes abiotiques (pluviométrie surtout), biotiques (adventices surtout) et humaines (itinéraires techniques appliqués etc...) (**Amrouche et Mesbah 2017**).

Chapitre 03 :
Le Zinc dans les végétaux

3.1. Généralités sur les métaux lourds

Les métaux lourds constituent un groupe d'éléments très différent. Certains métaux sont des éléments nutritifs essentiels, d'autres connus comme étant toxiques. Un aspect particulier est que tous les métaux lourds sont naturellement présents dans le sol. Des métaux lourds tels que le cuivre, le nickel, le chrome et le zinc sont utilisés à grande échelle dans toutes sortes d'objets courants et de matériaux de construction, sans que cela ne représente de risque pour l'utilisateur. Certains métaux sont essentiels pour la santé et sont ajoutés à des suppléments de vitamines. Une carence entraîne des symptômes de maladie. D'autre part, il existe des exemples d'effets graves sur la santé et même d'intoxication entraînant la mort (**Jaap, 2010**).

Les définitions des métaux lourds sont multiples et dépendent du contexte dans lequel on se situe ainsi que de l'objectif de l'étude à réaliser. D'un point de vue purement scientifique et technique, les métaux lourds peuvent être également définis comme : tout métal ayant une densité supérieure à 5 ; -tout métal ayant un numéro atomique élevé, en général supérieur à celui du Sodium (Z=11) ; -tout métal pouvant être toxique pour les systèmes biologiques (**Jaap, 2010**).

Dans les sciences environnementales, les métaux lourds associés aux notions de pollution et de toxicité sont généralement : l'arsenic (As), le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le mercure (Hg), le manganèse (Mn), le nickel (Ni), le plomb (Pb), l'étain (Sn), le zinc (Zn) (**Jaap, 2010**).

3.1.1. Origine naturelle

La présence des ETM dans les sols est due à différentes source exogènes. Les concentrations en ETM dits endogènes, géologique et pédologique du constituent le fond pédo-géochimique naturel. Ce fond varie grandement en fo nature du matériau parental des sols, de l' la pédogenèse (**Baize, 2009**).

3.1.2. Origine anthropique

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

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

3.2. Le Zinc

3.2.1. Le zinc dans le sol

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

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

La teneur en zinc total des sols est liée à celle de la roche mère. Les sols dérivant de roches ignées basiques peuvent être bien pourvus en zinc. Les sols sur roches mère sédimentaires siliceuses sont plutôt pauvres en zinc. L'intensité de l'adsorption de Zn tend à croître avec l'élévation du pH, et la mobilité de Zn se trouve nettement diminuée au-dessus de pH 7 (**Loué, 1993**).

3.2.2. Le zinc dans la plante

3.2.2.1. L'absorption et distribution

D'anciens travaux indiquaient que le zinc est assimilé de façon majoritaire sous la forme Zn^{2+} , qui est également la forme sous laquelle il est transporté dans la plante. **Kabata-Pendias et Pendias (1992)** avaient ainsi rapporté une relation linéaire entre la concentration dans la solution du sol, ou le sol, et la concentration dans la plante. Puis, les travaux de **Von Wiren et al. (1995)** ont proposé deux voies pour l'assimilation du zinc par les graminées : le transport du cation libre ou l'assimilation sous forme chélatée aux phytosidérophores. Plus récemment, les

gènes codant pour les transporteurs du zinc, appelés de façon générale ZIP (Zinc-regulated transporters, Iron-regulated transporter-like Protein), ont été identifiés et séquencés. Ces travaux ont été conduits sur des plantes hyperaccumulatrices ou non (*Thlaspi caerulescens* et *Arabidopsis thaliana*) par différentes équipes (**Grotz et al., 1998 ; Lasat et al., 1999 ; Van der Zaal et al., 1999**). Depuis, il a été montré que ces ZIP sont également impliqués dans le transport d'autres métaux (**Guerinot, 2000 ; Wintz et al., 2003**).

Le zinc est plus mobile au sein de la plante que le cuivre, cependant, les racines contiennent de plus grandes quantités que les parties aériennes, en particulier lorsque les apports sont importants. Dans le cas d'une consommation de luxe, le zinc peut être déplacé des racines vers les parties aériennes où ils se concentrent dans les chloroplastes, les vacuoles et les membranes cellulaires. Lors de la translocation, le zinc est chélaté à des acides organiques (**Tremel-Schaub et Feix, 2005**).

Mais la mobilité du Zn vers les tissus les plus jeunes est nettement plus faible encore dans les plantes déficientes en Zn. L'interaction entre le zinc et le phosphore sur la translocation du zinc a été rapportée par différents auteurs. Ainsi, des déficiences en zinc peuvent être induites avec des faibles doses de phosphore du fait d'une inhibition de la translocation du zinc plus qu'une réduction de l'absorption et de la teneur dans les racines (**Tremel-Schaub et Feix, 2005**).

D'autre part, certaines interactions entre éléments peuvent affecter les transports de Zn ; ce sont essentiellement des relations Fe/Zn et Cu/Zn et, P/Zn. Il est incontestable que les plantes très fortement alimentées en P présentent des troubles dans le transport et le métabolisme de Zn (**Loué, 1993**).

3.2.2.2. Rôle physiologique

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

Le zinc entre dans la composition d'un très grand nombre d'enzymes (plus de 300), au sein desquelles il remplit trois types de fonctions : catalytiques, co-catalytiques ou structurales. Le zinc est particulièrement important pour le métabolisme des sucres, des protéines et des phosphates, mais il joue également un rôle par rapport à l'ADN, via des métalloprotéines

impliquées dans la réplication et la transcription de l'ADN, et donc la régulation de l'expression des gènes. De plus, le zinc influence également l'intégrité et la perméabilité des membranes, et permet la protection des lipides et protéines membranaires du stress oxydant (Marcato, 2007).

3.2.2.3. Répartition du Zn dans les racines et les sommités des plantes

Le Zn est un micronutriment essentiel impliqué dans une grande variété de processus physiologiques. L'absorption de Zn varie selon les espèces végétales et est déterminée par la composition et la concentration des milieux de croissance. L'absorption de Zn se produit sous forme de cation divalent ou de complexes avec des ligands organiques et présente un schéma linéaire avec sa concentration dans la solution nutritive des sols, les racines le chargent via le xylème vers les tissus des pousses. La translocation du Zn vers le xylème des racines se produit via le symplaste et l'apoplaste, mais ses niveaux élevés ont également été détectés dans le phloème, indiquant que ce métal est translocalisé à la fois dans les tissus du xylème et du phloème (Hafeez *et al.*, 2013).

3.3.1. Efficacité du zinc

L'efficacité en Zn peut être définie comme "la capacité des plantes à maintenir des rendements élevés dans des sols à faible disponibilité en Zn". De nombreux mécanismes sont peut-être impliqués dans l'efficacité du Zn. Selon la nature des expériences et des espèces végétales, les mécanismes les plus significatifs peuvent être l'utilisation du Zn dans les tissus et l'absorption du Zn. En cas de carence en Zn, les génotypes efficaces en Zn ont une activité élevée de l'anhydrase Cu/Zn et de l'anhydrase carbonique. L'efficacité et l'absorption du Zn sont très sensibles à la croissance des plantes et sa teneur totale dans le sol est influencée par plusieurs propriétés du sol telles que le pH, le CaCO₃, la teneur en matière organique, la culture, ainsi que les cultivars et les interactions nutritives dans l'environnement du sol. Il n'y a pas de mécanisme précis utilisé pour déterminer l'efficacité du Zn est disponible jusqu'à présent; cependant, plusieurs cultures ont été évaluées pour leur efficacité en Zn comme: les haricots, le blé et le riz (Hafeez *et al.*, 2013).

3.3.2. Seuils critiques de Zn

Les seuils critiques qui séparent les sols carencés des autres varient selon les cultures. Ces variations dépendent de leur prédisposition différentielle à la carence en Zn. Ces seuils changent également pour une même culture pratiquée sur différents sols étant donné que

plusieurs facteurs influent sur l'assimilabilité des oligo-éléments. Ces seuils critiques doivent donc être appliqués à une seule culture et établis en tenant compte des conditions pédologiques et écologiques locales.

En dépit de ces variations, on considère en Inde qu'un sol est carencé s'il contient moins de 0,6 ppm de DTPA-Zn et la fumure au zinc est recommandée sur la plupart des cultures et sur des sols très différents. De même, aux Etats-Unis, si un sol contient moins de 0,6 ppm de DTPA-Zn sa teneur en Zn est jugée faible et on s'attend à ce qu'au moins les cultures sensibles répondent à la fertilisation au Zn. Dans ces deux pays, on n'a pas obtenu de réponse sur les sols qui contenaient plus de 1,0 ppm de DTPA-Zn. Il subsiste des doutes quant à l'utilité d'une fumure au Zn lorsque les valeurs oscillent entre 0,5 et 1,0 ppm de DTPA-Zn (**Katyal et Randhawa, 1986**).

3.3.3. Fertilisation au Zinc

Selon **Katyal et Randhawa 1986**). Il existe plusieurs sources de produits contenant du Zn, à savoir, des sources minérales et des sources chélatées (synthétiques et naturelles), tableau 05.

a. Sulfate de zinc

On peut l'appliquer au sol ou le pulvériser sur les feuilles. Il est soluble dans l'eau, facilement assimilable par les cultures de plein champ et peu coûteux. Selon l'eau de cristallisation, sa teneur en zinc varie entre 23 (heptahydrate) et 36 (monohydrate) pour cent. Il peut se présenter sous forme de poudre, de cristaux ou de granules.

b. Oxyde de zinc

Il est moins soluble que le sulfate de zinc. On l'utilise souvent dans les pulvérisations nutritionnelles et les mélanges avec des macroéléments. C'est un composé du zinc très performant et peu coûteux qui contient entre 60 et 80 % de cet élément.

On a moins souvent recours aux autres sels de zinc énumérés au tableau 05 pour combattre la carence en zinc.

Tableau 05 : Produits contenant du zinc (**Katyal et Randhawa, 1986**).

Nom courant commercial	Formule chimique	Teneur en zinc (%)
Sources minérales		
Sulfate de zinc	ZnSO ₄ .7H ₂ O	23
Sulfate de zinc	ZnSO ₄ , H ₂ O	36
Oxyde de zinc	ZnO	60 - 80
Chlorure de zinc	Zn Cl ₂	45 – 52
Carbonate do zinc	Zn CO ₃	56
Sulfate-oxyde de zinc	ZnO - Zn SO ₄	55
Phosphate d'ammonium de zinc	Zn (NH ₄) PO ₄	37
Sphalérite	ZnS	60
Poudre de zinc	-	98.4
Zinc fritté	-	4 (variable)
Sources chélatées		
Synthétiques	EDTA – Na ₂ Zn	14
	HEDTA – NaZn	8
	NTA - Na Zn	13
Naturelles	Sulfonate de lignine-Zn	5
	Polyflavonolde-Zn	10

c. Chélates de zinc

Ce sont des complexes organiques composés de Zn, d'EDTA (acide éthylène-diamine-tétracétique) et d'autres agents chélateurs. L'EDTA-Zn contient 14 pour cent de Zn. Les chélates de Zn sont généralement au moins cinq fois plus efficaces que les sels minéraux (sauf pour le riz inondé) tout en ayant la même teneur en Zn. Le Zn chélaté est toutefois de 15 à 20 fois plus coûteux, ce qui explique son faible emploi (**Katyal et Randhawa, 1986**).

d. Zinc fritté

On le prépare en faisant fondre les sels de zinc dans une matrice de verre ou de phosphate. En raison de leur hyposolubilité, les frittés ne sont pas lessivés et se maintiennent ainsi très longtemps. Elles sont toutefois plus coûteuses que les sels minéraux (**Katyal et Randhawa, 1986**).

e. Mélanges de zinc et d'engrais

Au cours des dernières années, des macroéléments produits par l'industrie ont été recouverts de Zn ou incorporés à cet élément. Cette innovation vise à assurer une répartition uniforme des microéléments sur le terrain et à réduire les coûts d'application (**Katyal et Randhawa, 1986**).

f. Minéraux et sous-produits

Divers sous-produits des industries minière et manufacturière contenant du Zn ont également été utilisés. Dans ces produits, le zinc (tel que la sphalérite minérale) est très peu soluble (**Katyal et Randhawa, 1986**).

g. Mélanges d'oligo-éléments

Dans certains pays, toute une gamme de produits brevetés renfermant du Zn et souvent d'autres oligo-éléments sont également proposés sur le marché. Parfois, ils entrent dans la formule des insecticides et autres pesticides (**Katyal et Randhawa, 1986**).

h. Engrais organiques

Selon **Katyal et Randhawa (1986)**, les engrais organiques possèdent du Zn et plusieurs autres éléments fertilisants. Leur composition est extrêmement variable. Ils sont rarement utilisés comme une source de Zn, mais leur application régulière freine l'appauvrissement du sol en Zn causé par des cultures continues. Les données coordonné sur les oligo-éléments montrent de façon convaincante que le Zn assimilable s'est accru de 37 pour cent après épandage d'engrais organiques pendant 10 ans, alors que, sans cet apport. La quantité initiale de zinc assimilable a été réduite de moitié.

3.3.4. La déficience en Zn et sa correction

La déficience en zinc peut être vue dans les sols érodées, calcaires et acides aux intempéries. Elle est souvent accompagnée d'une carence en fer dans les sols calcaires. La carence en zinc dans ces sols est liée à l'adsorption de zinc de la solution par des particules argilo-calcaires du sol. Dans les sols érodés, la déficience en zinc est causée par une carence en matière organique. La carence en zinc peut être aussi liée aux conditions météorologiques, elle augmente dans des conditions météorologiques froides et humides. Elle peut être due à la croissance limitée des racines dans les sols frais, ou à la réduction de l'activité de

microorganismes et la réduction de la libération de zinc à partir de matières organiques (Alam *et al.*, 2010; Abdou *et al.*, 2011 ; Mousavi, 2011).

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

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

a. Mécanismes de défense déclenchés par une carence en Zn

Les carences en nutriments rendent généralement les plantes plus sensibles aux ravageurs et aux agents pathogènes. Néanmoins, certaines voies de signalisation déclenchées en réponse à une pénurie de nutriments renforcent le système immunitaire des plantes.

Une telle activation de la défense impliquant des profils d'expression génique modifiés et une production supplémentaire de métabolites a été spécifiquement rapportée pour les conditions déficientes en Fe et Mn (Rodríguez - Celma *et al.*, 2013; Fourcroy *et al.*, 2014; Schmid *et al.*, 2014; Rodríguez-Celma *et al.*, 2016). Les informations concernant la carence en Zn sont encore rares, mais certaines études indiquent que les mécanismes de défense déclenchés par la carence en Zn sont encore rares, mais certaines études indiquent que les voies de signalisation des conditions déficientes en Zn peuvent déclencher des réponses de défense des plantes.

Les carences en nutriments rendent généralement les plantes plus sensibles aux ravageurs et aux agents pathogènes. Néanmoins, certaines voies de signalisation déclenchées en réponse à une pénurie de nutriments renforcent le système immunitaire des plantes.

Les défensines (DFN) sont connues pour leur implication dans le système de défense immunitaire inné (Stotz *et al.*, 2009). Récemment, une expression accrue de trois protéines de type DFN chez *A. thaliana* cultivées dans des conditions déficientes en Zn a été trouvée (Inaba *et al.*, 2015). Ces protéines étaient sous le contrôle direct de la région de base leucine-gène du facteur de transcription zipper bZIP19. Ce facteur de transcription joue un rôle dans les réponses d'appauvrissement en Zn en régulant l'expression du gène du transporteur ZIP (Assunção *et al.*, 2010). Les BZIPS régulent les processus clés chez les plantes et les animaux. Chez les plantes, les BZIPS participent entre autres processus, en réponse à un stress abiotique et biotique (Noman *et al.*, 2019). Les TF bZIP sont des acteurs clés de l'immunité innée des plantes régulant les gènes associés à l'immunité déclenchée par PAMP, à l'immunité et aux réseaux de signalisation hormonaux (Noman *et al.*, 2017). Bien que les DFN végétaux soient également impliqués dans la croissance et le développement des plantes (Stoltz *et al.*, 2009), l'exploration et la caractérisation fonctionnelle de nouveaux TF bZIP chez la plante pourraient être des outils utiles pour améliorer la résistance des cultures contre les agents pathogènes et les stress environnementaux (Inaba *et al.*, 2015).

b. Mécanismes de défense contre le stress biotique dans des conditions riches en zinc

De nombreuses études ont signalé une résistance accrue des plantes aux maladies et aux ravageurs après des concentrations supplémentaires de Zn, ou lorsqu'un mélange de micronutriments comprenant du Zn était appliqué (Graham et Webb, 1991; Dordas, 2008; Chavez-Dulanto *et al.*, 2018). En fait, plusieurs formules phytosanitaires sont basées sur des complexes organiques de Zn. Dans cette situation, les microorganismes et les herbivores peuvent être directement affectés par l'effet toxique du zinc plutôt que par les réponses métaboliques des plantes (Graham et Webb, 1991).

3.4.1. Niveaux critiques de zinc dans les plantes

La carence en zinc est l'une des contraintes majeures de la production alimentaire mondiale. Il est donc essentiel d'identifier les zones déficientes en Zn et les différentes causes de carence. Cela aiderait à planifier les stratégies appropriées pour corriger ces carences en zinc. Bien que le Zn soit utilisé comme engrais, une compréhension des méthodes efficaces et

économiques pour corriger la carence en Zn à long terme et dans un système de culture spécifique est souhaitable. Il a été rapporté par **(Dobermann et Fairhurst, 2000)** T qu'il existe une forte relation entre la concentration de Zn dans les tissus la croissance et le rendement des cultures. Les limites critiques du Zn dans les plantes indiquent une carence comme suggéré par **(Katyal, Randhawa, 1983)** sont: < 10 mg kg⁻¹ carence définitive en Zn, 10-15 mg kg⁻¹ très probable, 15-20 mg kg⁻¹ probable et >20 mg kg⁻¹ improbable (suffisant). Dans la plupart des espèces cultivées, la suffisance foliaire en Zn varie de 15 à 50 ppm dans la matière sèche des plantes matures et, dans la plupart des cas, 15 ppm de Zn est considérée comme une valeur critique **(Hafeez et al., 2013)**.

3.4.2. Toxicité du zinc

Le seuil de toxicité du Zn varie selon les espèces végétales, le temps d'exposition au stress Zn et la composition du milieu de croissance nutritif. L'inhibition de la croissance des plantes s'étend chez *E. maculata* et *E. urophylla* de cinq semaines après l'ajout de 400-1600 mM de ZnSO₄, alors que *Pisum sativum* est devenu inhibé après une application de 1000 µM de Zn. La photosynthèse est fortement affectée chez les plantes exposées à un excès de métaux lourds. Des concentrations élevées de Zn dans les plantes peuvent provoquer une phytotoxicité. Le rendement peut être réduit lorsque les concentrations de Zn dans les feuilles de la plante atteignent environ 300 à 1000 µg de Zn g⁻¹. Une concentration critique typique de phytotoxicité est d'environ 500 µg de Zn g⁻¹. La meilleure façon d'identifier une carence en Zn dans les cultures est la détermination des concentrations de Zn dans les tissus, cependant, les résultats doivent être interprétés en tenant pleinement compte de l'interaction du Zn avec d'autres nutriments, car la carence d'un nutriment peut entraîner une accumulation excessive d'autres nutriments par une plante **(Hafeez et al., 2013)**.

Selon **Baize (1997)**, les valeurs courantes trouvées dans les sols de toutes granulométries varient de 10-100ppm, des valeurs de 100- 250 ppm du Zn dans les sols peuvent causer des anomalies modérées, alors qu'au delà de 250ppm jusqu'à 3800 ppm, peuvent causer de fortes anomalies chez les végétaux, tableau 06.

Tableau 06: concentrations en métaux lourds (ppm) observées pour divers horizons de sols « ordinaires » de toutes granulométries selon (Baize 1997).

Élément	Valeurs courantes	Anomalies naturelles modérées	Fortes anomalies naturelles
As	1.0-25.0	30.0-60.0	60-230
Cd	0.05-0.45	0.70-2.0	2.0-7.0
Cr	10-90	90-150	150-534
Co	2-23	23-90	105-148
Cu	2-20	20-62	-
Hg	0.02-0.20	0.20-0.45	-
Ni	2-60	60-130	130-480
Pb	9-50	60-90	100-3000
Se	0.10-0.70	0.8-2.0	2.0-4.5
Tl	0.10-1.7	2.5-4.4	7.0-55.0
Zn	10-100	100-250	250-3800

3.4.3. Effet du zinc sur l'activité microbienne :

Les microorganismes ont besoin de divers nutriments pour leur croissance et leur métabolisme. Parmi les nutriments, le Zn est un élément présent dans le système enzymatique en tant que cofacteur et activateur mental de nombreuses enzymes. Le zinc pourrait limiter la croissance des bactéries à des niveaux plus élevés (>13,60 mg kg⁻¹). De plus, la croissance cellulaire ainsi que les populations microbiennes et leur activité dans le sol ont été gravement affectées par des niveaux élevés de Zn (Hafeez *et al.*, 2013).

3.4.4. L'excès de zinc et sa correction

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

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

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

Chapitre 04 :
Matériel et méthodes

4.1. Objectif de l'expérimentation

L'objectif de cette étude, est de déterminer le seuil des doses en zinc, tolérées par le Blé dur et la tomate (*Lycopersicum esculentum*), et ce au stade germination.

4.2. Matériel végétal

Le matériel végétal utilisé dans cette expérimentation a été des graines de la Tomate (variété saint pierre) d'Origin commercial acheté en 2021 et le Blé dur (variété Siméto) obtenu de l'OAIC en 2022, Elle est utilisée par les agriculteurs de la région de Laghouat.

4.3. Préparation des solutions du métal lourd testé (Zn)

Nous avons préparé une solution mère de Zn, en pesant 1,87 g/l de ZnCl₂ dissous dans l'eau distillée. Nous avons dilué cette solution à chaque fois pour obtenir les concentrations suivantes : 0,05g/l, 0,1 g/l, 0,3g/l et 0,5g/l de Zn. La solution dépourvue du Zn est considérée comme témoin (0 g/l).

Nous avons choisi ces doses par référence aux normes indiquée par **(Denis Baize, 1997)** en tableau 06, précisant les doses du Zn dans le sol qui provoquent des fortes anomalies chez les végétaux.

4.4. Dispositif expérimental de l'essai de la germination

Le dispositif expérimental adopté est une randomisation totale à deux facteurs étudiés, le facteur espèce à 2 niveaux (le Blé dur et la tomate) et le facteur dose de Zn à 5 niveaux (0g/l, 0.05g/l, 0.1 g/l, 0.3 g/l et 0.5 g/l).

Selon la disponibilité des graines, nous avons mis dans chaque boite de Pétri 10 graines pour les deux espèces. Le schéma du dispositif expérimental est présenté dans la figure 09.

Doses du Zn (5 niveaux)					
Espèce	0g/l	0.05g/l	0.1g/l	0.3 g/l	0.5 g/l
Espèce 1 : <i>La Tomate</i>	10	10	10	10	10
	10	10	10	10	10
	10	10	10	10	10
	10	10	10	10	10
Espèce 2 : <i>Le Blé dur</i>	10	10	10	10	10
	10	10	10	10	10
	10	10	10	10	10
	10	10	10	10	10

Figure 09 : Schéma du dispositif expérimental adopté.

Une fois les graines déposées dans les boîtes, nous avons arrosé les graines avec 5 ml de chaque solution de Zn. Après installation du dispositif expérimental chez les deux espèces, ce dernier est présenté dans la fig 10 et la fig 11. Toutes les graines ont été mises à germer dans une température de 25°C, un comptage journalier des graines germées a été réalisé durant 08 jours de suivi, jusqu'à l'arrêt de la germination.

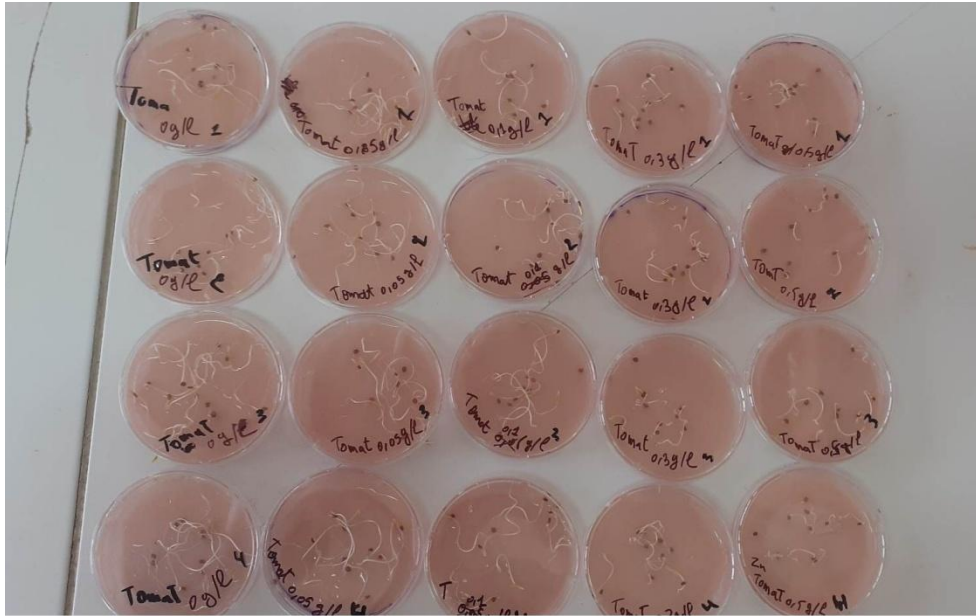


Figure 10 : Photo du dispositif expérimental de *la tomate*

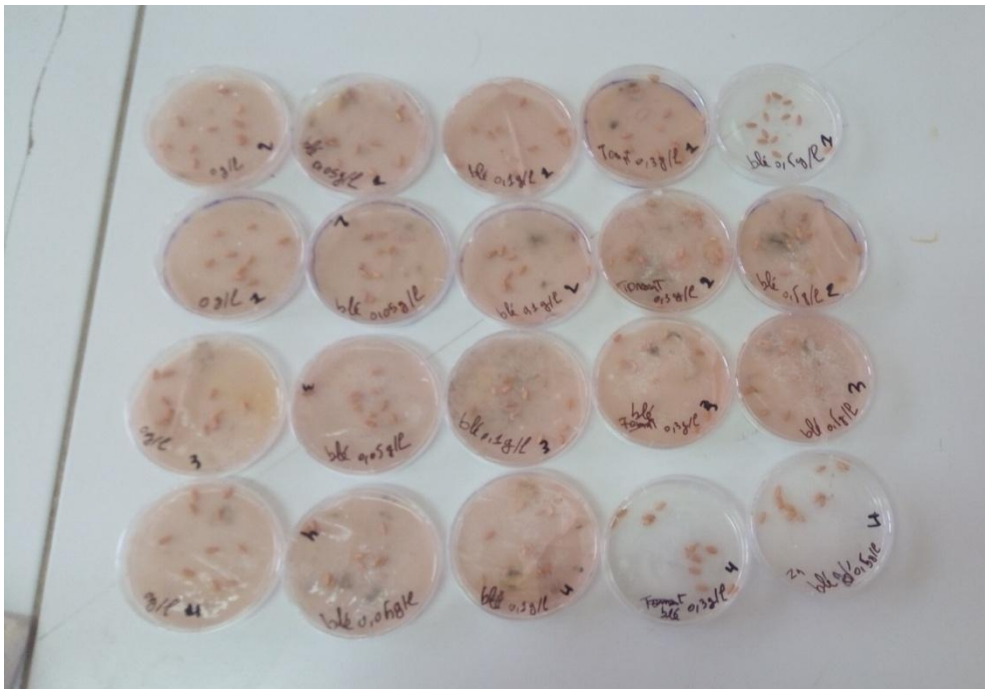


Figure 11 : Photo du dispositif expérimental du *Blé dur*

4.5. Les paramètres mesurés :

Les paramètres retenus pour évaluer le comportement des graines des deux espèces les différentes doses de Zn au cours de la germination ont été :

4.5.1. Calcul de la faculté de germination (FG)

Après 08 jours, l'expérience a été arrêtée et le pourcentage de germination final des graines germées a été calculé. Le taux de germination est exprimé par le rapport du nombre des graines germées sur le nombre total et initial des graines (Come 1970). Le pourcentage de germination des graines pour chaque boîte de Pétri est déterminé selon la formule suivante :

$$FG (\%) = \left(\frac{\text{Nombre de graines germées}}{\text{Nombre totale de graines}} \right) * 100$$

FG : Faculté de la germination.

4.5.2. La cinétique de la germination

Elle correspond à la courbe de l'évolution du taux quotidien cumulé de germination pendant une période donnée, calculé sur la base du nombre des graines nouvellement germées à chaque observation (Hajlaoui et al. 2007).

4.5.3. La durée médiane de la germination

Cette durée peut être calculée par le temps moyen de germination (le temps au bout duquel on atteint 50% des graines germées), il est donné selon la formule suivante (Côme, 1970).

$$\text{Durée médiane} = T_1 + \left[\frac{0.5 - G_1}{(G_2 - G_1)} \right] \times (T_2 - T_1)$$

Avec :

G1 = pourcentage cumulé des graines germées dont la valeur est la plus proche de 50% par valeur inférieure.

T1= le nombre de jours correspondant à G1

G2 = pourcentage cumulé des graines germées dont la valeur est la plus proche de 50% par valeur supérieure.

T2= le nombre de jours correspondant à G2

4.5.4. L'indice de vigueur de semis (SVI)

Selon **Abdul-Baki (1973)**, l'indice de vigueur de semis est calculé par la formule suivante:

$$\text{L'indice de vigueur de semis (SVI)} = (L_r + L_s) \times GP$$

Avec :

L_r: la longueur de racine (cm).

L_s: la longueur de la pousse (cm).

GP : pourcentage de germination des graines.

Dans la fig.12 et la fig.13, nous avons présenté la méthode adoptée pour mesurer, la longueur des racines et des parties aériennes sur papier millimétré.

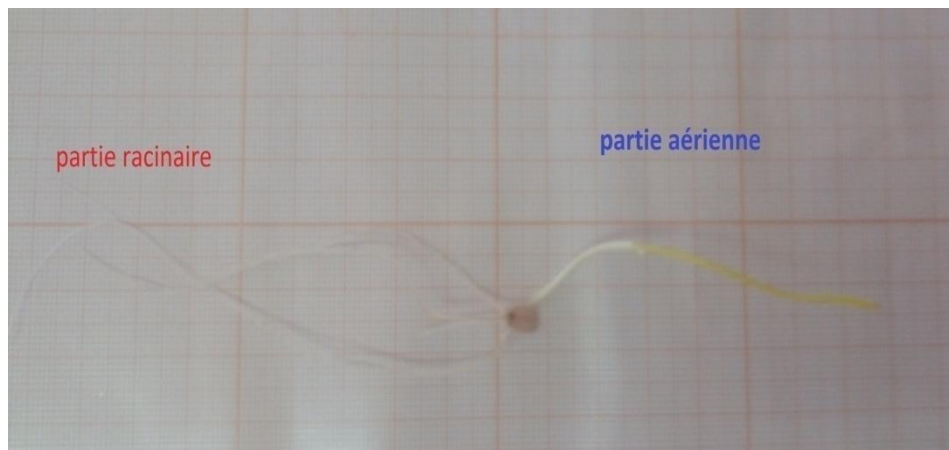


Figure 12: mesure de la longueur de la racine et de la pousse après 08 jours de La germination des graines de *le Blé dur* (**originale, 2023**).



Figure 13 : mesure de la longueur de la radicule et de la pousse après 08 jours de La germination des graines du *la tomate* (**originale, 2023**).

4.6. Analyses statistiques

Nous avons traité les données enregistrées avec le Logiciel XLSAT (version 2016), Nous avons réalisé le test ANOVA à deux facteurs étudiés (effet de la dose du métal lourd et effet de l'espèce), au seuil de 5%, pour faire une comparaison entre les moyennes. Le test Tukey a été réalisé pour déterminer les groupements statistiques. Et puisque les répétitions sont inférieures à 30, Nous avons testé la normalité avec le test non paramétrique de Shapiro-Wilk.

Chapitre 05 :
Résultat et Discussion

5.1. Résultats

5.1.1. Effet du Zinc sur les paramètres de germination de *la tomate (Lycopersicum esculentum)* et le *Blé dur (Triticum durum)*

5.1.1.1. Effet du Zinc sur la cinétique de germination de *la tomate (Lycopersicum esculentum)* et le *Blé dur (Triticum durum)*

Les résultats de la cinétique de germination des graines de *Blé dur* sous l'effet des doses du Zinc sont présentés dans la fig 14.

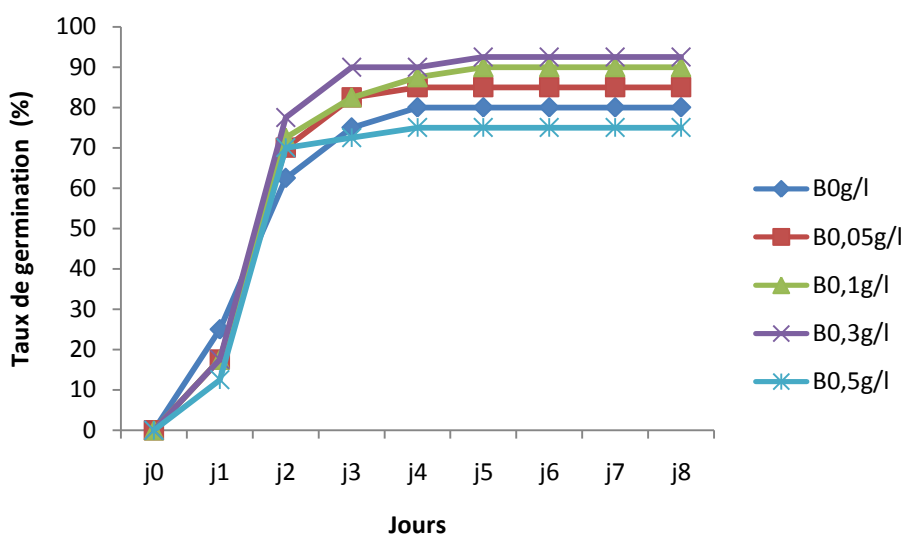


Figure 14: La cinétique de germination de *Blé dur* par jour sous l'effet du Zinc.

Pour toutes les doses testées, les graines ont atteint leur maximum de germination au bout de 05 jours, Nous avons constaté que la cinétique de germination à été différente. La cinétique de germination des graines la plus lente à été constatée chez le doses de (0,5g/l)et 0g/l du zinc qui ont atteint leur maximum en 4 jours (FG :70%), Par ailleurs la cinétique la plus rapide a été observée chez les graines sous les doses 0.3g/l suivi de 0,1 g/l de Zn qui ont donné 90% de germination au bout de 3 jours . Les graines sous la dose 0,05g/l ont réagi d'une façon intermédiaire.

Les résultats de la cinétique de germination des graines du *la tomate (lycopersicum esculentum)* Sous l'effet des doses du Zinc sont présentés dans la fig 15.

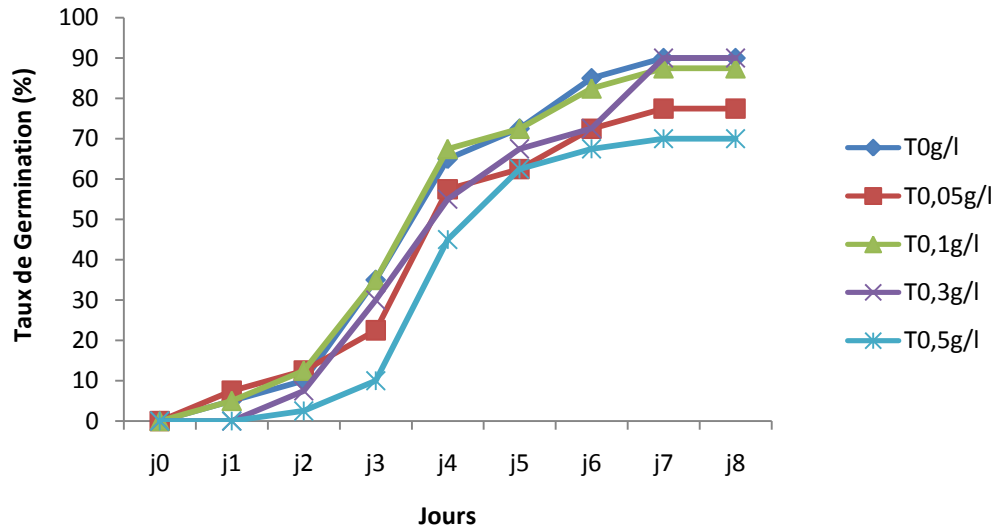


Figure 15: La cinétique de germination de la tomate (*Lycopersicum esculentum*) par jour sous l'effet du Zinc.

Pour toutes les doses du zinc, les graines de la tomate ont atteint leur maximum de germination au bout de 07 jours. Nous avons constaté que la cinétique de germination a été différente. La cinétique de germination des graines de tomate la plus lente a été constatée chez la dose de 0,5g/l du zinc, leur maximum de germination a été atteint en 7 jours avec un taux de 70%. Par ailleurs la cinétique la plus rapide a été observée chez les graines sous les doses 0g/l suivi de 0,1 g/l de Zn qui ont atteint le taux de 70% en 4 jours et 90% en 9 jours. Les graines sous les autres doses (0,05g/l, et 0,3g/l) ont réagi d'une façon intermédiaire.

5.1.1.2. Effet du Zinc sur le taux de germination de La tomate et le blé dur

Les résultats du taux de germination final des graines des espèces: *la tomate et le Blé dur*, sous l'effet des doses du Zinc sont présentés dans la fig 16.

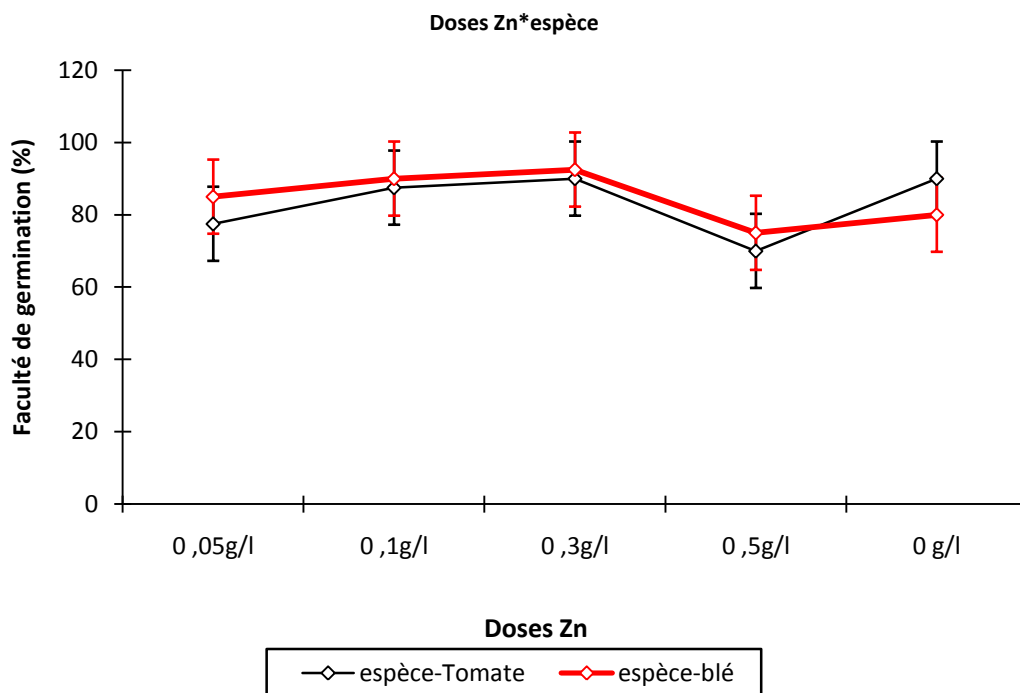


Figure 16 : Effet des Doses du Zn sur le taux de germination des graines des deux espèces (La tomate et Le blé dur).

Selon l'analyse statistique en annexe 1.1, l'ANOVA a révélé pour le facteur dose de Zn, une différence hautement significative pour ce paramètre ($P= 0,0074$), les moyennes du taux de germination des graines sous les différentes doses étudiées du Zn, concernant Le taux le plus faible a été enregistré sous la dose 0,5g/l, avec une moyenne de 72,5 % classés statistiquement dans le groupe homogène (A), par ailleurs les taux de germination les plus élevés ont été enregistrés sous la dose 0,3g/l et 0,1g/l, avec une moyenne de (91,25% et 88,75%) classés statistiquement dans le groupe homogène (B). La dose 0,05 g/l ainsi que le témoin (0 g/l) ont présenté des moyennes intermédiaires classées statistiquement en un groupe (AB).

Pour le facteur espèce, L'ANOVA a révélé une différence non significative ($P=0,6401$), le blé dur a présenté une moyenne de 83 % pour ce paramètre, et, la tomate a présenté un taux de germination inférieur (84,5%), est classé dans le même groupe statistique homogène (A).

Pour l'interaction espèce et doses du Zn, le test ANOVA a été non significative ($P=0,473$) pour ce paramètre ; donc l'application des différentes doses (0.05 g/l, 0.1 g/l, 0.3 g/l et 0.5 g/l) du Zn n'a pas eu un effet sur la germination des deux espèces étudiées.

5.1.1.3. Effet du Zn sur la durée médiane de germination des graines de *La Tomate* et le *blé dur*

Les résultats sur la durée médiane de germination des graines d'espèce: *La Tomate* et *Le Blé dur* sous l'effet des doses du Zinc sont présentés dans la fig 17.

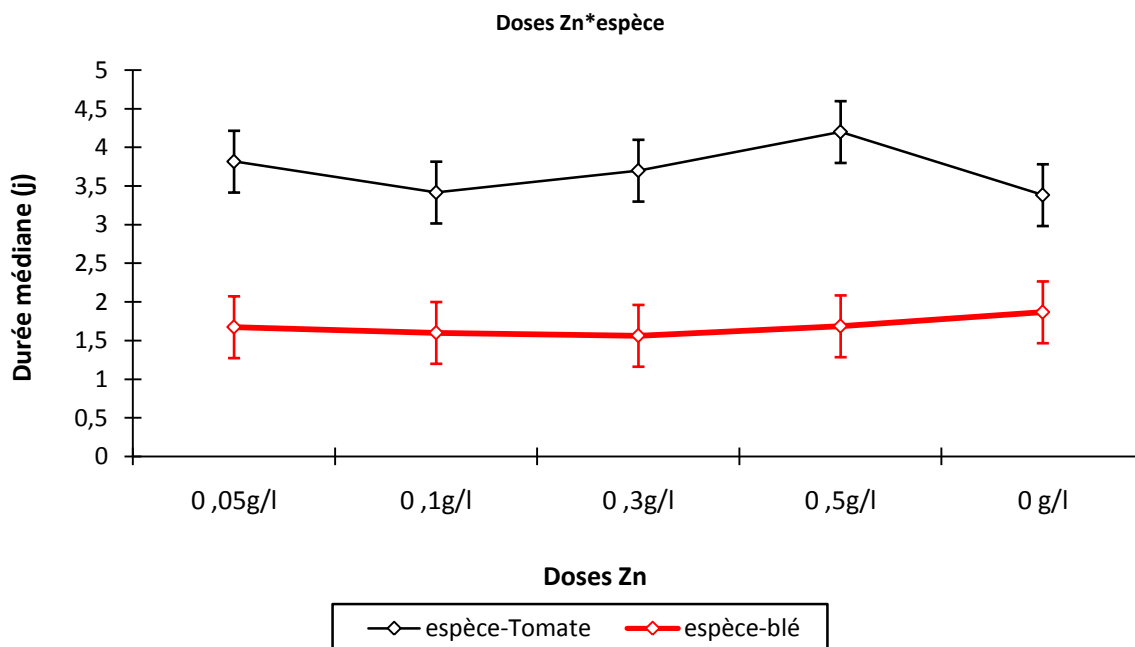


Figure 17 : Effet des Doses du Zn sur la durée médiane (j) de germination des graines des deux espèces (La tomate et Le blé dur).

Selon l'analyse de la variance dans l'annexe 1.2, Pour le facteur espèce, L'ANOVA a révélé une différence très hautement significative ($P=0,0001$), le blé dur a présenté une moyenne de (1,67 jours) pour ce paramètre, et a été classé en un seul groupement statistique (A), la tomate a présenté une durée médiane supérieure (3,7 jours), classé statistiquement en un groupe (B). La durée médiane de germination de la tomate a été plus lente que celle du blé dur.

Pour le facteur dose Zn, L'ANOVA a révélé pour les deux espèces de la tomate et le blé dur, une différence non significative ($P=0,256$) concernant la durée médiane de germination sous l'effet des différents doses du Zn. La moyenne de la durée médiane de germination a varié entre 2,5 jours et 2,9 jours, est a été classé dans le même groupe statistique homogène (A). La durée médiane la plus lente a été enregistrée sous la dose 0,5 g/l, par ailleurs la durée médian le plus basse a été constaté sous la dose 0,05 g/l. Les doses 0,1g/l et 0,3 g/l ainsi que le témoin (0 g/l) ont présenté des moyennes intermédiaires.

L'interaction métaux lourds et espèce, le test ANOVA ($P=0,145$) a été non significative, nous avons constaté que les durées les plus basses ont été observée chez le Blé dur sous les doses 0.1g/l et 0.3 g/l avec des moyennes de 1,56 jours et 1,6 jours respectivement (groupe A) , alors que les valeurs les plus lentes ont été observé chez *la tomate* sous les doses 0.05g/l et 0,5g/l avec des moyennes de 3,8 jours et 4,2 jours .

5.1.1.4. Effet du Zn sur la longueur de la partie racinaire de germination des graines : La Tomate et le blé dur

Les résultats sur la longueur de la partie racinaire des graines germées d'espèce: La tomate et le Blé dur, sous l'effet des doses du Zinc sont présentés dans la fig 18.

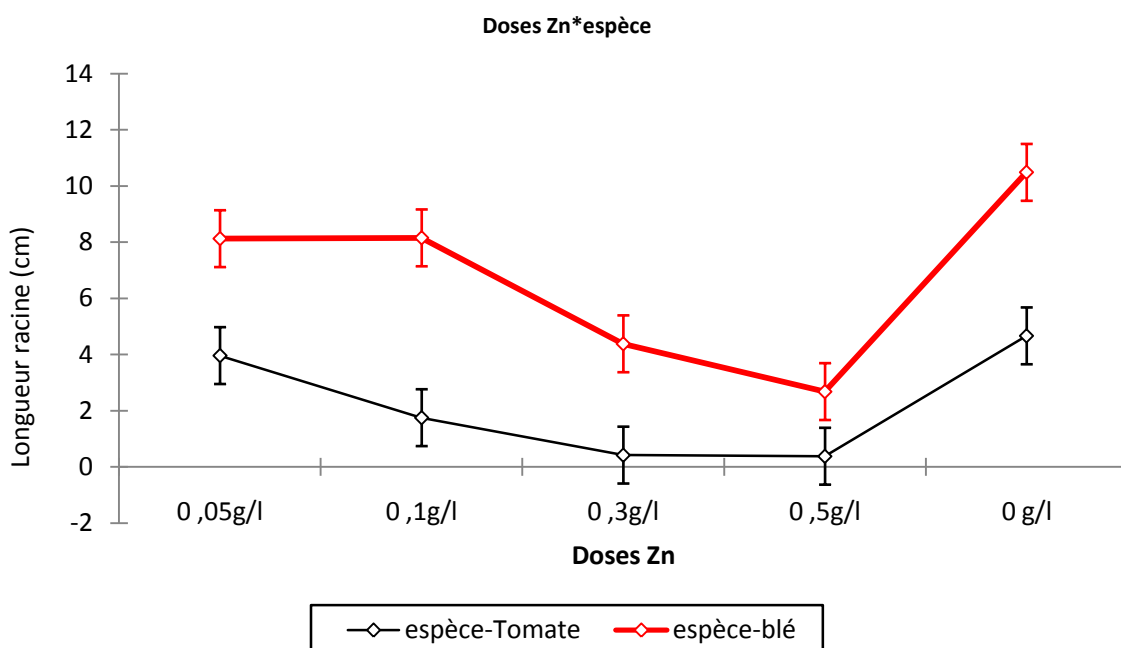


Figure 18 : Effet des Doses du Zn sur la longueur de partie racinaire des graines d'espèce : La tomate et Le blé dur.

L'analyse statistique de la variance présentée dans l'annexe 1.3, a révélé une différence très hautement significative ($P=0,0001$), pour le facteur doses de Zn sur la longueur des radicules chez les deux espèces , il a été constaté que, les doses de 0,3 g/l et 0,5 g/l ont présentées les plus basses moyennes dans la croissance des radicules, de 1,53 cm et 2,4 cm respectivement, regroupées en un groupe homogène (A), par ailleurs la dose de 0g/l a présenté les longueurs de la partie racinaire, les plus élevées (7,57cm) , classées statistiquement dans un seul groupe (C). Les doses de 0,1g/l et de 0,05 g/l de Zn, ont présentés une moyenne de 4,95cm et 6,09 cm classée statistiquement en un groupe intermédiaire B. cette observation a

été pour les deux espèces étudiées. Donc à partir de la dose de 0,1 g/l l'enracinement chez les deux espèces sera ralenti.

Pour le facteur espèce, L'ANOVA a révélé une différence très hautement significative ($P=0,0001$), le blé dur a présenté une moyenne de 6,76 cm, la tomate a présenté une moyenne de 2,23 cm pour la longueur racinaire. L'interaction dose-espèce est hautement significative selon l'ANOVA ($P=0,002$).

5.1.1.5 Effet du Zn sur la longueur de la partie aérienne des graines germées de la tomate et le blé dur

Les résultats sur la longueur de la partie aérienne de la tomate et le *Blé dur*, sous l'effet des doses du Zinc sont présentés dans la fig 19.

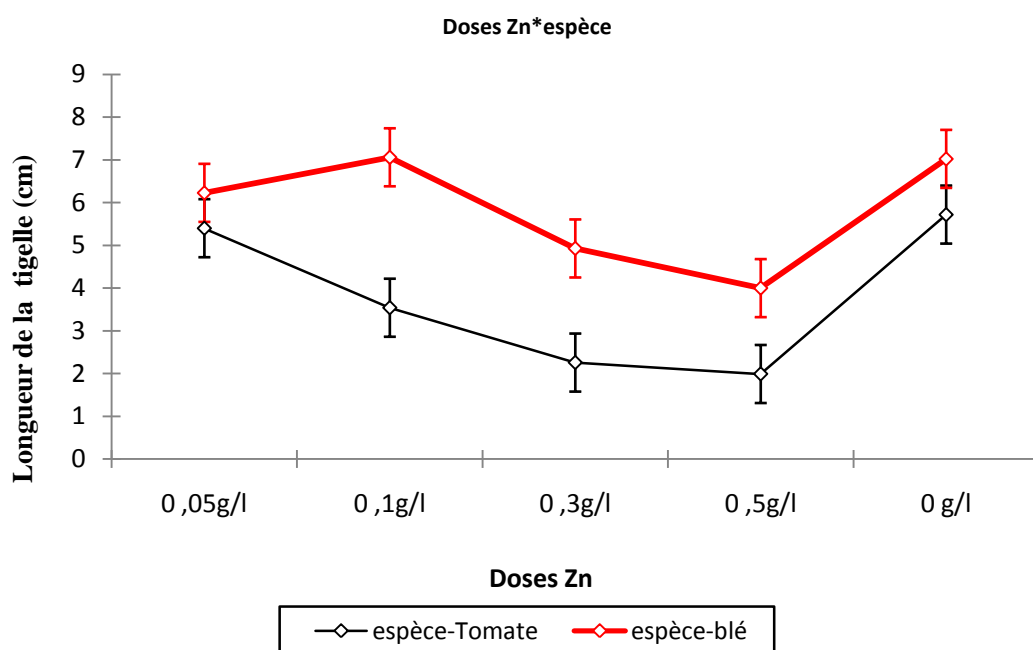


Figure 19 : Effet des Doses du Zn sur la longueur de la partie aérienne des graines d'espèce : La tomate et Le blé dur.

L'analyse statistique de la variance présentée dans l'annexe 1.4, a révélé une différence très hautement significative ($P=0,0001$), pour le facteur doses de Zn sur la longueur des coléoptiles chez les deux espèces, il a été constaté que, les doses de 0,5 g/l et 0,3 g/l ont présentées les plus basses moyennes dans la croissance de la tige, des moyennes de 2,9 cm et 3,59cm, regroupées en un groupe homogène A, par ailleurs les doses : 0,05g/l et 0 g/l ont présentées les longueurs de la partie aérienne, les plus élevées (5,81 cm et 6,73 cm

respectivement) , classées statistiquement dans le groupe (B). Cette observation a été pour les deux espèces étudiées.

Pour le facteur espèce, L'ANOVA a révélé une différence très hautement significative ($P=0.0001$), le Blé dure a présenté une moyenne de 5,84 cm pour ce paramètre, et a été classé en un seul groupement statistique (A), La tomate a présenté une de 3,78 cm classé statistiquement en un groupe (B), pour la longueur de coléoptile. L'interaction dose-espèce a été hautement significative selon l'ANOVA ($P =0.0026$).

Pour l'interaction doses espèces, il apparaît que les doses de 0 à 1 g/l ont présenté les moyennes les plus élevées uniquement pour le blé classé en un groupe D avec $P=0.002$. des moyenne plus faibles ont été enregistrées chez le blé sous les doses 0.3 et 0.5g/l de Zn(classe C) . Par ailleurs la tomate est plus sensible où , elle a présenté des valeurs plus hautes sous les doses 0 et 0.05g/l (groupe C et BC) que sous ceux des doses de 0.1,0.3 et 0.5 g/l classées en groupes statistiques A et EB .

5.1.1.6. Effet du Zn sur L'indice de vigueur de germination des graines de La tomate et le blé dur

Les résultats du L'indice de vigueur de germination des graines d'espèce: la tomate et le Blé dur, sous l'effet des doses du Zinc sont présentés dans la fig 20.

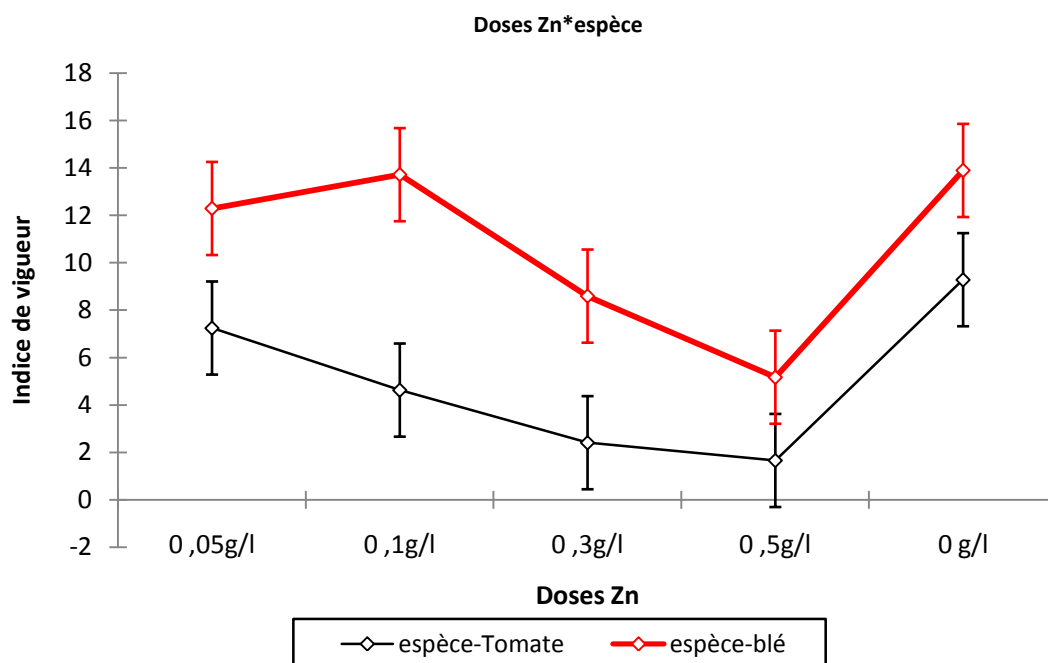


Figure 20 : Effet des doses du Zn sur l'indice de vigueur de germination des graines de (La tomate et Le blé dur).

L'analyse statistique de la variance présentée dans l'annexe 1.5, a révélé une différence très hautement significative ($P=0,0001$), pour le facteur doses de Zn, il a été constaté que, les doses de 0.5 g/l et 0.3 g/l ont présentées les plus basses moyennes comme indice de vigueur, les moyennes de 3.41 et 5.5, regroupées en un groupe homogène A, par ailleurs les doses : 0.1g/l, 0g/l et 0.05 g/l ont présentées les moyennes les plus élevées entre (9.17 et 11.56 respectivement), classées statistiquement en groupe B. cette observation a été pour les deux espèces étudiées.

Pour le facteur espèce, L'ANOVA a révélé une différence très hautement significative ($P=0,0001$), le Blé dure a présenté une moyenne de 10.73, la tomate a présenté un indice de vigueur de 5.04. L'interaction dose-espèce n'a pas été significative selon l'ANOVA ($P=0,0678$).

5.2. Discussion

Selon les résultats observés à partir de cette étude nous avons trouvé que la cinétique de germination des graines de la tomate plus lente a été constatée chez les doses de 0,5g/l et 0,05g/l du zinc, Par ailleurs la cinétique la plus rapide a été observée chez les graines sous les doses 0.3g/l suivi de ceux de 0,1 g/l de Zn.

La cinétique de germination des graines du blé dur la plus lente a été constatée chez les doses de 0g/l et 0,5g/l du zinc. La plus rapide a été observée chez les graines sous les doses 0.3g/l suivi de 0,1 g/l de Zn. Le traitement avec les différentes doses de Zn (0.05 g/l, 0.1 g/l, 0.3 g/l et 0.5 g/l) n'a pas eu un effet sur la germination des deux espèces étudiées. Nous pouvons dire que l'application du Zn testé au seuil de 0.5 g/l n'entrave pas la germination des graines.

Nos résultats sont en accord avec les résultats obtenus par de nombreux chercheurs expérimentaux l'Effet de différentes concentrations de métaux sur différentes plantes. Les résultats de ces efforts sont confirmés par Kranner et Colville (2011). Les taux d'imbibition des graines avec du zinc étaient plus élevés que ceux des témoins imbibés d'eau distillée. Ces résultats montrent que même à des concentrations extrêmement élevées (jusqu'à 10 000 ppm), les taux d'imbibition restent importants et favorables à une réhydratation optimale des téguments des graines. Almansouri et al. (2001) expliquent que l'imbibition ne se réalise que si les forces de l'eau au niveau du milieu de germination sont plus faibles que celles d'appel exercées par les tissus de la graine ; en d'autres termes, le potentiel hydrique de la graine doit être inférieur à celui du milieu de germination.

L'augmentation du taux d'absorption du zinc pourrait s'expliquer par l'adsorption du zinc sur les cellules du tégument. Ces résultats corroborent ceux rapportés par **Di Salvatore et al. (2008)** qui ont montré que le tégument constituait une barrière à l'adsorption des métaux entre l'embryon et son environnement. **Lefèvre et al. (2009)** ont expliqué l'effet inhibiteur de fortes concentrations de Zn sur la germination, et non pas sur l'imbibition, par le fait que ce métal induit ses effets après imbibition, c'est-à-dire une fois en contact avec les cellules de l'embryon et des tissus qui l'entourent. Plusieurs auteurs ont évoqué le phénomène d'adsorption d'eau en analysant l'impact des métaux sur la germination des graines. Certains auteurs font référence au phénomène d'adsorption d'humidité lorsqu'ils analysent les effets des métaux sur la germination des graines. (**Mayer & Poljakoff-Mayber, 1989 ; Araujo & Monteiro, 2005 ; Kranner & Colville, 2011**).

D'après Kranner & Colville, (2011), Les analyses des effets des métaux sur la germination des graines montrent que les taux de germination diminuent lors de la transition des plantes témoins aux plantes traitées. Cependant, l'effet inhibiteur est minime et le pourcentage atteint reste constamment élevé (80 % à 10 000 ppm de métal). Les taux de germination obtenus sont corrélés négativement avec les concentrations élémentaires pour tous les métaux testés. Ces résultats sont cohérents avec ceux de nombreux chercheurs étudiant les effets de différentes concentrations de métaux sur différentes plantes. Les résultats de cette étude ont été résumés par Kranner & Colville (2011), indiquant que les métaux provoquent une diminution du taux de germination uniquement à des concentrations élevées, mais cela n'est pas complètement inhibé.

En analysant l'impact des métaux lourds sur de nombreuses fonctions physiologiques vitales de la plante, **Ernst (1998)** a découvert que le processus de germination, qui est certainement sensible au stress métallique, est l'un des mécanismes les plus résistants parmi les autres étapes du développement des plantes. Les auteurs ont émis l'hypothèse que la barrière du tégument empêcherait une forte accumulation de métaux lourds dans les graines. Selon **Fernandes & Henriques (1991)** et **Woolhouse (1983)**, pour tout processus physiologique ou métabolique, ce sont les seuils critiques de phytotoxicité, définis en termes d'accumulation tissulaire, qui déterminent la sensibilité aux métaux lourds. **Mihoub et al. (2005)** suggèrent que la germination ne doit pas être considérée comme processus tolérant ou résistant aux métaux lourds ; la vulnérabilité de la germination devrait être associée aux niveaux d'accumulation réelle des métaux qui interfèrent avec les voies métaboliques dans les tissus de la graine.

Pour la durée médiane la germination de la Tomate a été plus lente que celle du blé dur. La dose de 0.5 g/l de Zn a ralenti la germination chez les deux espèces.

Les deux espèces (la tomate et le blé dur) sont également tolérantes aux Zn sauf la dose 0.5g/l soit 500 ppm de Zn, Les auteurs ont constaté que la durée d'exposition dépend de la graine, de l'espèce végétale, ainsi que de la variété et de la nature de la graine, en particulier de son enveloppe (le tégument). (Carlson et al., 1991 ; Munzuroglu & Geckil, 2002),

Pour la plupart des graines, la germination est complète lorsque la racine émerge du tégument. (Hopkins, 2003). La croissance de l'hypocotyle et de l'axe racinaire est plus sensible aux effets toxiques des métaux et est souvent complètement inhibée à de faibles concentrations qui ont peu d'effet sur la germination. (Mahmood et al., 2005; Aydinalp & Marina, 2009; Kranner & Colville 2011).

La mesure de la longueur des parties aériennes et racinaires et le calcul de l'indice de vigueur ,nous a permis de mieux comprendre la seuil de tolérance au Zinc des deux espèces au stade germination , selon les résultats obtenus, il a été constaté que, pour la partie raculaire, les doses de, 0,1g/l , 0,3 g/l et 0,5 g/l ont présenté les moyennes les plus basses et la dose de 0g/l a présenté les longueurs de la partie raculaire les plus élevées suivie de ceux de 0.05g/l .

Pour la partie aérienne, les doses de 0,1 g/l, 0,3 g/l et 0,5 g/l ont présenté les moyennes les plus basses dans la croissance de la tomate et du blé dur et les doses : 0g/l et 0,05 g/l ont présenté les longueurs les plus élevées de la partie aérienne, cependant le blé dur tolère bien le Zn à la dose de 50ppm plus que la tomate.

Donc à partir de la dose de 0.1 g/l l'enracinement chez les deux espèces sera ralenti. En analysant les résultats de l'indice de vigueur enregistrés, il a été constaté que, les doses de 0.1g/l, 0.3 g/l et 0.5 g/l ont présentées les plus basses moyennes comme indice de vigueur. D'autre mot le zinc n'exerce pas son effet toxique durant le stade de la germination et prouve que la racine est plus sensible que la graine au stress métallique ce qui est en accord avec les résultats de Marichali et al.

En effet, La connaissance de la teneur totale en métaux lourds dans les organes végétaux est nécessaire mais pas suffisante pour évaluer leur mobilité et les risques environnementaux qui en découlent. Ces prédictions de risques sont étroitement liées aux formes physico-chimiques sous lesquelles les métaux existent. Pour la plupart des espèces, la germination est complète lorsque la radicule émerge du tégument. (Hopkins, 2003).

Nous remarque que les deux espèces tolèrent la dose de 0.05g/l soit 50 ppm de Zn, Et pour le blé dur, les résultats de l'indice de vigueur obtenu ont montré qu'il tolère mieux que la tomate à une dose de 0,1 g / l soit 100 ppm, selon Denis Baize. (1997). en tableaux 06 les fortes anomalies chez les plantes commence à une dose de 250 ppm de Zn, ce qui est cohérent avec nos résultats selon lesquels des doses de 0,3 g/l et 0,5 g/l (300 ppm et 500 ppm) sont nocives pour les deux espèces.

Conclusion générale

Conclusion

Au cours de notre étude, la réponse au zinc des deux espèces est décrite au stade germinatif et à un stade précoce de la croissance végétative.

Les résultats obtenus ont révélé que les paramètres mesurés sachant que La cinétique de germination des graines de la tomate la plus lente a été observée à la dose de zinc 0,5 g/l leur maximum de germination a été atteint en 7 jours avec un taux de 70%. De plus, la cinétique de germination des graines la plus rapide a été observée dans les graines à la dose de 0g/l suivi de 0,1 g/l de Zn. La cinétique de germination des graines du blé dur était la plus lente aux doses de 0g/l et 0,5g/l de zinc ont atteint leur maximum en 4 jours (FG : 70%), et la plus rapide à la dose de 0,3g/l de zinc, suivie de 0,1 g/l de zinc ont donné 90% de germination au bout de 3 jours. En conséquence les deux espèces n'est pas affectée par le zinc même à fortes doses (jusqu'à 500 ppm de zinc).

Nos résultats aussi montrent que la croissance de la racicule chez les deux espèces est constatée que les doses de, 0,3 g/l et 0,5 g/l ont présenté la moyenne la plus basse dans la croissance des radicules, Le blé dur a montré un type de tolérance à la dose 0,1g/l (soit 100 ppm de zinc) mieux que la tomate. Alors qu'une dose de 0g/l a présenté les longueurs de la partie racinaire les plus élevées. Pour la tomate l'enracinement sera ralenti à partir de la dose de 0,1 g/l,

Référence Bibliographique

- Abdou AS, Al-Darwish FH, Saleh ME, El-Tarabily KA, Azirun MS and Rahman MM, (2011).** Effects of elemental sulfur, phosphorus, micronutrients and *Paracoccus versutus* on nutrient availability of calcareous soils. *Australian Journal of Crop Science*, 5(5):554-561
- Abdul-Baki, AA et Anderson, JD (1973)** Détermination de la vigueur dans les semences de soja par critères multiples. *Crop Science*, 13.
- Acevedo, E., 1989-** Assessing crop and plant attributes for cereal improvements. In: Srivastava, J.P., Porceddu, E., Acevedo, E., Varma, S. Eds. *Drought Tolerance in Winter Cereals*. Willey, Chichester, UK, pp. 303–320.
- Admin. (2023).** Top 10 World's Biggest Tomato-Producing Countries. The Science Agriculture. <https://scienceagri.com/top-10-worlds-biggest-tomato-producing-countries/>
- Alam MN, Abedin MJ and Azad MAK (2010).** Effect of micronutrients on growth and yield of onion under calcareous soil environment. *International Research Journal of Plant Science*, 1(3)056-061.
- Allen R.G.; Pereira , L.S. ; Raes, D. and Smith, M. 1998-** Crop evapotranspiration -Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and drainage paper, n o 56. Rome : Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Almansouri, M., Kinet, J.M. & Lutts, S. (2001).** — Effect of salt and osmotic stresses on germination in durum wheat (*Triticum durum* Desf.). *Plant and Soil*, 231: 243-254.
- Amrouche I et Mesbah E, (2017).** Effet du stress abiotique sur l'accumulation des protéines, totales chez deux variétés de blé dur(*Triticum durum* Desf.). Mémoire de Master. Université Constantine, 57p.
- Anonyme (2007).** Variétés de tomate. Sarl CASAP. (PDF).3 p.
- Assunçao, A. G., Herrero, E., Lin, Y. F., Huettel, B., Talukdar, S., Smaczniak, C., et al. (2010).** Arabidopsis thaliana transcription factors bZIP19 and bZIP23 regulate the adaptation to zinc deficiency. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 107, 10296–10301.
- Atherton J. C.Rudich J., (1986).** The tomato crop : a scientific basis for improvement. P56.
- Baize D. (1997).** Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France). INRA. Paris. 410 p.
- Baize D. (2009).** Éléments traces dans les sols - Fonds géochimiques, fonds pédogéochimiques naturels et teneurs agricoles habituelles - Définitions et utilités. In: ADEME, 2ème Rencontres Nationales de la Recherche sur les Sites et Sols Pollués, Paris 9 p.
- Baize, D., (1997).** Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France). INRA Éditions, Paris, 410 p.
- Baldy, C., 1974-** Contribution à l'étude fréquentielle des conditions climatiques et de leurs influences sur la production des principales zones céréalières d'Algérie. Versailles : *Inra, Département de bioclimatologie ; ministère de l'Agriculture*.
- Benton J., 1999.** Tomato plant culture in the field, greenhouse and home garden. Ed. CRS Press. Washington.
- Boardman R. and McGuire D.O. (1990).** The role of zinc in forestry. In: Zinc in forest environments, ecosystems and tree nutrition forest ecology. *Forest Ecology and Management*, 37:167-205.

- Bonjean A., Picard E. 1990:** Les céréales à paille origine, historique, économie et sélection. Eds : Nathan : 235 p.
- Bonnefoy, M ., 2007-** Blé dur : implantation et choix des variétés. *Edi. Tec&Doc, 234p.*
- Bouakez D et Hamadouche I, 2015 -** Effet du stress hydrique au stade de germination sur la croissance de quelque génotype du blé dur (*Triticum durum* Desf.). Mémoire de Master. Université Constantine, 47p.
- Bouffenaar et al, 2006.** Guide des principales variétés de céréales à paille en Algérie (blé dur, blé tendre, orge et avoine), ITGC, Alger, 154p.
- Bourelrier P.H. et Berthelin J. (1998).** Contamination des sols par les éléments traces: les risques et leur gestion. Rapport n°42. Ed. Technique et documentation. Paris. 438p.
- Bouzaata, Ch. (2016).** Valorisation des sous produits de quatre variétés de tomate industrielle (*Solanum esculentum* L) dans l'Est algérien. [Thèse de doctorat/UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA].
- Bouzerzour, H. et Benmahammed, A., 1994-** Environmental factors limiting barley grain yield in the high plateaus of eastern Algeria. *Rachis, 12 : 11-14.*
- Bouzerzour, H., 1998-** La sélection pour le rendement en grain, la précocité la biomasse aérienne et l'indice de récolte chez l'orge (*Hordeum vulgare*.L) en zone semisaride *Thèse d'état université Mentouri Constantine :165p.*
- Bozzini, A. (1988).** Origin, distribution and production of durum wheat in the world. In Fabriani G. & Lintas C. (éd). *Durum: Chemistry and Technology.* AACC (Minnesota). Etats-Unis : 1-16 p.
- Cabot C.Martos S.Llugany M.Gallego B.Tolrà R.Poschenrieder C.(2019).**A Role for Zinc in Plant Defense Against Pathogens and Herbivores.Frontiers in Plant Science,10,6. [https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.01171.](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.01171)
- Cakmak I, Torun B, Erenoglu B, O' zturk, Marschner H, Kalayci M, Ekiz H and Yilmaz A 1998** Morphological and physiological differences in the response of cereals to zinc deficiency. *Euphytica* 100, 349–357.
- Cakmak O, Ozturk L, Karanlik S, Ozkan H, Kaya Z and Cakmak I 2001** Tolerance of 65 durum wheat genotypes to zinc deficiency in a calcareous soil. *J. Plant Nutr.* 24, 1831–1847.
- Catell, F., 2006-** Fonctionnement hydrique et physiologique de la plante. *In: Tiercelin J.R.et Vidal A. Traité d'irrigation, 147-161. 2e Ed. Lavoisier. Paris, 1265 p.*
- Chaux C.L. et Foury C.L. (1994).** Culture légumière et maraichère. Tome 3 : légumineuses potagères, légumes fruit. Tec et Doc. Lavoisier, Paris. 563 p.
- Chaux C.L. et Foury C.L. (1994).** Culture légumière et maraichère. Tome 3 : légumineuses potagères, légumes fruit. Tec et Doc. Lavoisier, Paris. 563 p.
- Chennafi, H. ; Aïdaoui, A. ; Bouzerzour, H. and Saci, A., 2006b-** Yield response of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivar Waha to deficit irrigation under semi-arid growth conditions. *Asian J. Plant Sci.*,5 , 854-860.
- Chennafi, H. ; Bouzerzour, H. ; Aïdaoui, A. et Chenafi, A., 2008c-** Positionnement des exigences en eau de la culture du blé dur avec l'avènement du déficit climatique en milieu semi-aride des Hautes Plaines Sétitiennes (Algérie). *In: Proceedings of the 5th International Conference on Land Degradation. Valenzanos, Bari, Italy, 18-22 September 2008, pp: 59-62.*

- Chennafi, H. ; Bouzerzour, H. ; Saci, A. ; Chenafi, A. et Laib, M.A. 2008b-** Amélioration de l'agriculture pluviale en environnement semi-aride. *In: Proceedings du séminaire national sur les contraintes à la production du blé dur en Algérie. Université Chlef, le 29 et 30 novembre 2008, p: 62-68.*
- Cherfia R. 2010 :** Etude de la variabilité morpho-physiologique et moléculaire d'une collection de blé dur algérien (*T.durum* Desf.) Mémoire de magister, université de Constantine : 77 p.
- Clark, J.M., Norvell, W.A., Clark, F.R. & Buckley, T.W. (2002).** Concentration of cadmium and other elements in the grain of near-isogenic durum lines. *Can. J. Plant Sci. /Revue canadienne de phytotechnie.* 82 : 27-33 p
- Come, D. (1970)** Les obstacles à la germination. Monographies de Physiologie Végétale n° 6, Masson, Paris.
- Corbineau F. et Come D. (2006).** Dictionnaire de la biologie des semences et des plantules. Éditions Tec. & Doc, Lavoisier, Paris (France). 226 p.
- Denis Baize.** Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France). Références et stratégies d'interprétation. Un point sur... INRA Éditions, Paris, 1997. Présente les résultats du programme ASPITET.
- Doorenbos, J. and Pruitt, W. O.; 1975-** Guidelines for predicting crop water requirements; *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 24. FAO, Rome, Italy; 1977.*
- Dordas, C. (2008).** Role of nutrients in controlling plant diseases in sustainable agriculture. A review. *Agron. Sust. Develop.* 28, 33–46.
- Douib A, 2013-** Contribution à l'étude de quelques marqueurs physiologiques de tolérance au déficit hydrique chez le blé dur : taille de semences en tant que critère de sélection. Mémoire de Magister. Université Annaba, 106p.
- Duthil,J., 1973 -** La fertilisation phosphatée des sols calcaires. *An Agro, INA Vol VI n°2, pp*
- El Alaoui C.A. (2007).** Fertilisations minérale des cultures: les éléments minéraux secondaires et oligo-éléments. Rapport n°156. Transfert de technologie en agriculture. Maroc.4 p.
- Eliard, J.L. 1974 -**Manuel d'agriculture générale. Bases de la production végétale. *Ed. Baillière,* Paris, 344 p.
- ERNST, W.H.O. (1998).** Effects of heavy metal in plants at the cellular and organismic level ecotoxicology. Pp 587-620 in: S. Gerrit & M. Bernd (eds.). Bioaccumulation and biological effects of chemicals. III. John Wiley & Sons and Spektrum Akademischer Verlag.
- Evans, L.T. and Wardlaw,I.F., 1976-** Aspect of comparative physiology in grain yield in cereal *.Adv.Agri.28: 301-359.*
- Fageria N K, Baligar V C and Clark R B 2002** Micronutrients in crop production. *Adv. Agron.* 77, 185–268.
- FAO state 2010.** www.FAOstate.com.
- Fatarna, L. Boutekrabt, A. Arabi,Y.et Adda,A. (2017).**Impact du cadmium, du zinc et du plomb sur la germination des graines d'Atriplex halimus L. (Amaranthaceae).*Revue d'Ecologie, Terre et Vie.*72(1).61-72.
- Feillet P., (2000).** Le grain de blé : composition et utilisation. INRA. Paris.
- Fourcroy, P., Susó-Terraza, P., Sudre, D., Savirón, M., Reyt, G., Gaymard, F., et al. (2014).** Involvement of the ABCG37 transporter in secretion of scopoletin and derivatives by Arabidopsis roots in response to iron deficiency. *New Phytol.* 201, 155–167.

- FREDOT, E. (2005).** « Connaissance des aliments ». Pages : 157 à 199. Edition TEC et DOC. Lavoisier-Paris.
- Gallais A, Bannerot H. 1992.** Amélioration des espèces végétales cultivées: objectifs et critères de sélection. Paris: INRA.
- Gate, P. (1995).** Ecophysiologie du blé, Edit. Lavoisier, Paris, Technique et documentation, 429, p.
- Gausсен H., Lefoy J. et Ozenda P. (1982).** Précis de Botanique. 2eme ed. Masson, Paris: 172p.
- Gillaspy G, Ben-David H, Gruissem W. 1993.** Fruits: a developmental perspective. *Plant Cell*, 5: 1439-1451.
- Girard, M.C.; Walter, C.; Rémy J.C. ; Berthelin J. et Morel, J.L., 2005-** Sols et Environnement, Eds., Dunod, Paris, 816 p.
- Gokhan H. (2002).** Physiological and biochemical mechanisms underlying zinc efficiency in monocot and dicot plants. *Plant Physiology*, 131:595-602.
- Graham R D and Rengel Z 1993** Genotypic variation in zinc uptake and utilization by plants. In Zinc in Soils and Plants. Ed. A D Robson, pp. 107–114. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Graham R D, Ascher J S and Hynes S C 1992** Selecting zincefficient cereal genotypes for soils of low zinc status. *Plant Soil* 146, 241–250.
- Graham, D. R., Webb, M. J. (1991).** “Micronutrients and disease resistance and tolerance in plants,” in *Micronutrients in agriculture*, 2nd Edn, eds Mortvedt, J. J., Cox, F. R., Shuman, L. M., Welch, R. M.. (Madison, Wisconsin, USA, Soil Science Society of America Inc.), 329–370.
- Graham, D. R., Webb, M. J. (1991).** “Micronutrients and disease resistance and tolerance in plants,” in *Micronutrients in agriculture*, 2nd Edn, eds Mortvedt, J. J., Cox, F. R., Shuman, L. M., Welch, R. M.. (Madison, Wisconsin, USA, Soil Science Society of America Inc.), 329–370.
- Grasselly DB and Letard M., (2000).** Tomate : pour un produit de qualité EDCTIL, P222.
- Grotz, N., Fox T., Connolly E., Park W., Guerinot M.L. and Eide D. (1998).** Identification of a family of zinc transporter genes from *Arabidopsis* that respond to zinc deficiency. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 95, 7220–7224.
- Guerinot M.L. (2000).** The ZIP family of metal transporters. *Biochim. Biophys. Acta* 1465, 190–198.
- Hacisalihoglu G and Kochian L V 2003** How do some plants tolerate low levels of soil zinc? Mechanisms of zinc efficiency in crop plants. *New Phytol.* 159, 341–350.
- Hacisalihoglu G, Ozturk L, Cakmak I, Welch R M and Kochian L 2004** Genotypic variation in common bean in response to zinc deficiency in calcareous soil. *Plant Soil* 259, 71–83.
- Haddad L, Bouzerzour H, Benmahammed A, Zerargui H, Hannachi A, Bachir A, Salmi M, Oulmi A, Fellahi Z, Nouar H, and Laala Z, 2016 –** Analysis of genotype ×environment interaction for grain yield in early and late sowing date on Durum wheat (*Triticum durum* Desf.) genotypes. *Jordan Journal of Biological Sciences.* 9: 139-146.
- Hafeez, B. Khanif, Y.M and Saleem, M. (2013).** Role of Zinc in Plant Nutrition- A Review . *American Journal of Experimental Agriculture* .3(2), 374-391.
- Hajlaoui H., Denden M. et Bouslama M., (2007).** Étude de la variabilité intraspécifique de tolérance au stress salin du pois chiche (*Cicer arietinum* L.) au stade germination. *Tropicultura*, 25: 168–173.

- Hazoune, T., 2006-** le semis profond comme palliatif à la sécheresse. Rôle du coléoptile dans la levée et conséquences sur les composantes du rendement .*Thèse d'état Uni. Constantine, 138p.*
- He, C.Q., Tan, G.E., Liang, X., Du, W., Chen, Y.L., Zhi, G.Y., Zhu, Y., 2010.** Effect of Zntolerant bacterial strains on growth and Zn accumulation in *Orychophragmus violaceus*. *Appl. Soil Ecol.* 44, 1–5.
- Inaba, S., Kurata, R., Kobayashi, M., Yamagishi, Y., Mori, I., Ogata, Y., et al. (2015).** Identification of putative target genes of bZIP19, a transcription factor essential for Arabidopsis adaptation to Zn deficiency in roots. *Plant J.* 84, 323–334.
- Islam, F., Yasmeen, T., Ali, Q., Ali, S., Arif, M. S., Hussain, S., & Rizvi, H. (2014).** Influence of *Pseudomonas aeruginosa* as PGPR on oxidative stress tolerance in wheat under Zn stress. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 104, 285-293.
- Jaap Stéketee, (2010).** Fondation Développement et transfert de connaissances sur le sol. P 6.
- Jackson, P.A. ; Byth, D.E. ; Fischer, K.S. and Johnston. R.P. 1996-** Genotype x environment interactions in progeny from a barley cross: II. Variation in grain yield, yield components and dry matter production among lines with similar times to anthesis. *Field Crops Research* 37: 11-23.
- John, R., Ahmad, P., Gadgil, K., Sharma, S., 2008.** Effect of cadmium and lead on growth, biochemical parameters and uptake in *Lemna polyrrhiza* L. *Plant Soil Environ.* 54, 262.
- Kabata-Pendias A. and Pendias H. (1992).** Copper. In: Trace elements in soils and plants, 2nd Edition, CRC Press, pp. 95–108.
- Kabata-Pendias A. and Pendias H. (2001).** Trace Elements in Soils and Plants. Third ed. CRC Press, Boca Raton, LLC.
- Katyal, J.C., & Randhawa, N.S. (1986).** Les oligo-éléments.FAO. <https://books.google.dz/books?id=yEmugO3FXFAC>.
- Kaya C. and Higgs D. (2002).** Improvements in physiological and nutritional developments of tomato cultivars grown at high zinc by foliar application of phosphorus and iron. *Journal of Plant Nutrition*, 25, 1881-1894.
- Kelkouli, M., 2000-** Utilisation rationnel de l'eau et technique de récolte des eaux de pluie. *Rap .annuelle du projet OFWH in WANA.ITGC /ICARDA.32p.*
- Khorsi B., 1993.** Influence de quelques facteurs pédologiques et des équilibres ioniques sur la production et la composition de la tomate. Thèse de Doctorat d'Etat. Université de Tizi-Ouzou. 158p.
- Kranner, I. & Colville, L. (2011).** Metals and seeds: Biochemical and molecular implications and their significance for seed germination. *Environ. & Exper. Bot.*,72: 93-105.
- Lasat MM., Pence NS., Garvin DF., Ebbs SD. and Kochian LV. (1999).** Molecular physiology of zinc transport in the Zn hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*, *J. Exp. Bot.* 51, 71-79
- Laumonier R. (1979).** Cultures légumières et maraichère. Tome III. Ed. Bailliere, Paris. 279p.
- Loué A. (1993).** Oligo-éléments en agriculture. SCPA. Nathan. 597 p.
- Mahmood, S., Hussain, A., Saeed, Z. & Athar, M. (2005).** Germination and seedling growth of corn (*Zea mays* L.) under varying levels of copper and zinc. *Int. J. Environ. Sc. Tech.*,2: 269-274.

- Marcato C.E. (2007).** Origine, devenir et impact du cuivre et du zinc des lisiers porcins. Rôle de la digestion anaérobie. Thèse du doctorat, L'institut national polytechnique de Toulouse. 184 p.
- Marichali A, Dallali S, Ouerghemmi S, Sebei H, Casabianca H, Hosni K.** Responses of *Nigella sativa* L. to zinc excess: focus on germination, growth, yield and yield components, lipids and terpenes metabolisms, total phenolics and antioxidant activities *J Agric Food Chem* 2016, 64 : 1664–1675.
- Marschner P. (2012).** Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants. Third Edition. Elsevier Ltd. p 651.
- Massle-Meynard J. (1981 b) :** Elaboration du nombre d'épis d'un peuplement de blé d'hiver en situation de compétition pour l'azote I : mise en évidence d'un stade critique pour la montée d'une talle. *Agronomie* 1 (8) : 623-632.
- Massle-Meynard J. (1982) :** Elaboration du nombre d'épis d'un peuplement de blé d'hiver en situation de compétition pour l'azote II : modélisation du nombre d'épis. *Agronomie* 2 (1). 17 24.
- Mazouz L, 2006-** Etude de contribution des paramètres phénol-morphologiques dans l'adaptation du blé dur (*Triticum durum* Desf.) dans l'étage bioclimatique semi-aride. Mémoire de Magister. Université Batna, 81p.
- Molden, D. and Oweis, T. (Coordinating Leading Authors), 2007-** Pathways for Increasing water productivity. In: *Molden, D. (Edi.), Water for Food, Water for Life: A review*
- Mousavi SR. (2011).** Zinc in crop production and interaction with phosphorus. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5: 1503-1509.
- Nagajyoti P.C., Lee K.D. and Sreekanth T.V.M. (2010).** Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review. *Environ Chem Lett*, 8:199–216.
- Naika et al., 2005.** Cultivation of tomato .production, processing and marketing. *Agromisa Foundation and CTA, Wageningen*, ISBN Agromisa: 90-8573-039-2. 9-15 P.
- Navel A. (2011).** Distribution, spéciation, impact et transfert du cuivre dans un sol sous vigne: rôle de la structuration spatiale et du statut organique. Thèse de doctorat. Spécialité : Océan, Atmosphère, Hydrologie. Université de Grenoble. 193 p
- Nicoullaud, B. 1995-** Etude de l'enracinement du blé tendre d'hiver et du maïs dans les sols argilo limoneuse de petite Beauce. Rév. Étude et gestion des sols 2,3 pp183-200.
- Noman, A., Hussain, A., Ashraf, M. F., Khan, M. I., Liu, Z., He, S. (2019).** CabZIP53 is targeted by CaWRKY40 and act as positive regulator in pepper defense against *Ralstonia solanacearum* and thermotolerance. *Environ. Exp. Bot.* 159, 138–148.
- Noman, A., Liu, Z., Aqeel, M., Zainab, M., Khan, M. I. K., Hussain, A. (2017).** Basic leucine zipper domain transcription factors: the vanguards in plant immunity. *Bioch. Let.* 39, 1779–1791.
- Novak, S., Kockmann,F et Villard, A., 2006-** Adapter la stratégie culturale au type de sol *Pers Agri n°322 : 14-17.*
- Olioso A., 2006-** Spatialisation des transferts sol-végétation-atmosphère de l'échelle de la parcelle à celle du paysage agricole en combinant modèles de fonctionnement de la végétation et du sol, modèles de transfert radiatif et systèmes de mesure de télédétection. Mémoire de HDR, spécialité "Physique de l'Environnement (Sciences de l'eau, Télédétection)", *Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, Avignon (FRA), 330 pp.*

- Pesson P et Louveaux J., (1984).** Pollinisation et production végétales. Ed. INRA. 663p.
- PEYCRU, P. (dir.), J.-C. BAEHR, F. CARIOU, D. GRANDPERRIN, C. PERRIER, J.-F. FOGELGESANG & J.-M. DUPIN (2010b).** Biologie tout-en-un BCPST 2e année. Dunod, Paris, 2e édition (1e édition 2007).
- PNTTA (1999).** Bulletin mensuel d'information et de liaison du PNTTA transfert de technologie en agriculture, Maroc. 4 p.
- Prasad, B.; Carver, B.F. ; Stone, M.L. ; Babar, M.A. ; Raun, W.R. and Klat A.R.,2007-** Genetic Analysis of Indirect Selection for Winter Wheat Grain Yield Using Spectral Reflectance Indices. *Crop science, vol. (47): 1716-1425.*
- Prasd K, Saradhi PP and Sharmila P (1999).** Concerted action of antioxidant enzymes and curtailed growth under zinc toxicity in *Brassica juncea*. *Environmental and experimental Botany*, 42:1-10.
- Prats H. 1960 :** Vers une classification des graminées .Revue d'Agrostologie .*Bull. Soc Bot. France* : 32-79.
- Raemaekers R. (2001).** Agriculture en Afrique tropicale. DGIC, Bruxelles. 1634 p.
- Rajkumar, M., Prasad, M., Freitas, H., Ae, N., 2009.** Biotechnological applications of serpentine soil bacteria for phyto-remediation of trace metals. *Crit. Rev. Biotechnol.* 29, 120–130.
- Ramani S and Kannan S 1985.** Studies on Zn Uptake and Influence of Zn and Fe on Chlorophyll Development in Young Maize Cultivars. *J. Plant Nutr.* 8, 1183–1189.
- Renaud V., (2006).** Les tomates qui ont du goût, Eugen Ulmer, Paris. Rice-Evans C., Miller N.Paganga G. (1997). "Antioxidant properties of phenolic compounds." *Trends in Plant Science* 2(4): 152-159
- Rey Y. et Costes C. (1965).** La physiologie de la tomate, étude bibliographique. INRA .111p.
- Rodríguez-Celma, J., Lin, W. D., Fu, G. M., Abadía, J., López-Millán, A. F., Schmidt, W. (2013).** Mutually exclusive alterations in secondary metabolism are critical for the uptake of insoluble iron compounds by *Arabidopsis* and *Medicago truncatula*. *Plant Physiol.* 162, 1473–1485.
- Rodríguez-Celma, J., Tsai, Y. H., Wen, T. N., Wu, Y. C., Curie, C., Schmidt, W. (2016).** Systems-wide analysis of manganese deficiency-induced changes in gene activity of *Arabidopsis* roots. *Scien. Rep.* 6, 35846.
- Ruano A., Poschenrieder C.H. and Barcelo I. (1988).** Growth and biomass partitioning in zinc toxic bush beans. *Journal of Plant Nutrient*, 11:577-588.
- Sakal R, Verma M K and Singh A P 1989** Relative susceptibility of selected rice varieties to zinc deficiency in relation to utilisation of different pools of soil zinc from calcareous soil. *Ann. Agric. Res.* 10, 243–248.
- Sanah M, 2015-** Inventaire des maladies fongiques sur les céréales dans la région de Constantine. Mémoire de Master. Université Constantine, 60p.
- Sayah A.(2022).**Essai de caractérisation phéno-morphologique de six variétés de blé dur dans la zone de Hamda à Laghouat.Mémoire de master.université amar telidji laghouat.
- Schmid, N. B., Giehl, R. F., Döll, S., Mock, H. P., Strehmel, N., Scheel, D., et al. (2014).** Feruloyl-CoA 6'-Hydroxylase1-dependent coumarins mediate iron acquisition from alkaline substrates in *Arabidopsis*. *Plant Physiol.* 164, 160–172.

- SEGARRA, J. (dir.), É. CHAUVET, C. COLSON-PROCH, M. HUILLE, M. LABROUSSE, F. LOUET, F. METZ & E. PIÈTRE (2014).** Biologie BCPST 1re année. Ellipses, Paris.
- Shankara N ., Lidt J F., Goffau M., Hilmi M., V. Damla B., 2005.** Culture de la tomate (production, transformation et commercialisation).Ed ISBN Agromisa . Germany.17, 70-79, 82,85.
- Soltner D, 2005.** Les grandes productions végétales, Phytotechnie spéciale. 20ème édition. Collection sciences et technique agricoles. Paris, France, 472 pages.
- Soltner D., 1999.** Les grandes productions végétales. 19e Edition. pp: 25 – 31.
- Soltner,D., 1985 -** Les grandes productions végétale, céréale , plantes et prairies sarclées *Edition ; collection science et technique agricole. 471P.*
- Soltner,D., 2000-** Phytotechnie générale : les bases de la production végétales. Tome 1 : le sol et son amélioration. *Sciences et techniques agricoles, 22ième édition, 467 p.*
- Stotz, H. U., Thomson, J. G., Wang, Y. (2009).** Plant defensins. Defense, development and application. *Plant Sig. Behav.* 4, 1010–1012.
- Surget, A., Barron C. 2005.** Histologie du grain de blé, Industrie des céréales, 145: 4-7.
- Tahir,M.; Ketata, H. and Amiri, A.,1998-** breedin of wheat (*Triticum aestivum* L.) for thermal stress tolerance for continental Mediterranean environments . *In proceeding for of the 9th international wheat genetic symposium .Vol.4 : 95-97.*
- Taniguchi, J., Hemmi, H., Tanahashi, K., Amano, N., Nakayama, T., Nishino, T., 2000.** Zinc biosorption by a zinc-resistant bacterium, *Brevibacterium* sp. strain HZM-1. *J. Micro. Biotechnol.* 54, 581–588.
- Teige M, Huchzermeyer B, Schultz G. (1990).** Inhibition of chloroplast ATP senthease \ATP ase is a primary effect of heavy metal toxicity in spinach plants. *Biochemie und Physiologie der Pflanzen,* 186:165-168.
- Terrones G et Burny P, 2012-** Evolution du marché mondial du blé au cours des cinquante dernières années (Minnesota). Rapport.
- Tremel-Schaub A. et Feix I. (2005).** Contamination des sols : transferts des sols vers les plantes. EDP Sciences. 413 p.
- Vallee BL and Auld DS (1990).** Zinc coordination, function, and structure of zinc enzymes and other proteins. *Biochemistry,* 29, 5647–5659.
- Van der Zaal BJ, Neuteboom LW, Pinas JE, Chardonnens AN, Schat H, Verkleij JAC, Hooykaas PJJ. (1999).** Over-expression of a novel *Arabidopsis* gene related to putative zinc-transporter genes from animals can lead to enhanced zinc resistance and accumulation. *Plant Phys.* 119:1047–1055.
- Vitosh ML, Warncke DD, Lucas RE (1994).** Secondary and micronutrients for vegetables and field crops. Michigan State University Extension, E-486, 18 p.
- Von Wirén N, Marschner H and Römheld V (1995).** Uptake kinetics of ironphytosiderophores in two maize genotypes differing in iron efficiency. *Physiologia Plantarum* 93, 611-616.
- Wintz H, Fox T, Wu YY, Feng V, Chen W, Chang HS, Zhu T and Vulpe C. (2003).** Expression profiles of *Arabidopsis thaliana* in mineral deficiencies reveal novel transporters involved in metal homeostasis. *J. Biol. Chem.* 27, 47644-47653.

Annexes

Annexe 1: Résultats du Test ANOVA à 2 facteurs contrôlés (Doses Zn et l'espèce).**1.1. Faculté germinative :****a) Analyse Type III Sum of Squares (FG%) :**

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
espèce	1	22,5000	22,5000	0,2231	0,6401
Doses Zn	4	1725,0000	431,2500	4,2769	0,0074
espèce*Doses Zn	4	365,0000	91,2500	0,9050	0,4735

b) Espèce / Tukey (HSD) / Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95% (FG%) :

Modalité	Moyennes estimées	Erreur standard	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)	Groupes
Tomate	83,0000	2,2454	78,4144	87,5856	A
blé	84,5000	2,2454	79,9144	89,0856	A

c) Doses Zn / Tukey (HSD) / Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95% (FG%) :

Modalité	Moyennes estimées	Erreur standard	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)	Groupes	
0,5g/l	72,5000	3,5502	65,2495	79,7505	A	
0,05g/l	81,2500	3,5502	73,9995	88,5005	A	B
0 g/l	85,0000	3,5502	77,7495	92,2505	A	B
0,1g/l	88,7500	3,5502	81,4995	96,0005		B
0,3g/l	91,2500	3,5502	83,9995	98,5005		B

d) Espèce*Doses Zn / Tukey (HSD) / Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95% (FG%) :

Modalité	Moyennes estimées	Erreur standard	Groupes
espèce-Tomate*Doses Zn-0,5g/l	70,0000	5,0208	A
espèce-blé*Doses Zn-0,5g/l	75,0000	5,0208	A
espèce-Tomate*Doses Zn-0,05g/l	77,5000	5,0208	A
espèce-blé*Doses Zn-0 g/l	80,0000	5,0208	A
espèce-blé*Doses Zn-0,05g/l	85,0000	5,0208	A
espèce-Tomate*Doses Zn-0,1g/l	87,5000	5,0208	A
espèce-Tomate*Doses Zn-0,3g/l	90,0000	5,0208	A
espèce-blé*Doses Zn-0,1g/l	90,0000	5,0208	A
espèce-Tomate*Doses Zn-0 g/l	90,0000	5,0208	A
espèce-blé*Doses Zn-0,3g/l	92,5000	5,0208	A

1.2. La durée médiane (j) :**a) Analyse Type III Sum of Squares (durée médiane) :**

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Espèce	1	41,0304	41,0304	267,4895	< 0,0001
Doses Zn	4	0,8613	0,2153	1,4038	0,2566
espèce*Doses Zn	4	1,1355	0,2839	1,8507	0,1452

b) espèce / Tukey (HSD) / Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95% (Durée médiane) :

Modalité	Moyennes estimées	Erreur standard	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)	Groupes	
Blé	1,6777	0,0876	1,4989	1,8566	A	
Tomate	3,7033	0,0876	3,5245	3,8822		B

c) Doses Zn / Tukey (HSD) / Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95% (Durée médiane) :

Modalité	Moyennes estimées	Erreur standard	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)	Groupes
0,1g/l	2,5083	0,1385	2,2255	2,7911	A
0 g/l	2,6250	0,1385	2,3422	2,9078	A
0,3g/l	2,6313	0,1385	2,3485	2,9140	A
0,05g/l	2,7452	0,1385	2,4624	3,0280	A
0,5g/l	2,9429	0,1385	2,6601	3,2256	A

d) Espèce*Doses Zn / Tukey (HSD) / Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95% (durée médiane) :

Modalité	Moyennes estimées	Erreur standard	Groupes	
espèce-blé*Doses Zn-0,3g/l	1,5625	0,1958	A	
espèce-blé*Doses Zn-0,1g/l	1,6000	0,1958	A	
espèce-blé*Doses Zn-0,05g/l	1,6738	0,1958	A	
espèce-blé*Doses Zn-0,5g/l	1,6857	0,1958	A	
espèce-blé*Doses Zn-0 g/l	1,8667	0,1958	A	
espèce-Tomate*Doses Zn-0 g/l	3,3833	0,1958		B
espèce-Tomate*Doses Zn-0,1g/l	3,4167	0,1958		B
espèce-Tomate*Doses Zn-0,3g/l	3,7000	0,1958		B
espèce-Tomate*Doses Zn-0,05g/l	3,8167	0,1958		B
espèce-Tomate*Doses Zn-0,5g/l	4,2000	0,1958		B

1.3 Longueur partie aérienne (cm) :**a) Analyse Type III Sum of Squares (Longueur Ar (cm)) :**

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Espèce	1	205,1637	205,1637	208,9016	< 0,0001
Doses Zn	4	202,1284	50,5321	51,4527	< 0,0001
espèce*Doses Zn	4	21,1802	5,2951	5,3915	0,0022

b) Espèce / Tukey (HSD) / Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95% (Longueur Ar (cm)) :

Modalité	Moyennes estimées	Erreur standard	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)	Groupes	
Tomate	2,2360	0,2216	1,7834	2,6886	A	
Blé	6,7655	0,2216	6,3129	7,2181		B

c) Doses Zn / Tukey (HSD) / Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95% (Longueur Ar (cm)) :

Modalité	Moyennes estimées	Erreur standard	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)	Groupes		
0,5g/l	1,5306	0,3504	0,8151	2,2462	A		
0,3g/l	2,4013	0,3504	1,6857	3,1168	A		
0,1g/l	4,9531	0,3504	4,2376	5,6687		B	
0,05g/l	6,0438	0,3504	5,3282	6,7593		B	
0 g/l	7,5750	0,3504	6,8594	8,2906			C

d) Espèce*Doses Zn / Tukey (HSD) / Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95% (Longueur Ar (cm)) :

Modalité	Moyennes estimées	Erreur standard	Groupes			
espèce-Tomate*Doses Zn-0,5g/l	0,3800	0,4955	A			
espèce-Tomate*Doses Zn-0,3g/l	0,4200	0,4955	A			
espèce-Tomate*Doses Zn-0,1g/l	1,7525	0,4955	A	B		
espèce-blé*Doses Zn-0,5g/l	2,6813	0,4955	A	B	C	
espèce-Tomate*Doses Zn-0,05g/l	3,9625	0,4955		B	C	
espèce-blé*Doses Zn-0,3g/l	4,3825	0,4955			C	
espèce-Tomate*Doses Zn-0 g/l	4,6650	0,4955			C	
espèce-blé*Doses Zn-0,05g/l	8,1250	0,4955				D
espèce-blé*Doses Zn-0,1g/l	8,1538	0,4955				D
espèce-blé*Doses Zn-0 g/l	10,4850	0,4955				D

1.4 Longueur partie racinaire (cm) :**a) Analyse Type III Sum of Squares (Longueur Ra (cm)) :**

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Espèce	1	42,7146	42,7146	96,5206	< 0,0001
Doses Zn	4	67,7814	16,9454	38,2908	< 0,0001
espèce*Doses Zn	4	9,2042	2,3011	5,1996	0,0026

b) Espèce / Tukey (HSD) / Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95% (Longueur ra (cm)) :

Modalité	Moyennes estimées	Erreur standard	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)	Groupes	
Tomate	3,7800	0,1488	3,4762	4,0838	A	
Blé	5,8468	0,1488	5,5430	6,1505		B

c) Doses Zn / Tukey (HSD) / Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95% (Longueur Ra (cm)) :

Modalité	Moyennes estimées	Erreur standard	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)	Groupes		
0,5g/l	2,9925	0,2352	2,5122	3,4728	A		
0,3g/l	3,5906	0,2352	3,1103	4,0710	A		
0,1g/l	5,2994	0,2352	4,8190	5,7797		B	
0,05g/l	5,8138	0,2352	5,3334	6,2941		B	C
0 g/l	6,3706	0,2352	5,8903	6,8510			C

d) Espèce*Doses Zn / Tukey (HSD) / Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95% (Longueur Ra (cm)) :

Modalité	Moyennes estimées	Erreur standard	Groupes				
espèce-Tomate*Doses Zn-0,5g/l	1,9875	0,3326	A				
espèce-Tomate*Doses Zn-0,3g/l	2,2550	0,3326	A				
espèce-Tomate*Doses Zn-0,1g/l	3,5388	0,3326	A	B			
espèce-blé*Doses Zn-0,5g/l	3,9975	0,3326		B	C		
espèce-blé*Doses Zn-0,3g/l	4,9263	0,3326		B	C	D	
espèce-Tomate*Doses Zn-0,05g/l	5,4000	0,3326			C	D	
espèce-Tomate*Doses Zn-0 g/l	5,7188	0,3326				D	E
espèce-blé*Doses Zn-0,05g/l	6,2275	0,3326				D	E
espèce-blé*Doses Zn-0 g/l	7,0225	0,3326					E
espèce-blé*Doses Zn-0,1g/l	7,0600	0,3326					E

1.5. L'indice de vigueur :**a) Analyse Type III Sum of Squares (IV) :**

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Espèce	1	323,7382	323,7382	87,4133	< 0,0001
Doses Zn	4	356,9885	89,2471	24,0978	< 0,0001
espèce*Doses Zn	4	36,2630	9,0658	2,4479	0,0678

b) Espèce / Tukey (HSD) / Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95% (IV) :

Modalité	Moyennes estimées	Erreur standard	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)	Groupes	
Tomate	5,0452	0,4303	4,1664	5,9240	A	
Blé	10,7350	0,4303	9,8562	11,6138		B

c) Doses Zn / Tukey (HSD) / Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95% (IV) :

Modalité	Moyennes estimées	Erreur standard	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)	Groupes	
0,5g/l	3,4144	0,6804	2,0248	4,8039	A	
0,3g/l	5,5009	0,6804	4,1114	6,8905	A	
0,1g/l	9,1739	0,6804	7,7843	10,5634		B
0,05g/l	9,7694	0,6804	8,3798	11,1589		B
0 g/l	11,5919	0,6804	10,2024	12,9815		B

d) Espèce*Doses Zn / Tukey (HSD) / Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95% (IV) :

Modalité	Moyennes estimées	Erreur standard	Groupes				
espèce-Tomate*Doses Zn-0,5g/l	1,6573	0,9622	A				
espèce-Tomate*Doses Zn-0,3g/l	2,4075	0,9622	A				
espèce-Tomate*Doses Zn-0,1g/l	4,6281	0,9622	A	B			
espèce-blé*Doses Zn-0,5g/l	5,1715	0,9622	A	B	C		
espèce-Tomate*Doses Zn-0,05g/l	7,2463	0,9622		B	C		
espèce-blé*Doses Zn-0,3g/l	8,5944	0,9622		B	C	D	
espèce-Tomate*Doses Zn-0 g/l	9,2869	0,9622			C	D	E
espèce-blé*Doses Zn-0,05g/l	12,2925	0,9622				D	E
espèce-blé*Doses Zn-0,1g/l	13,7196	0,9622					E
espèce-blé*Doses Zn-0 g/l	13,8970	0,9622					E