

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE SAAD DAHLEB - BLIDA 1
FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE
DEPARTEMENT DE BIOTECHNOLOGIE ET AGRO-ECOLOGIE



Mémoire de fin d'étude en vue d'obtention du diplôme de Master Académique
Spécialité : Systèmes de production agro-écologique

Thème :

**Action combinée, salinité-acide salicylique sur le
comportement ecophysiological de la culture de blé dur
(*Triticum durum*)**

Présenté par : BAYA Hamza

BOUCHAIR Abdelhak

HAMIDA Djahid

Devant le jury compose de :

Dr MOUAS .Y	MCA	USDB1	Président
Dr HAMIDI .Y	MCB	USDB1	Examineur
Dr ABBAD .M	MCA	USDB1	Promoteur
Mme ZEMOURI		USDB1	Co-Promotrice

Année Universitaire : 2022/2023

Remerciements

En introduction de ce manuscrit, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude envers toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Tout d'abord, nous souhaitons remercier sincèrement notre directeur de recherche, Monsieur ABBAD MOHAMED, pour son accompagnement précieux, ses conseils éclairés et son soutien constant tout au long de cette étude. Sa disponibilité et son expertise ont été d'une aide inestimable.

Nous tenons également à exprimer notre reconnaissance envers notre co-directrice de recherche, Madame ZEMOURI, pour son implication et son soutien tout au long de ce travail. Ses précieux commentaires et suggestions ont contribué à améliorer la qualité de notre recherche.

Nos remerciements vont également aux membres du jury, en particulier à Madame MOUAS, qui a présidé notre jury, ainsi qu'à Monsieur HAMIDI pour leur évaluation attentive et leurs remarques constructives.

Nous souhaitons également remercier l'ensemble des enseignants de la Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie de l'Université de Blida I pour leur enseignement de qualité et leur contribution à notre formation académique.

Enfin, nous tenons à exprimer notre gratitude envers nos proches, nos amis et nos camarades de promotion pour leur soutien moral et leur encouragement tout au long de cette aventure.

Que toutes ces personnes sachent que leur contribution a été essentielle dans la réalisation de ce travail et qu'elles resteront gravées dans notre mémoire. Nous leur adressons nos plus sincères remerciements.

Dédicaces

Je dédie humblement ce travail à mon père, pour son soutien inébranlable et son encouragement constant qui m'ont guidé vers le chemin de la réussite.

À ma mère, ma source de bonheur, pour son amour et sa tendresse infinis.

Je pense également à mes chers frères Sofyan, Rafik, Amar, Anis, ainsi qu'à mes chères sœurs Ilham et Khadidja.

Mes sincères remerciements vont à mes précieux amis Abderrahmene, Sid Ali, Abdelmalek, Aissa, Wail, Aboubakeur, Yacine, ainsi qu'à mes collègues de la promotion "Système de production agroécologique", en particulier à notre déléguée Ikram.

Je n'oublie pas toutes les personnes qui ont toujours été présentes pour moi.

Enfin, je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers "Minou" pour son soutien indéfectible, qui a été ma principale source d'inspiration et m'a permis d'atteindre cette étape importante de ma vie.

Abdelhak

Dédicaces

Je tiens à exprimer ma gratitude envers Dieu Tout-Puissant, qui m'a accordé la force et la guidance pour accomplir mes actions et atteindre mes objectifs. Louanges à Lui pour toutes les bonnes choses que j'ai pu réaliser.

Je souhaite exprimer mes sincères remerciements à ma famille, en particulier à ma chère mère, dont le soutien et l'amour inconditionnels ont été une source d'inspiration tout au long de mon parcours académique. Je suis reconnaissant envers mes frères qui ont été une motivation constante pour moi, qu'ils soient proches ou éloignés.

Je tiens à remercier chaleureusement les responsables et administrateurs de l'Université de "Saad Dahleb Blida" pour leur soutien constant tout au long de mon parcours universitaire. Je suis reconnaissant envers Mme Mouaas pour son accompagnement et son appui.

Mes remerciements vont également à mes collègues de travail, Baya Hamza et Bouchair Abdlehak, ainsi qu'à mes amis proches, Ilyes, Abdraouf et Abdrazzak. Leur collaboration, leurs conseils et leur soutien ont été précieux dans la réalisation de ce travail.

Enfin, je tiens à remercier tous ceux qui ont prié pour moi, qu'ils soient loin ou près. Leurs prières ont été une source de force et de réconfort tout au long de ce parcours.

Que chacun sache que sa contribution a été appréciée et que je suis reconnaissant envers tous ceux qui ont joué un rôle dans ma réussite.

Djahid

Dédicaces

Je dédie ce travail à toutes les personnes qui m'ont apporté leur soutien, qu'ils soient proches ou éloignés.

À mon cher père, je tiens à exprimer toute ma gratitude pour les années de sacrifices et de dévouement dont vous avez fait preuve dans mon éducation et mon bien-être.

En souvenir de ma chère mère, je suis profondément touché par l'affection et l'estime que je lui porte. Elle a été une source inépuisable de soutien, d'amour et de précieux conseils depuis ma naissance.

À mes chers frères, Aymen et Mohamed, je vous remercie pour votre présence constante et votre soutien indéfectible tout au long de mon parcours.

À mes meilleurs amis, Younes, Rafik Ilyes, et Minou votre amitié sincère et votre soutien inconditionnel ont été d'une importance capitale pour moi.

Que toutes ces personnes sachent que leur soutien a été essentiel dans la réalisation de ce travail, et je les remercie du fond du cœur.

Ma mère restera à jamais dans mes pensées et dans mon cœur, et je dédie ce travail à sa mémoire.

Hamza

Résumé

La salinité du sol est l'un des principaux défis auxquels sont confrontées les cultures agricoles dans de nombreuses régions du monde. Elle entraîne des effets néfastes sur la germination, la croissance et la productivité des plantes. Dans le cas spécifique du blé dur, une céréale largement cultivée, la salinité peut entraîner des pertes significatives de rendement. Afin de surmonter cet obstacle, il est essentiel de trouver des moyens d'améliorer la tolérance des plantes de blé dur à la salinité. Cette étude a évalué l'effet de la salinité induite par le chlorure de calcium (CaCl_2) combiné à l'acide salicylique sur la germination, la croissance et la biomasse des plantes de blé dur (variétés Simeto et Vitron). Les résultats ont montré que la salinité avait un impact négatif sur la faculté germinative, la longueur de la partie aérienne, la longueur des racines et la biomasse de la partie aérienne des plantes de blé dur. Cependant, l'application d'acide salicylique a atténué ces effets néfastes, améliorant ainsi la faculté germinative, la croissance et la biomasse des plantes de blé dur. Ces résultats suggèrent que l'acide salicylique peut jouer un rôle dans l'amélioration de la tolérance des plantes de blé dur à la salinité.

Mots-clés : salinité, blé dur, chlorure de calcium, acide salicylique.

Abstract

Soil salinity is one of the major challenges faced by agricultural crops in many regions of the world. It leads to detrimental effects on germination, growth, and productivity of plants. In the case of durum wheat, a widely cultivated cereal, salinity can result in significant yield losses. To overcome this obstacle, it is crucial to find ways to improve the tolerance of durum wheat plants to salinity. This study evaluated the effect of salinity induced by calcium chloride (CaCl₂) combined with salicylic acid on germination, growth, and biomass of durum wheat plants. Two varieties of durum wheat, Simeto and Vitron, were subjected to different treatments to examine the impact of salinity and salicylic acid on growth parameters. The results showed that salinity had a negative impact on germination, aerial part length, root length, and biomass of durum wheat plants. However, the application of salicylic acid mitigated these adverse effects and improved germination, growth, and biomass of durum wheat plants. These findings suggest that salicylic acid may play a significant role in enhancing the tolerance of durum wheat plants to salinity.

Keyword: salinity, durum wheat, calcium chloride, salicylic acid.

المخلص

تعد ملوحة التربة أحد التحديات الرئيسية التي تواجهها المحاصيل الزراعية في العديد من مناطق العالم. يؤدي إلى آثار ضارة على إنتاج النباتات ونموها وإنتاجيتها. في حالة القمح الصلب ، وهو حبوب مزروعة على نطاق واسع ، يمكن أن تؤدي الملوحة إلى خسائر كبيرة في الغلة. للتغلب على هذه العقبة ، من الأهمية بمكان إيجاد طرق لتحسين تحمل نباتات القمح الصلب للملوحة. قيمت هذه الدراسة تأثير الملوحة التي يسببها كلوريد الكالسيوم ($CaCl_2$) جنباً إلى جنب مع حمض الساليسيليك على الإنبات والنمو والكتلة الحيوية لنباتات القمح الصلب . تم إخضاع نوعين من القمح الصلب ، toeSim و Vitron ، لمعالجات مختلفة لفحص تأثير الملوحة وحمض الساليسيليك على معايير النمو. أظهرت النتائج أن الملوحة كان لها تأثير سلبي على الإنبات وطول الجزء الهوائي وطول الجذر والكتلة الحيوية لنباتات القمح الصلب. ومع ذلك ، فإن تطبيق حمض الساليسيليك خفف من هذه الآثار الضارة وحسن الإنبات والنمو والكتلة الحيوية لنباتات القمح الصلب. تشير هذه النتائج إلى أن حمض الساليسيليك قد يلعب دوراً مهماً في تعزيز تحمل نباتات القمح القاسي للملوحة.

الكلمات الدالة: الملوحة ، القمح الصلب ، كلوريد الكالسيوم ، حمض الساليسيليك.

Liste des abréviations

AS : Acide salicylique

CaCl₂ : Chlorure de calcium

CE : Conductivité électrique

Chlorure : Cl⁻

Cm : centimètres

ITGC : Institut Technique des Grandes cultures

FAO : Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture

Mg/L : milligrammes par litre

MT : Millions de tons

NaCl : Chlorure de sodium

ppm : parties par million

Potassium : K⁺

Sodium : Na⁺

TDS : Solides dissous totaux

T : Traitement

Liste des figures

Figure 1: Production mondiale de blé par pays	3
Figure 2: Description botanique de blé.....	7
Figure 3: Le cycle de développement du blé	10
Figure 4: Principaux effets d'une forte salinité sur les plantes	19
Figure 5: Acide salicylique	21
Figure 6: La biosynthèse de l'acide salicylique	22
Figure 7: Graines de blé dur (Simeto) et (Vitron)	23
Figure 8: Laboratoire d'amélioration de plante	25
Figure 9: Aspect des plantes après 5 jours de germination.....	27
Figure 10: Aspect général des jeunes plantules de blé dur	27
Figure 11: Les différents traitements utilisés.....	28
Figure 12: Impact de l'acide salicylique (0.5 et 1 mM) et du CaCl ₂ (100 et 200 mM), ainsi que de leur combinaison, sur le taux de germination des deux variétés de graines de blé (Simeto et Vitron) pendant une semaine de culture par rapport au témoin (T0).....	30
Figure 13: Impact de la salinité et de l'acide salicylique sur la longueur de la partie aérienne des variétés de blé dur (Simeto et Vitron) en stade germinatif.....	31
Figure 14: Impact de la salinité et de l'acide salicylique sur la longueur de la partie racinaires des variétés de blé dur (Simeto et Vitron) en stade germinatif.....	33
Figure 15: Impact de la salinité et de l'acide salicylique sur la biomasse fraîche de la partie aérienne des variétés de blé dur (Simeto et Vitron) en stade germinatif	34
Figure 16: Impact de la salinité et de l'acide salicylique sur la biomasse fraîche de la partie aérienne des variétés de blé dur (Simeto et Vitron) en stade de croissance	35
Figure 17: Impact de la salinité et de l'acide salicylique sur la longueur de la partie aérienne des variétés de blé dur (Simeto et Vitron) en stade de croissance	37

Liste des tableaux

Tableau 1: Production locale du blé	4
--	---

Table des matières

Introduction	1
Chapitre 1 : Données générale et biologique sur la culture de blé	2
I.1. Historique et l'origine du blé.....	2
I.2. Production mondiale du blé.....	2
I.3. Production locale du blé	3
I.4. Importance économique	4
I.5. Contraintes de production de blé en Algérie	4
II.1 Caractères botanique de blé.....	6
II.2 Classification botanique de blé dur	7
II.3 Physiologie de blé	8
A. Période végétative	8
A.1. Stade de germination.....	8
A.2. Stade surélevé	8
A.3. Stade de tallage	8
B. Période de reproduction	9
B.1. Stade boulon-gonflement	9
B.2. Stade d'épiaison - floraison	9
B.3. Stade de remplissage des grains	9
C. Période de maturité.....	9
II.4 Morphologie de blé	10
A. Le système racinaire du blé.....	10
B. Le système aérien du blé	11
B.1 La tige.....	11
B.2 Les Feuilles	11
II.5. Exigence de blé	11
II.5.1. Température	11

II.5.2. Eau.....	11
II.5.3. Éclaircissement.....	12
II.5.4. Techniques culturales.....	12
II.5.5. Travail du sol.....	12
II.5.6. Choix de variétés.....	12
II.5.7. Fertilisation.....	12
II.5.8. Irrigation.....	13
II.6. Maladies du blé dur.....	13
III. Généralités sur la germination du blé dur et son importance.....	14
Chapitre 2 : Généralités sur le stress salin	15
I. Définition du stress.....	15
II.1 Définition de la salinité	15
II.2 Causes de la salinité	15
II.3 Origine de la salinité	15
II.4 Différents types de salinité.....	16
II.4.1 Salinité primaire	16
II.4.2 Salinité secondaire.....	16
III. Salinité dans le monde et en Algérie.....	16
III.1 Salinité dans le monde	16
III.2 Salinité en Algérie.....	17
IV. Conséquence du stress salin.....	17
V. Effet du stress salin sur la plante de blé dur (<i>Triticum durum</i>).....	17
V.1 Effet sur la germination.....	17
V.2 Effet sur la croissance et le développement.....	17
V.3 Effet sur la photosynthèse	17
V.4 Effet sur le métabolisme de l'azote (N).....	18
V.5 Effet sur la morphologie	18
V.5.1 Effet de la salinité sur les racines.....	18
V.5.2 Effet de la salinité sur les tiges.....	18
V.5.3 Effet de la salinité sur les feuilles	18
VI. Stratégies d'adaptation à la salinité chez les plantes.....	19
VI.1 Compartiment vacuolaire.....	19
VI.2 Exclusion des ions toxiques.....	19
VI.3 Ajustement osmotique	20

Chapitre 3 : Relation entre l'acide salicylique et la salinité	21
I.1 Définition de l'acide salicylique	21
II.2 Propriété physicochimique.....	21
III.2 La biosynthèse de l'acide salicylique	21
III.3 Rôle de l'acide salicylique.....	22
III.4 Effets de l'acide salicylique sur la plante	22
III.4.1 Effets sur la croissance.....	22
III.4.2 Effets sur la photosynthèse	22
III.4.3 Effets sur le métabolisme de nitrate.....	22
III.4.4 Effet sur la floraison.....	23
III.4.5 Effet sur la biosynthèse de l'éthylène.....	23
III.5 Relation entre l'acide salicylique et la salinité	23
I. Objectif de l'expérimentation	23
II. Matériel et méthodes	23
II.1. Matériel végétal utilisé	23
II.2. Matériels utilisés	24
III. Conditions expérimentales.....	24
III.1 Lieu de l'expérimentation.....	24
VI. Dispositif expérimentale.....	25
VI.1. Méthodes de stérilisation des graines	25
VI.2. 1ère expérience : Phase de Germination.....	25
VI.3. 2ème expérience : Phase végétative	27
VI.4. Description des différents traitements utilisés.....	28
VI.5. Paramètres mesurés	28
VI.5.1 Paramètres morphologique	28
A.Taux de germination final.....	28
B.Hauteur finale des plantes et la longueur des racines (cm)	29
C. Biomasse fraîche produite.....	29
Résultats et Discussion	30
I. Effet de la salinité exercée par 50 et 100 mM de CaCl ₂ combinée avec 0,5 et 1g d'acide salicylique sur les paramètres de germination	30
I.1. Effet sur la faculté germinative (FG%)	30
I.2. Effet de la CaCl ₂ et l'acide salicylique sur la longueur de la partie aérienne de deux variétés testées (stade germinatif).....	31

I.3. Effet de la CaCl ₂ et l'acide salicylique sur la longueur de la partie racinaires de deux variétés testées (stade germinatif)	32
I.4. Effet de la CaCl ₂ et l'acide salicylique sur la biomasse fraiche de la partie aérienne de deux variétés testées (stade germinatif)	34
I.5. Effet de la CaCl ₂ et l'acide salicylique sur la biomasse fraiche de la partie aérienne de deux variétés testées (stade de croissance)	35
I.6. Effet de la CaCl ₂ et l'acide salicylique sur la longueur de la partie aérienne de deux variétés testées (stade de croissance)	36
Conclusion	39
Références bibliographiques	45

Introduction

La salinité du sol est l'un des principaux facteurs limitant la croissance et la productivité des plantes dans de nombreuses régions du monde. Les sols salins contiennent des concentrations élevées de sels solubles tels que le chlorure de calcium (CaCl_2), qui peuvent avoir des effets néfastes sur les plantes en perturbant leur équilibre hydrique et en induisant des déséquilibres ioniques. La germination des graines et la croissance des plantules sont particulièrement sensibles à la salinité, ce qui peut entraîner une faible émergence des plantes et une mauvaise croissance racinaire. La recherche de méthodes pour améliorer la tolérance des plantes à la salinité est donc d'une importance cruciale pour assurer la sécurité alimentaire mondiale [1].

L'acide salicylique, un composé organique naturel, est connu pour son rôle dans la régulation des réponses au stress chez les plantes. Il a été démontré que l'acide salicylique améliore la tolérance des plantes à divers stress abiotiques tels que la sécheresse, le froid et la salinité. Cependant, l'effet de l'acide salicylique sur la tolérance à la salinité des cultures céréalières, telles que le blé dur, reste encore peu exploré.

Dans cette étude, nous avons évalué l'effet de différentes concentrations de CaCl_2 (50 mM et 100 mM) combinées à des concentrations d'acide salicylique (0,5 mM et 1 mM) sur la germination, la croissance et la biomasse des plantes de blé dur (variétés Simeto et Vitron). Nous avons mesuré le taux de germination, la longueur de la partie aérienne et des racines, ainsi que la biomasse fraîche de la partie aérienne. L'objectif était de déterminer si l'acide salicylique pouvait atténuer les effets néfastes de la salinité induite par le CaCl_2 et améliorer la tolérance des plantes de blé dur à la salinité.

Synthèse
Bibliographique

Chapitre 1 : Données générale et biologique sur la culture de blé

I.1. Historique et l'origine du blé

Le blé est une céréale de la famille des Graminées dont la graine sert à l'alimentation humaine. La culture du blé a commencé il y a environ 10 000 ans au Moyen-Orient, dans le Croissant fertile, une région qui s'étend de la Jordanie, de la Palestine et du Liban à la Syrie, la Turquie, l'Irak et l'Iran [1]. Les premières espèces cultivées sont issues de croisements spontanés entre des graminées sauvages, dont l'engrain (*Triticum monococcum*) et l'amidonnier (*Triticum turgidum dicocum*). Un nouveau croisement spontané entre l'amidonnier et une graminée sauvage, « *Aegilops squarrosa* », donne naissance à une nouvelle espèce, à l'origine du blé tendre, « *Triticum aestivum* ». En même temps, l'amidonnier donnera du blé dur, « *Triticum durum* » [2].

I.2. Production mondiale du blé

La production de blé est de 650 à 685 millions de tonnes par an, tandis que la consommation varie de 654 à 660 millions de tonnes et 160 à 190 millions de tonnes sont entreposées en réserves [3].

La Chine est le plus grand producteur de blé au monde avec quelque 130 millions de tonnes par an. Inde arrive deuxième avec la production annuelle de 107 millions de tonnes. Avec 85 millions de tonnes de production par an, la Fédération de Russie est le troisième producteur de blé suivi de l'États-Unis d'Amérique avec 50 millions de tonnes et en 5eme, Canada avec 35 millions de tonnes de production par an [4].

Avec une production annuelle moyenne de 40 millions de tonnes (MT), le blé dur (*Triticum durum*) est la 10e céréale la plus importante et le plus couramment cultivée au monde [5].

La production de blé dur devrait augmenter 10 % pour atteindre 33,9 MMT en 2022-2023, avec une augmentation aux États-Unis, au Canada et au Mexique comme principaux contributeurs. Alors que la production en Amérique du Nord de blé dur semble florissante, la production en Europe et en Afrique du Nord devrait décliner [6].

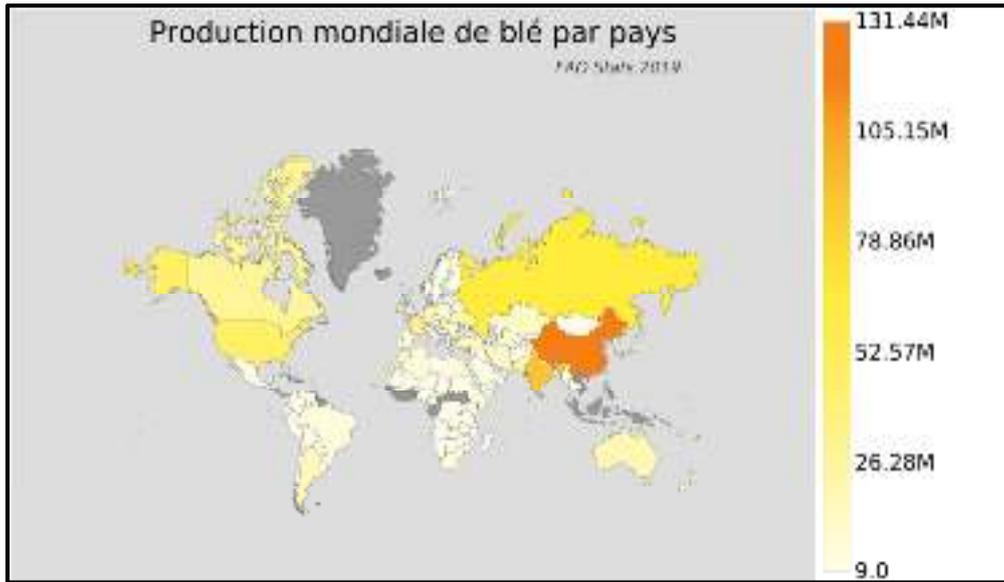


Figure 1: Production mondiale de blé par pays [7]

I.3. Production locale du blé

L'Algérie est l'un des plus grands consommateurs de blé au monde. La production céréalière devrait connaître une amélioration de 38% de la production au cours de la campagne 2022-2023 en raison de l'amélioration des conditions climatiques et une bonne pluviométrie qui devrait marquer la nouvelle campagne agricole selon le Département de l'agriculture des États-Unis, qui a publié le 30 septembre une mise à jour de ses prévisions pour l'Algérie. Ainsi, 3,3 millions de tonnes de blé seront produites en Algérie au cours de la campagne 2022-2023, selon les prévisions de l'USDA [8].

Campagne	Blé Dur
2000/2001	1112180
2001/2002	1350740
2002/2003	1321580
2003/2004	1372495
2004/2005	1042894
2005/2006	1162880
2006/2007	1187620
2007/2008	726105
2008/2009	1262842
2009/2010	1181774
2010/2011	1230414
2011/2012	1342881
2012/2013	1180332
2013/2014	1182127
2014/2015	1314014
2015/2016	1094636
2016/2017	1175537
2017/2018	1492546
2018/2019	1579080
2019/2020	1493918
Moyenne	1240330

Tableau 1: Production locale du blé [9]

I.4. Importance économique

Le blé dur est une culture importante pour la consommation humaine, principalement utilisée pour la fabrication de semoule, qui est utilisée dans la production de pâtes, de couscous et de certains types de pain. Il est également utilisé comme aliment pour le bétail et comme fourrage dans certaines régions. Le blé dur est largement cultivé dans de nombreux pays, en particulier dans les régions méditerranéennes, et joue un rôle important dans l'agriculture et la sécurité alimentaire mondiales.

I.5. Contraintes de production de blé en Algérie

Le blé dur est une culture majeure en Algérie et constitue une importante source de nourriture et de revenus pour les agriculteurs. Cependant, plusieurs contraintes limitent sa production dans le pays.

Voici quelques-unes des principales contraintes :

- **Pénurie d'eau** : L'Algérie est un pays semi-aride et la pénurie d'eau est un défi majeur pour la production de blé dur. Le pays dépend fortement de l'irrigation, mais les ressources en eau disponibles sont limitées et souvent insuffisantes pour répondre aux besoins des agriculteurs [10].
- **Dégradation des sols** : La dégradation des sols est un problème grave en Algérie, et elle affecte la production de blé dur en réduisant la fertilité des sols et la capacité de rétention d'eau. Cela est dû à des facteurs tels que l'érosion, le surpâturage et les pratiques agricoles intensives [11].
- **Ravageurs et maladies** : Le blé dur est sensible à divers ravageurs et maladies, notamment la rouille, la rouille de la tige et les pucerons. Ceux-ci peuvent réduire considérablement les rendements et la qualité, et nécessitent des stratégies efficaces de gestion des ravageurs et des maladies [12].
- **Accès limité aux intrants** : les agriculteurs algériens sont souvent confrontés à des difficultés pour accéder à des semences de qualité, des engrais et d'autres intrants nécessaires à la production de blé dur. Cela limite leur capacité à améliorer les rendements et la rentabilité [5].
- **Manque de mécanisation** : L'utilisation de machines agricoles modernes est limitée en Algérie, et la plupart des agriculteurs dépendent encore du travail manuel et des pratiques agricoles traditionnelles. Cela limite leur capacité à augmenter la production et à améliorer l'efficacité.
- **Accès au marché** : Les producteurs de blé dur en Algérie sont souvent confrontés à des difficultés pour accéder aux marchés pour leurs produits. Cela est dû à des facteurs tels que la médiocrité des infrastructures, le manque d'informations sur le marché et l'insuffisance des installations de stockage et de transformation.
- **Changement climatique** : Le changement climatique est une préoccupation croissante en Algérie, et on s'attend à ce qu'il exacerbe un bon nombre des défis auxquels est confrontée la production de blé dur. Cela comprend une pénurie d'eau accrue, des événements météorologiques extrêmes plus fréquents et des changements dans les modèles de ravageurs et de maladies. Ainsi, les hautes températures sont parmi les facteurs intervenants dans la limitation du rendement. En effet, si une hausse de température survient au stade remplissage du grain, elle peut faire chuter le rendement de 50 % par l'échaudage [13].

II.1 Caractères botanique de blé

- **Type de plante** : Le blé dur est une graminée annuelle, ce qui signifie qu'il termine son cycle de vie en une seule saison de développement [14].
- **Taille** : Les plants de blé dur peuvent atteindre 170 cm de hauteur, bien que la hauteur réelle puisse varier en fonction des conditions environnementales et des pratiques de gestion.[15]
- **Racines** : Le blé dur a des racines fibreuses, peu profondes et étalées dans le sol pour absorber l'eau et les nutriments.
- **Tige** : La tige du blé dur est généralement cylindrique, lisse et creuse. Il porte des nœuds où les feuilles émergent et peut être touffu en apparence.
- **Feuilles** : Les feuilles de blé dur sont alternes et disposées par paires le long de la tige. Ils sont simples, c'est-à-dire qu'ils ne sont pas divisés en folioles et ont des marges entières. Les limbes des feuilles sont linéaires, plats et légèrement poilus, avec des nervures parallèles.
- **Inflorescence** : L'inflorescence du blé dur est un épi terminal, dense et distique (à deux rangs). Les épillets sont sessiles (attachés directement à l'épi) et contiennent quatre à sept fleurs bisexuées [16].
- **Fleurs** : Les fleurs de blé dur sont petites et bisexuées, ce qui signifie qu'elles ont à la fois des structures reproductrices mâles (étamines) et femelles (ovaire). Chaque fleur a trois étamines et un ovaire supérieur qui se termine par un petit appendice charnu et poilu avec deux stigmates plumeux.
- **Fruit** : Le fruit du blé dur est un grain ellipsoïde, communément appelé grain de blé. Le noyau a une rainure centrale sur un côté et contient l'embryon (germe), l'endosperme (partie féculente) et le son (couche protectrice externe).
- **Caractéristiques génétiques** : Le blé dur est une espèce tétraploïde, c'est-à-dire qu'il possède quatre ensembles de chromosomes ($2n = 4x = 28$). Il possède un génome vaste et complexe, qui a été largement étudié pour comprendre sa constitution génétique et améliorer ses caractéristiques agronomiques.

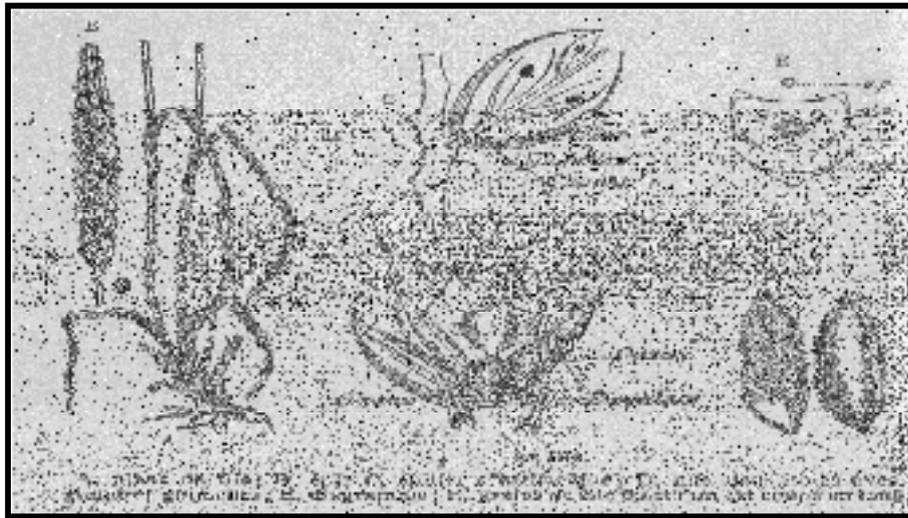


Figure 2: Description botanique de blé [17]

II.2 Classification botanique de blé dur

La classification botanique du blé dur (*Triticum turgidum* ssp. *durum*) est la suivante :

Classification de
(1981)

Cronquist

Règne	<i>Plantae</i>
Sous-règne	<i>Tracheobionta</i>
Division	<i>Magnoliophyta</i>
Classe	<i>Liliopsida</i>
Sous-classe	<i>Commelinidae</i>
Ordre	<i>Cyperales</i>
Famille	<i>Poaceae</i>
Sous-famille	<i>Pooideae</i>
Tribu	<i>Triticeae</i>
Genre	<i>Triticum</i>
Espèce	<i>Triticum turgidum</i>

II.3 Physiologie de blé

Le cycle de développement du blé peut être divisé en plusieurs étapes, notamment, la période végétative, la croissance reproductive et la maturité [18].

A. Période végétative

A.1. Stade de germination

C'est le stade initial de la croissance du blé lorsque la graine absorbe l'eau, gonfle et germe. Pendant la germination, l'embryon dans la graine reprend son activité métabolique, et la racine et la pousse émergent de la graine. La plante dépend de l'énergie stockée dans l'endosperme de la graine pour soutenir la croissance précoce jusqu'à ce que la pousse émerge au-dessus de la surface du sol. La germination du blé se produit à des températures allant de 4 à 37 °C, la plage de température optimale étant de 12 à 25 °C. La coléoptile, qui est la gaine protectrice recouvrant la pousse émergente, apparaît généralement 4 à 6 jours après la germination [19].

A.2. Stade surélevé

Après la levée, le plant de blé entre dans le stade surélevé, caractérisé par le développement des feuilles, des tiges et des racines. Au cours de cette étape, la plante se concentre sur la croissance végétative, produisant de nouvelles feuilles et talles, et développant un système racinaire solide pour absorber l'eau et les nutriments du sol. Le stade surélevé est défini par l'apparition de la première feuille qui émerge de la coléoptile. Cette étape comporte deux phases successives : L'allongement de la coléoptile, qui a pour fonction première d'amener la première feuille à la surface du sol et la croissance de la première feuille, qui émerge du sommet du coléoptile et se développe et s'étale jusqu'à ce qu'elle atteigne le stade de la première feuille.

A.3. Stade de tallage

Au cours du stade de tallage, le plant de blé produit plusieurs talles ou pousses latérales à partir de la base de la tige principale. Ces talles développent leurs propres feuilles et tiges, contribuant à la canopée et à la biomasse globales des plantes. Le tallage est une étape importante pour déterminer le rendement potentiel du blé, car il détermine le nombre de talles productives qui porteront finalement le grain. Le tallage tardif se produit vers la fin de la période végétative et marque le début de la phase de reproduction.

B. Période de reproduction

B.1. Stade boulon-gonflement

Au cours de la période de reproduction, le plant de blé subit plusieurs stades. Le stade boulon-gonflement est caractérisé par l'allongement de la tige principale ou du chaume et le gonflement du premier nœud, également appelé joint ou nœud de la tige de blé. Cette étape marque la transition de la croissance végétative à la croissance reproductive, et la plante commence à allouer plus de ressources au développement des fleurs.

B.2. Stade d'épiaison - floraison

Le stade d'épiaison est lorsque le plant de blé produit des fleurs ou des épillets à l'extrémité de la tige principale et des talles. Cette étape est également connue sous le nom de floraison, et c'est une période critique pour la pollinisation et la fertilisation. Les fleurs de blé sont autofécondées et nécessitent des conditions environnementales appropriées, telles qu'une humidité et une température adéquates, pour une pollinisation et une fertilisation réussie.

B.3. Stade de remplissage des grains

Après une pollinisation et une fertilisation réussie, les fleurs de blé se transforment en grains et la plante entre dans le stade de remplissage des grains. Au cours de cette étape, les grains accumulent de l'amidon, des protéines et d'autres nutriments, et ils continuent de croître en taille et en poids.

C. Période de maturité

Le plant de blé atteint sa maturité lorsque les graines sont complètement développées et sont devenues dures et sèches. La culture est prête à être récoltée à ce stade.

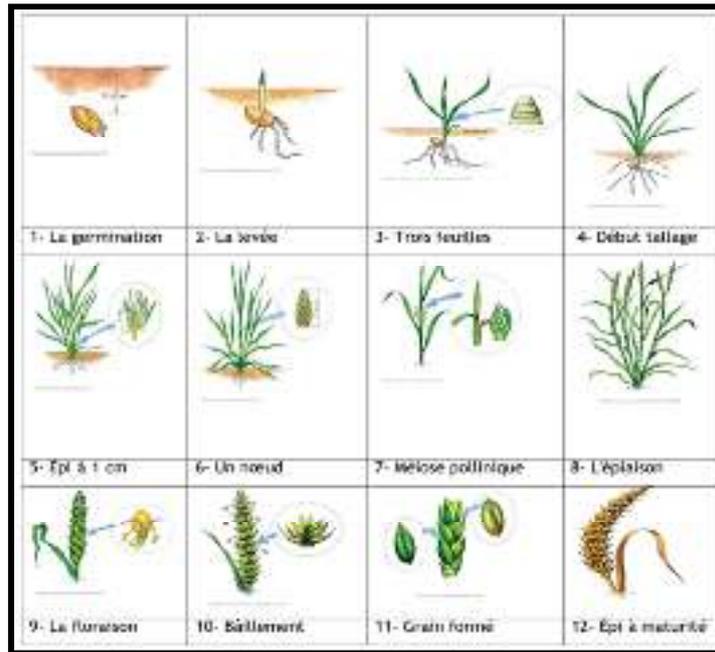


Figure 3: Le cycle de développement du blé [20]

Le moment et la durée de ces étapes peuvent varier en fonction de divers facteurs tels que le climat, les conditions du sol et le cultivar de blé, et des pratiques de gestion appropriées à chaque étape sont essentielles pour obtenir un rendement et une qualité de blé optimaux [21].

II.4 Morphologie de blé

A. Le système racinaire du blé

Le système racinaire du blé est une partie importante de sa morphologie et joue un rôle essentiel dans l'absorption de l'eau, des nutriments et de l'ancrage de la plante dans le sol. Il se compose de deux principaux types de racines : les racines primaires et les racines latérales [22].

- **Racines primaires** : Les plants de blé ont une racine primaire, également connue sous le nom de racine pivotante, qui émerge de la graine en germination et pousse verticalement vers le bas dans le sol. La racine primaire est épaisse et longue, et elle donne naissance à des racines latérales, qui sont des racines plus petites qui se ramifient à partir de la racine primaire.
- **Racines latérales** : Les racines latérales sont des racines secondaires qui proviennent de la racine primaire et se propagent horizontalement dans le sol. Ces racines jouent un rôle crucial dans l'absorption de l'eau et des nutriments d'un plus grand volume de sol et aident à ancrer fermement la plante dans le sol.

B. Le système aérien du blé

Le système aérien du blé comprend la tige et les feuilles, qui sont au-dessus du sol et sont responsables de la photosynthèse, de la croissance et de la reproduction de la plante.

B.1 La tige

La tige du blé est cylindrique et se compose de nœuds et d'entre-nœuds. Les nœuds sont les points de la tige où émergent les feuilles et les branches latérales, tandis que les entre-nœuds sont les espaces entre les nœuds. La tige fournit un support à la plante et transporte l'eau, les nutriments et les sucres entre les racines et les feuilles.

B.2 Les Feuilles

Les feuilles de blé sont longues et étroites, parcourues de nervures parallèles. Ils émergent des nœuds de la tige et jouent un rôle crucial dans la photosynthèse, où ils captent la lumière du soleil et la convertissent en énergie pour la plante. Les feuilles de blé sont disposées en alternance le long de la tige et ont une gaine qui s'enroule autour de la tige à la base du limbe de la feuille.

II.5. Exigence de blé

Le blé, une culture de base largement cultivée pour son grain, nécessite des conditions environnementales et de gestion spécifique pour une culture réussie. Voici quelques facteurs clés qui sont importants pour la culture du blé :

II.5.1. Température

Le blé est une culture de saison fraîche et a des exigences de température spécifiques pour une croissance optimale. La température idéale pour la culture du blé se situe généralement entre 15 et 25°C pendant la phase végétative et entre 20 et 25°C pendant la phase de reproduction. Les températures extrêmes, chaudes et froides, peuvent affecter négativement la croissance et le développement du blé. Le gel pendant les stades de floraison et de remplissage des grains peut entraîner une perte de rendement, tandis que des températures élevées pendant le remplissage des grains peuvent entraîner une mauvaise qualité du grain [23].

II.5.2. Eau

L'eau est un facteur critique dans la culture du blé. Le blé nécessite un approvisionnement en eau adéquat à différents stades de croissance pour une croissance et un rendement optimal. Les besoins en eau des cultures varient de 450 à 650 millimètres. Ces exigences sont relativement minimales en début de cycle. Ils sont principalement cruciaux de la phase d'épi de

1 cm à la floraison. En effet, la période hydrique indispensable dure 30 à 35 jours après la floraison, commençant 20 jours avant l'épiaison [24].

II.5.3. Éclairement

Le blé a besoin de suffisamment de lumière solaire pour la photosynthèse et une croissance optimale. Une intensité lumineuse ou un éclairage adéquat est essentiel pour la santé des plants de blé. Généralement, le blé nécessite un minimum de 6 à 8 heures d'ensoleillement par jour pour une croissance et un rendement optimal. Une lumière insuffisante peut entraîner une croissance médiocre, des tiges faibles et un développement réduit des grains [25].

II.5.4. Techniques culturales

Des techniques de culture appropriées sont cruciales pour la culture du blé. Cela comprend des pratiques telles que la préparation du lit de semence, les méthodes de semis, la rotation des cultures et la gestion des mauvaises herbes. Des lits de semence bien préparés, des méthodes de semis appropriées (telles que le semis ou la diffusion) et un contrôle opportun des mauvaises herbes sont importants pour une culture réussie du blé.

II.5.5. Travail du sol

Un bon travail du sol est essentiel pour la culture du blé. Une bonne préparation du sol, y compris le labour, l'hersage et le nivellement, est importante pour créer un lit de semence idéal pour le blé. Une fertilité, un pH et une structure du sol adéquats sont également des facteurs importants pour une croissance optimale du blé.

II.5.6. Choix de variétés

La sélection des bonnes variétés de blé adaptées au climat local, au type de sol et à la résistance aux maladies est essentielle pour une culture réussie du blé. Différentes variétés de blé ont des caractéristiques variables, telles que le mode de croissance, la période de maturité, la résistance aux maladies et le potentiel de rendement. Choisir les variétés de blé appropriées peut aider à maximiser le rendement et la qualité [26].

II.5.7. Fertilisation

Le blé a besoin de nutriments essentiels pour une bonne croissance et un bon développement. La gestion de la fertilité des sols par des pratiques de fertilisation appropriées est importante pour une culture optimale du blé. L'azote, le phosphore et le potassium sont les principaux nutriments nécessaires au blé, avec d'autres micronutriments. L'application d'engrais équilibrés basés sur l'analyse des éléments nutritifs du sol, le stade de la culture et les exigences de croissance est importante pour maximiser le rendement et la qualité du blé [27].

II.5.8. Irrigation

Une bonne gestion de l'irrigation est essentielle pour la culture du blé, en particulier dans les zones où les précipitations sont limitées ou l'approvisionnement en eau irrégulier. Le blé a besoin d'une humidité adéquate du sol à différents stades de croissance, en particulier pendant la phase de reproduction. La planification de l'irrigation basée sur la surveillance de l'humidité du sol, les conditions météorologiques et les besoins des cultures peut aider à assurer un approvisionnement en eau optimal pour la culture du blé [28].

II.6. Maladies du blé dur

Le blé est également sensible à diverses maladies qui peuvent affecter son rendement et sa qualité. Voici quelques maladies courantes qui affectent le blé dur [29] :

- **Fusariose de l'épi (gale) :** La fusariose de l'épi, causée par le champignon *Fusarium spp.*, peut infecter les épis de blé dur pendant la floraison, entraînant des épillets blanchis, des grains ratatinés et une contamination par les mycotoxines. La fusariose de l'épi peut entraîner une perte de rendement importante et une réduction de la qualité du grain.
- **Rouille rayée :** La rouille rayée, causée par le champignon *Puccinia striiformis*, peut infecter les feuilles de blé dur, provoquant des rayures jaune-orange sur les feuilles. Des infections graves peuvent entraîner une défoliation et une réduction de la photosynthèse, entraînant une perte de rendement.
- **Rouille des feuilles :** La rouille des feuilles, causée par le champignon *Puccinia triticina*, peut également infecter les feuilles de blé dur, provoquant des pustules brun orangé sur les feuilles. Des infections graves peuvent entraîner une défoliation et une réduction de la photosynthèse, entraînant une perte de rendement.
- **Oïdium :** L'oïdium est une maladie fongique qui apparaît sous forme de plaques blanches et poudreuses sur les feuilles, les tiges et les épis de blé dur. Il peut réduire la photosynthèse, inhiber la croissance des plantes et affecter le remplissage des grains.
- **Tache bronzée :** La tache bronzée est une maladie fongique causée par *Pyrenophora tritici-repentis* qui provoque des lésions nécrotiques avec des centres bronzés et des halos jaunes sur les feuilles de blé dur. Il peut réduire la photosynthèse et affaiblir la plante, entraînant une perte de rendement.

Des stratégies appropriées de gestion des maladies, y compris la rotation des cultures, l'utilisation de variétés de blé dur résistantes aux maladies, des applications de fongicides en temps opportun et des pratiques culturales telles que l'élimination des résidus de culture et le

maintien d'une bonne santé des plantes, peuvent aider à prévenir ou à atténuer l'impact de ces maladies sur le blé dur.

III. Généralités sur la germination du blé dur et son importance

La germination du blé dur est une étape cruciale pour assurer le succès de la culture. Lors de la germination, la graine absorbe de l'eau, ce qui déclenche une série de réactions biochimiques permettant l'activation du métabolisme de la plante en dormance. Cela conduit à la croissance de l'embryon de la plante et à l'émergence de la racicule et de la première feuille.

La germination réussie du blé dur est essentielle pour obtenir un bon établissement des cultures sur le terrain. Une germination uniforme et vigoureuse est importante pour assurer une émergence uniforme des plantules et une compétition minimale entre elles. Une émergence retardée ou inégale peut entraîner une réduction des rendements et une diminution de la qualité de la récolte.

La compréhension des mécanismes de la germination et des facteurs qui l'influencent revêt une importance capitale pour les chercheurs, les agronomes et les producteurs. Cela permet de développer des pratiques culturales plus efficaces, d'améliorer la conservation des semences, de mieux gérer les ressources en eau et de promouvoir la croissance et le développement des plantes de manière optimale.

Dans le contexte de notre étude, la germination du blé dur revêt une importance particulière, car elle constitue la première étape du développement des plantules soumises aux conditions de stress salin induites par le CaCl_2 . Comprendre les effets de la salinité sur la germination et les premières phases de croissance du blé dur nous permettra d'évaluer l'impact de ce stress sur la performance de la culture et d'identifier d'éventuelles stratégies d'amélioration de la tolérance des plantes au stress salin.

Chapitre 2 : Généralités sur le stress salin

I. Définition du stress

Le stress est un ensemble de conditions qui peuvent causer des dommages, des blessures, une inhibition de la croissance ou du développement des plantes. On distingue deux grandes catégories de stress : le stress biotique, qui est imposé par d'autres organismes tels que les microorganismes, les insectes, les herbivores, etc., et le stress abiotique, qui est provoqué par un défaut ou un excès de l'environnement physico-chimique, comme la sécheresse, les températures extrêmes la salinité (stress salin), etc. Les plantes peuvent développer des stratégies d'adaptation pour faire face à ces différents types de stress, notamment en ajustant leur teneur en solutés organiques, en accumulant des ions toxiques dans le compartiment vacuolaire ou en excluant les ions toxiques du cytoplasme à l'aide de transporteurs membranaires spécifiques [30].

II.1 Définition de la salinité

La salinité fait référence à la concentration de sels dissous, principalement le chlorure de sodium (NaCl), dans le sol ou l'eau. Elle est mesurée en termes de conductivité électrique (CE) ou de solides dissous totaux (TDS) et est exprimée en milligrammes de sels par litre d'eau (mg/L) ou parties par million (ppm) [31]. La salinité peut avoir un impact négatif sur la croissance et le développement des plantes en affectant l'absorption d'eau, l'équilibre ionique et divers processus physiologiques et biochimiques chez les plantes [32].

II.2 Causes de la salinité

La salinité peut se produire dans des environnements naturels en raison de facteurs géologiques et climatiques, tels que l'altération des roches, les activités volcaniques et l'intrusion d'eau de mer. Elle peut également résulter d'activités humaines, telles que l'irrigation avec de l'eau salée, l'utilisation excessive d'engrais et de mauvaises pratiques de drainage, entraînant une salinité secondaire [33]. La salinité est un stress abiotique majeur qui limite la productivité des cultures dans de nombreuses régions agricoles du monde, y compris les zones de culture du blé dur (*Triticum durum*).

II.3 Origine de la salinité

Il existe plusieurs sources de salinité, qui peuvent entraîner une augmentation des niveaux de sel dans les plans d'eau, les sols et les eaux souterraines. Certaines des principales sources de salinité sont :

- **Altération naturelle et érosion** : Au fil du temps, les roches et les minéraux de la croûte terrestre se décomposent, libérant des sels dissous dans l'eau et le sol environnants [34].

- **Intrusion d'eau de mer** : Dans les zones côtières, l'intrusion d'eau de mer dans les aquifères d'eau douce peut entraîner une augmentation de la salinité des eaux souterraines. Cela peut se produire en raison d'un pompage excessif des eaux souterraines, qui crée un gradient hydraulique qui attire l'eau de mer dans les aquifères d'eau douce [35].
- **Pratiques d'irrigation** : Lorsque l'eau est appliquée aux cultures ou aux champs, elle peut dissoudre les sels dans le sol, et une irrigation excessive ou un mauvais drainage peut provoquer une accumulation de sels dans le sol et l'eau, entraînant une augmentation de la salinité [36].
- **Processus naturels** : Certains processus naturels, tels que l'évaporation et l'évapotranspiration, peuvent également contribuer à la salinité des masses d'eau et des sols [37].
- **Facteurs climatiques et environnementaux** : Des facteurs climatiques et environnementaux, tels que des conditions arides ou semi-arides, des taux d'évaporation élevés et de faibles précipitations, peuvent entraîner une augmentation de la salinité des masses d'eau et des sols [38].

II.4 Différents types de salinité

La salinité peut être classée en deux types principaux : la salinité primaire, et la salinité secondaire [39].

II.4.1 Salinité primaire

La salinité primaire est principalement associée aux régions où le sol et l'eau ont une teneur élevée en sel, telles que les zones côtières, les régions arides et semi-arides et les régions aux sols salins naturels. La salinité primaire peut se produire en raison de l'altération des roches, des activités volcaniques et de l'intrusion d'eau de mer.

II.4.2 Salinité secondaire

La salinité secondaire, quant à elle, est causée par les activités humaines telles que l'irrigation avec de l'eau salée, l'utilisation excessive d'engrais et les mauvaises pratiques de drainage, qui peuvent entraîner l'accumulation de sels dans le sol.

III. Salinité dans le monde et en Algérie

III.1 Salinité dans le monde

La salinité est un problème mondial, de nombreuses régions étant confrontées au défi de la salinisation des sols et de l'eau. Selon l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), environ 20 % des terres cultivées dans le monde sont affectées par la salinité, et ce pourcentage devrait augmenter en raison du changement climatique et des

mauvaises pratiques d'irrigation [40].

III.2 Salinité en Algérie

L'Algérie est un pays situé en Afrique du Nord, connu pour sa production agricole, notamment la culture du blé dur [41]. Cependant, la salinité est une préoccupation majeure dans de nombreuses régions agricoles d'Algérie, les sols et les sources d'eau affichant des niveaux croissants de salinité en raison de la sur-extraction des eaux souterraines, des systèmes de drainage inadéquats et de mauvaises pratiques d'irrigation.

IV. Conséquence du stress salin

Le stress salin peut avoir diverses conséquences sur les plantes, notamment une germination réduite, une croissance et un développement altérés des plantes, une diminution de la photosynthèse, une altération du métabolisme de l'azote et des changements dans la morphologie des plantes.

V. Effet du stress salin sur la plante de blé dur (*Triticum durum*)

V.1 Effet sur la germination

La salinité dans le sol peut entraîner une réduction de la germination des graines, notamment en inhibant l'absorption d'eau nécessaire à la germination. De plus, la salinité peut également affecter la viabilité des graines, en entraînant une diminution de leur capacité à germer normalement [42].

V.2 Effet sur la croissance et le développement

Les niveaux élevés de sel dans le sol peuvent causer un stress osmotique, ce qui peut entraîner une diminution de la croissance racinaire, une réduction de la croissance aérienne et une diminution de la production de biomasse [43]. De plus, la salinité peut également provoquer des perturbations dans le développement des organes reproducteurs du blé dur, tels que les fleurs et les grains, ce qui peut réduire le rendement de la culture.

V.3 Effet sur la photosynthèse

Les niveaux élevés de sel dans le sol peuvent entraîner une réduction de la capacité du blé dur à effectuer la photosynthèse, notamment en perturbant la disponibilité du CO₂, en altérant la structure et la fonction des chloroplastes, ainsi qu'en influençant la synthèse des pigments chlorophylliens [44].

V.4 Effet sur le métabolisme de l'azote (N)

La salinité dans le sol peut entraîner une réduction de l'absorption d'azote par les racines, ainsi qu'une altération du métabolisme de l'azote dans les feuilles [45]. Cela peut entraîner une accumulation d'ammonium toxique dans les tissus du blé dur, ainsi qu'une diminution de la synthèse des protéines et d'autres composés azotés essentiels, ce qui peut affecter la croissance et le développement de la plante [46].

V.5 Effet sur la morphologie

V.5.1 Effet de la salinité sur les racines

Les niveaux élevés de sel dans le sol peuvent entraîner une diminution de la croissance des racines, ainsi qu'une réduction de leur longueur et de leur densité [47]. Les racines peuvent également présenter des anomalies structurelles, telles que la réduction du nombre de racines latérales et l'épaississement des racines principales. De plus, la salinité peut également perturber l'absorption d'eau et de nutriments par les racines [48].

V.5.2 Effet de la salinité sur les tiges

La salinité peut également causer des anomalies dans la structure des tiges, notamment en perturbant la formation de vaisseaux conducteurs d'eau et de nutriments, ce qui peut altérer la circulation des substances nécessaires à la croissance de la plante.

V.5.3 Effet de la salinité sur les feuilles

Les niveaux élevés de sel dans le sol peuvent provoquer des symptômes de stress sur les feuilles, tels que le jaunissement, la nécrose des bords et des pointes des feuilles, ainsi que la chute prématurée des feuilles [49].

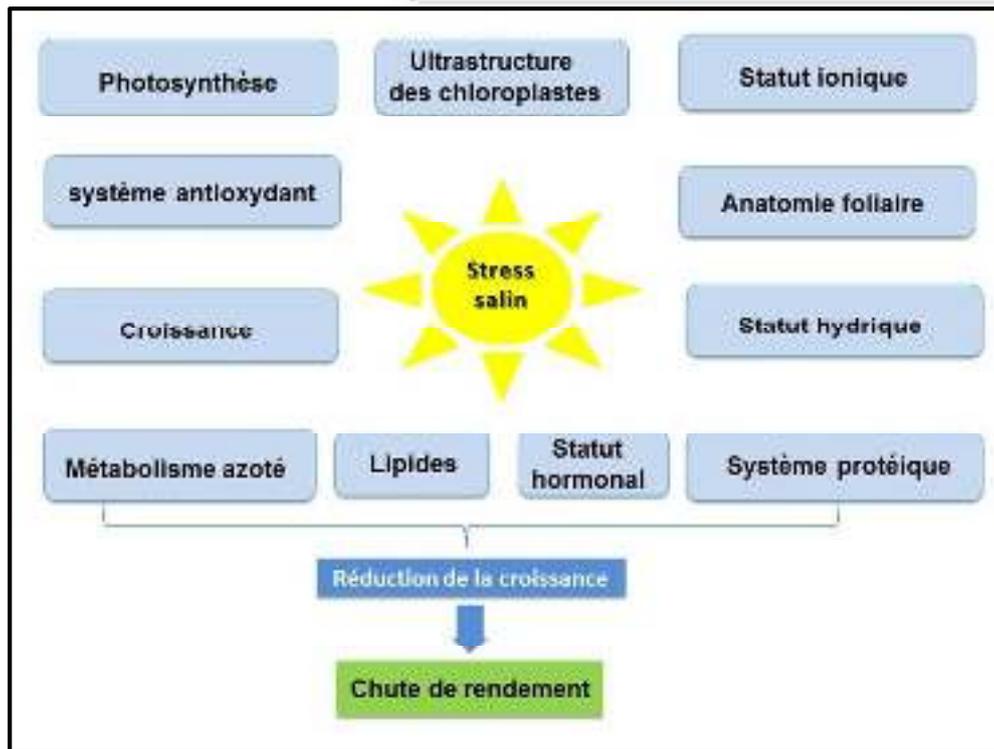


Figure 4: Principaux effets d'une forte salinité sur les plantes [50]

VI. Stratégies d'adaptation à la salinité chez les plantes

VI.1 Compartiment vacuolaire

La vacuole est un organite cellulaire qui peut stocker les ions toxiques tels que le sodium (Na^+) et le chlorure (Cl^-) dans les cellules végétales. Ce stockage dans la vacuole permet de maintenir les concentrations de ces ions toxiques à des niveaux bas dans le cytoplasme, ce qui réduit leur toxicité pour la plante. Les plantes peuvent également accumuler d'autres ions tels que le potassium (K^+) dans la vacuole pour maintenir un équilibre ionique approprié et minimiser les effets négatifs du stress salin [51].

VI.2 Exclusion des ions toxiques

Les plantes peuvent également développer des mécanismes d'exclusion des ions toxiques du système racinaire pour éviter leur absorption. Par exemple, les plantes peuvent limiter l'entrée du sodium dans les racines en régulant les transporteurs de sodium dans les membranes cellulaires racinaires, ce qui réduit l'absorption du sodium du sol. De plus, les plantes peuvent également sécréter le sodium absorbé dans les cellules racinaires vers l'extérieur des racines via des canaux spécifiques, ce qui empêche son accumulation excessive dans les parties aériennes de la plante [52].

VI.3 Ajustement osmotique

Lorsque les plantes sont exposées à des niveaux élevés de sel, elles peuvent accumuler des solutés compatibles dans les cellules pour maintenir l'équilibre osmotique et éviter la déshydratation. Ces solutés compatibles peuvent inclure des composés organiques tels que les prolines, les acides aminés, les polyols et les sucres, qui aident à maintenir l'équilibre osmotique et protègent les cellules contre les dommages dus à la salinité. De plus, les plantes peuvent également ajuster leur capacité à transporter l'eau en régulant l'ouverture et la fermeture des stomates, les structures responsables de la transpiration et de l'échange gazeux, pour minimiser la perte d'eau due à la transpiration excessive en cas de stress salin [53].

Chapitre 3 : Relation entre l'acide salicylique et la salinité

I.1 Définition de l'acide salicylique

L'acide salicylique est une phytohormone, également connue sous le nom d'hormone végétale, présente naturellement chez les plantes. Elle joue un rôle important dans la croissance et le développement des plantes [54].

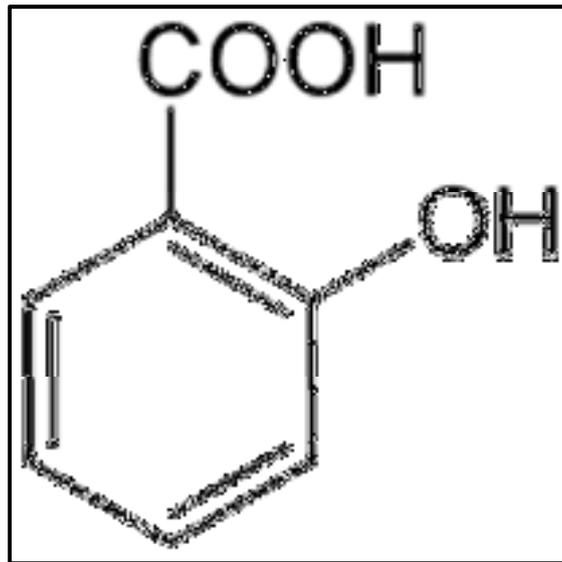


Figure 5: Acide salicylique [55]

II.2 Propriété physicochimique

L'acide salicylique est un composé organique qui se présente sous forme de cristaux incolores. Il est légèrement soluble dans l'eau et soluble dans les solvants organiques tels que l'éthanol. Il peut être synthétisé par les plantes ou obtenu à partir de sources externes [56].

III.2 La biosynthèse de l'acide salicylique

L'acide salicylique est synthétisé à partir de l'acide chorismique, un composé clé de la voie de biosynthèse des acides aminés aromatiques chez les plantes. Plusieurs enzymes sont impliquées dans la conversion de l'acide chorismique en acide salicylique [57].

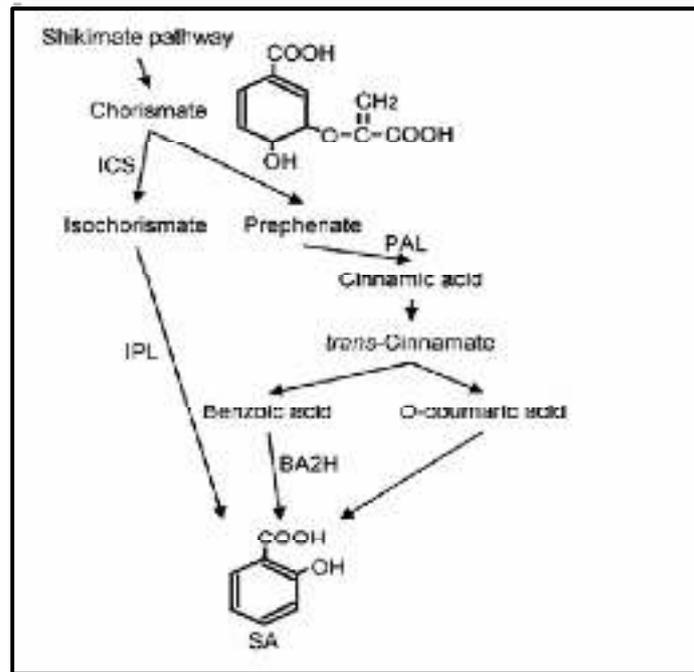


Figure 6: La biosynthèse de l'acide salicylique [50]

III.3 Rôle de l'acide salicylique

L'acide salicylique joue un rôle crucial dans la réponse des plantes aux stress biotiques (causés par des agents pathogènes) et abiotiques (tels que la sécheresse, le froid, la chaleur, etc.). Il régule également la croissance et le développement des plantes, y compris la germination des graines, la formation des racines, la floraison, la sénescence des feuilles, etc.

III.4 Effets de l'acide salicylique sur la plante

III.4.1 Effets sur la croissance

L'acide salicylique peut favoriser la croissance des plantes en stimulant la division cellulaire, en augmentant la longueur des racines, en améliorant la morphologie des feuilles et en favorisant la formation de nouvelles tiges [58].

III.4.2 Effets sur la photosynthèse

L'acide salicylique peut améliorer l'efficacité de la photosynthèse en augmentant la teneur en chlorophylle, en favorisant la capture de la lumière et en régulant l'activité des enzymes photosynthétiques.

III.4.3 Effets sur le métabolisme de nitrate

L'acide salicylique peut influencer le métabolisme de l'azote chez les plantes, en particulier la réduction et l'assimilation des nitrates, qui sont essentiels pour la croissance et le développement des plantes.

III.4.4 Effet sur la floraison

L'acide salicylique peut réguler la floraison en contrôlant l'initiation des boutons floraux et en régulant l'expression des gènes impliqués dans le développement floral.

III.4.5 Effet sur la biosynthèse de l'éthylène

L'acide salicylique peut interagir avec l'éthylène, une autre phytohormone, et influencer sa biosynthèse dans les plantes. L'éthylène est impliqué dans divers processus de croissance et de développement, tels que la maturation des fruits, la sénescence des fleurs et la réponse au stress.

III.5 Relation entre l'acide salicylique et la salinité

Des études ont montré que l'acide salicylique peut jouer un rôle dans la réponse des plantes à la salinité. Il peut atténuer les effets négatifs du stress salin en régulant l'équilibre osmotique, en réduisant le stress oxydatif et en améliorant la tolérance des plantes à la salinité. Cependant, les mécanismes précis de cette interaction ne sont pas encore entièrement compris et nécessitent davantage de recherches [59].

Partie Expérimentale

I. Objectif de l'expérimentation

L'objectif de cette étude consiste à investiguer les effets dépressifs de la salinité induite par le CaCl₂ à deux concentrations croissantes (50 et 100 mM) sur la germination et la croissance des plantes de blé dur des variétés "SIMETO" et "VITRON". Parallèlement, nous avons évalué l'efficacité de deux doses d'acide salicylique (0,5 g et 1 g) afin de déterminer la dose la plus stimulante permettant d'obtenir une régulation osmotique optimale chez les plantules de blé dur soumises à des conditions de stress salin, tant lors de la phase de germination que de la phase de croissance active.

En menant cette étude, nous cherchons à mettre en évidence les répercussions négatives de la salinité induite par le CaCl₂ sur la germination et la croissance des plantes de blé dur, tout en explorant les possibilités d'améliorer la régulation osmotique des plantules grâce à l'application d'acide salicylique. Les résultats obtenus contribueront à une meilleure compréhension des réponses des variétés de blé dur face au stress salin et pourraient permettre de développer des stratégies visant à améliorer leur tolérance à la salinité.

II. Matériel et méthodes

II.1. Matériel végétal utilisé

Le matériel végétal utilisé est constitué de deux variétés de blé dur (*Triticum durum*), variété (Simeto) et (Vitro) dont les semences testées sont obtenues de l'institut Technique des Grandes cultures (ITGC) d'Oued Smar, wilaya d'Alger. L'expérience a été réalisée au printemps de 11/04/2023 au 15/05/2023.



Figure 7: Graines de blé dur (Simeto) et (Vitron)

II.2. Matériels utilisés

- Boîtes de Pétri en plastique : Ces boîtes ont un diamètre de 4,5 cm et sont utilisées comme supports pour les échantillons.
- Papier filtre : Un morceau de papier filtre est placé au fond de chaque boîte de Pétri pour faciliter l'absorption des solutions d'irrigation.
- Sel : Le sel utilisé dans cette expérience est le CaCl_2 (chlorure de calcium). Deux concentrations sont utilisées : 50 mM et 100 mM.
- Acide salicylique (AS) : Deux doses d'acide salicylique sont combinées avec les solutions de CaCl_2 , à savoir 0,5 g et 1 g.
- Bécher
- Firole
- Agitateur magnétique
- Eau distillée
- Balance de précision
- Plaque alvéole

III. Conditions expérimentales

III.1 Lieu de l'expérimentation

Notre étude a été réalisée au niveau du laboratoire d'amélioration de plante situé au sein du département de Biotechnologies, Université de Blida 1. Ce site contient les équipements nécessaires à la réalisation de l'ensemble des essais et expérimentations sur le blé dur. Ce laboratoire fermé qui dispose d'un système de ventilation interne climatisé pour maintenir une température spécifique de 25 degrés Celsius, et contient également un éclairage LED à l'intérieur. Ce type de laboratoire est couramment utilisé dans la recherche scientifique et les expériences qui nécessitent un environnement étanche à l'air et un contrôle précis de la température, de l'humidité et de l'éclairage.



Figure 8: Laboratoire d'amélioration de plante

VI. Dispositif expérimentale

VI.1. Méthodes de stérilisation des graines

Avant la mise en germination des graines de blé dur dans les boîtes de Pétri, un test de stérilisation du matériel végétal a été effectué selon les étapes suivantes :

- 1- Sélection des graines de blé de premier ordre.
- 2- Lavez les graines de blé abandonnées avec de l'eau distillée pendant deux minutes.
- 3- Pour la désinfection, trempez les graines dans une solution d'eau de javel diluée à 20%.
- 4- Rincer abondamment les graines avec de l'eau pour éliminer l'eau de javel, qui est très nocive pour les graines de blé.

VI.2. 1ère expérience : Phase de Germination

Notre expérimentation étudie l'efficacité du stress salin sur le blé dur ainsi que l'effet de l'acide salicylique sur ce stress salin. Pour cela, nous avons préparé les solutions suivantes :

T0 : Eau distillée (témoin)

Nous remplissons une fiole propre avec de l'eau distillée.

T1 : Eau distillée avec 50 mM de CaCl_2

Nous dissolvons la quantité appropriée de CaCl_2 solide dans une éprouvette propre remplie d'eau distillée.

Ensuite, nous transférons la solution dans une fiole propre et nous l'étiquetons "T1".

T2 : Eau distillée avec 100 mM de CaCl₂

Nous suivons les mêmes étapes que pour T1, mais nous utilisons la quantité appropriée de CaCl₂ pour obtenir une concentration de 100 mM.

Ensuite, nous transférons la solution dans une fiole propre et nous l'étiquetons "T2".

T3-T6 : Eau distillée avec CaCl₂ et acide salicylique

Nous préparons les solutions de CaCl₂ pour T3 et T4 comme décrit précédemment pour T1 et T2, respectivement.

Ensuite, nous dissolvons la quantité appropriée d'acide salicylique dans les solutions de CaCl₂, en fonction de la concentration souhaitée (0,5 mM ou 1 mM).

Nous transférons chaque solution dans une fiole étiquetée (T3, T4, T5, T6).

- Le mode opératoire de notre expérience est le suivant :

1- Préparation des boîtes de Pétri : Nous obtenons 7 boîtes de Pétri stériles et nous plaçons un morceau de papier absorbant à l'intérieur de chaque boîte.

2- Placement des graines de blé dur : Nous mettons 10 grains de blé dur dans chaque boîte de Pétri. Nous utilisons les variétés "Simeto" et "Vitron".

3- Préparation des solutions en respectant les concentrations et les volumes indiqués. Pour chaque solution, nous avons besoin de l'eau distillée correspondante et du CaCl₂ à la concentration indiquée. Si nous devons également ajouter de l'acide salicylique, nous le dissolvons dans la solution de CaCl₂ en respectant la quantité appropriée.

4- Ajout des solutions aux boîtes de Pétri : Nous versons la quantité spécifiée de chaque solution dans la boîte de Pétri correspondante contenant les graines de blé dur. Nous nous assurons de verser la quantité appropriée de chaque solution pour obtenir les concentrations souhaitées. Nous étiquetons chaque boîte de Pétri pour identifier le traitement correspondant.

Une fois que nous avons ajouté les solutions, nous pouvons procéder à l'observation et à l'enregistrement des effets des différents traitements sur la germination des graines de blé dur



Figure 9: Aspect des plantes après 5 jours de germination

VI.3. 2ème expérience : Phase végétative

Pour la deuxième expérience :

1. Nous avons pris de nouveaux grains (7 Simeto et 7 Vitron) que nous avons plantés dans de la tourbe, à l'aide d'une plaque de culture alvéolée rigide spécialement conçue pour les grains. Nous avons attendu qu'ils achèvent leur stade de germination.
2. Les gobelets en plastique ont été préparés et nous avons découpé du polyester pour qu'il s'adapte au fond de chaque gobelet. Les solutions désignées (de T0 à T6) ont été versées dans les gobelets.
3. Nous avons fixé chaque plante (7 Simeto et 7 Vitron) dans le polyester, avec la partie aérienne vers le haut et les racines vers le bas, de manière à ce qu'elles touchent les solutions au fond des gobelets en plastique.
4. Après 15 jours, les grains ont été retirés et leur hauteur et leur poids ont été mesurés.



Figure 10: Aspect général des jeunes plantules de blé dur

VI.4. Description des différents traitements utilisés

T0 : Eau distillée (témoin)

T1 : Eau distillée avec 50mM de CaCl₂

T2 : Eau distillée avec 100mM de CaCl₂

T3 : Eau distillée avec 50mM de CaCl₂ + 0.5mM de l'acide salicylique.

T4 : Eau distillée avec 100mM de CaCl₂ + 0.5mM de l'acide salicylique.

T5 : Eau distillée avec 50mM de CaCl₂ + 1mM de l'acide salicylique.

T6 : Eau distillée avec 100mM de CaCl₂ + 1mM de l'acide salicylique



Figure 11: Les différents traitements utilisés

VI.5. Paramètres mesurés

VI.5.1 Paramètres morphologique

A. Taux de germination final

Le taux de germination final est un paramètre important pour déterminer la concentration saline limite qui affecte la germination des graines. Il est calculé en divisant le nombre de graines germées par le nombre total de graines et est exprimé en pourcentage. Par exemple, si

80 graines ont germé sur un total de 100 graines, le taux de germination final serait de 80%. Ce paramètre est souvent utilisé pour évaluer la qualité des semences et pour déterminer les conditions optimales de germination.

B. Hauteur finale des plantes et la longueur des racines (cm)

La hauteur finale des plantes et la longueur des racines sont mesurées au moment de la coupe à l'aide d'une règle graduée. Ces mesures sont essentielles pour évaluer la croissance et le développement des plantes, ainsi que pour comparer l'efficacité des traitements appliqués les conditions environnementales (Salinité). Les mesures sont généralement exprimées en centimètres (cm) et doivent être effectuées avec précision et selon des techniques standardisées pour obtenir des résultats fiables et significatifs.

C. Biomasse fraîche produite

Au moment de la coupe, nous avons pesé les deux parties de la plante (partie aérienne : feuilles + tiges ; partie souterraine : racines) en grammes à l'aide d'une balance.

Les opérations se sont déroulées comme suit :

- Poids frais des feuilles + tiges de chaque plante.
- Poids frais des racines de chaque plante.

Ces mesures nous permettent d'estimer la quantité de matière présente dans chaque partie de la plante à ce moment précis. Il est important de noter que le poids frais peut varier en fonction de l'humidité des tissus végétaux. Par conséquent, il est recommandé de réaliser ces mesures immédiatement après la coupe afin de limiter les pertes d'humidité. Il est également préférable d'utiliser une balance précise pour obtenir des résultats fiables.

Résultats et Discussion

I. Effet de la salinité exercée par 50 et 100 mM de CaCl₂ combinée avec 0,5 et 1g d'acide salicylique sur les paramètres de germination :

I.1. Effet sur la faculté germinative (FG%)

L'influence de différentes concentrations de CaCl₂ (50 mM et 100 mM) en combinaison avec des concentrations d'acide salicylique (0,5 mM et 1 mM) sur le taux de germination des variétés de blé dur (Vitron et Simeto) a été étudiée. Les résultats sont présentés dans l'histogramme ci-dessous.

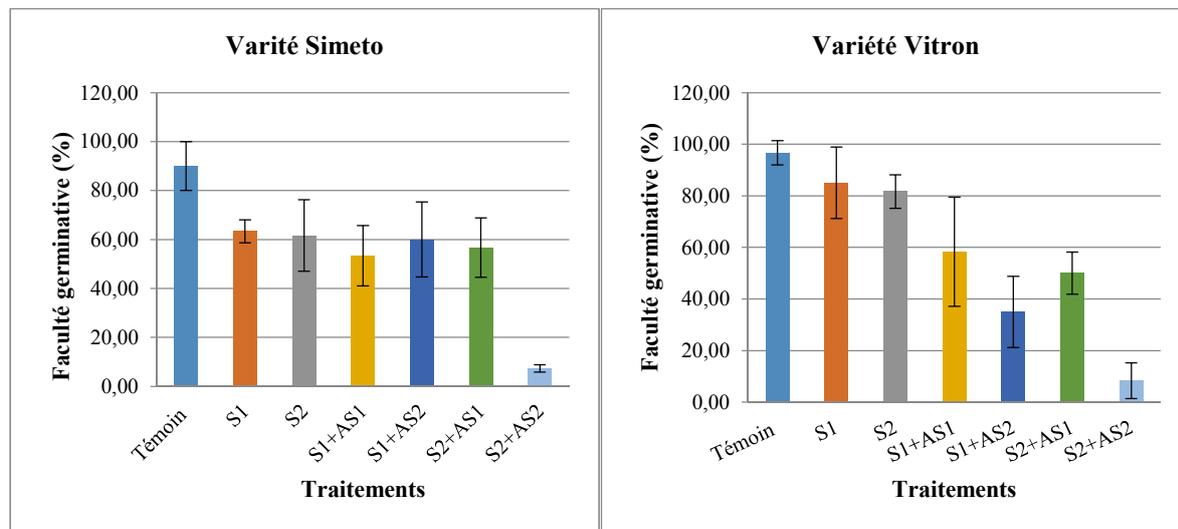


Figure 12: Impact de l'acide salicylique (0.5 et 1 mM) et du CaCl₂ (100 et 200 mM), ainsi que de leur combinaison, sur le taux de germination des deux variétés de graines de blé (Simeto et Vitron) pendant une semaine de culture par rapport au témoin (T0)

Selon les résultats obtenus, une diminution significative et remarquable de la faculté germinative a été observée en raison de la salinité provoquée par des concentrations de 50 et 100 mM de CaCl₂. Pour la variété Simeto, des réductions d'environ 29,63% pour le traitement S1 et 31,47% pour le traitement S2 ont été enregistrées. En ce qui concerne la variété Vitron, des réductions d'environ 12,07% pour le traitement S1 et 15,42% pour le traitement S2 ont été observées.

Les travaux réalisés par Kheloufi ainsi que par Chorfi et Mansouri (2018) ont permis de démontrer que l'ajout de CaCl₂ a un impact significatif sur la capacité germinative et la vitesse de germination des variétés étudiées. On observe une diminution de ces paramètres avec l'augmentation de la concentration de CaCl₂.

Cependant, lorsqu'une concentration de 0,5 mM d'acide salicylique a été appliquée en combinaison avec 50 mM de CaCl₂ (S1+AS1), une diminution significative de la faculté germinative a été observée chez les deux variétés. Les taux de germination enregistrés étaient de 53,33% et 58,33% respectivement pour les deux variétés testées. En revanche, la combinaison de 100 mM de CaCl₂ avec 0,5 mM d'acide salicylique (S1+AS2) a entraîné une amélioration notable de la faculté germinative chez la variété Simeto, tandis qu'une diminution a été observée chez la variété Vitron. Les taux de germination étaient de 60% et 35% respectivement pour les deux variétés étudiées. De plus, il est à noter que la combinaison de 1 mM d'acide salicylique avec 50 mM de CaCl₂ (S2+AS1) a montré des taux de germination de 56,67% et 50% respectivement pour les deux variétés étudiées.

Il est important de souligner que la combinaison de 100 mM de CaCl₂ avec 1 mM d'acide salicylique (S2+AS2) a révélé les taux de germination les plus faibles pour les deux variétés testées par rapport aux autres traitements.

I.2. Effet de la CaCl₂ et l'acide salicylique sur la longueur de la partie aérienne de deux variétés testées (stade germinatif)

Les résultats de l'effet de la salinité exercé par 50 et 100 mM de CaCl₂ combinée ou non avec 0,5 et 1mM d'acide salicylique sur la longur de la partie aérienne des deux vraietés de blé dur (Vitron et Simeto) sont illustrées dans l'histyogramme suivant.

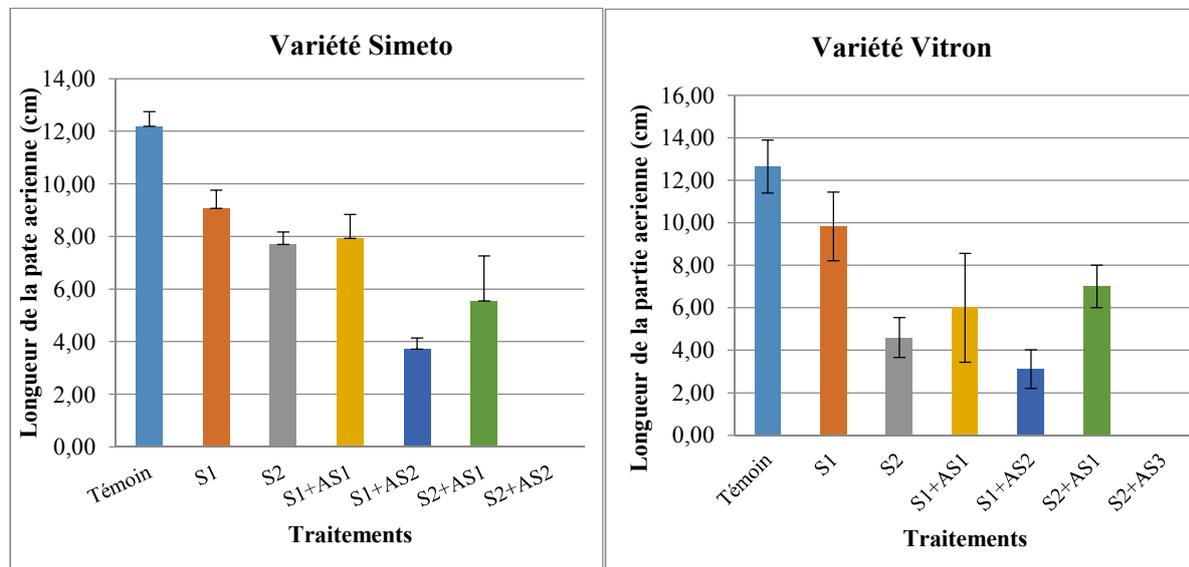


Figure 13: Impact de la salinité et de l'acide salicylique sur la longueur de la partie aérienne des variétés de blé dur (Simeto et Vitron) en stade germinatif

D'après ces résultats, nous avons constatés un effet dépressif significativement remarquable de la salinité exercée par 50 et 100 mM de CaCl_2 . Cette réduction correspond à 25,59% et 36,83% respectivement pour la longueur de la partie aérienne chez la variété Simeto alors que pour la variété Vitron, les réductions enregistrées sont de l'ordre de 22,29% et 63,63%.

Les travaux de Amara et Benrima (2017) ont montrés que, la croissance en longueur des tiges et des racines diminuent avec l'augmentation de l'intensité du stress salin conformément à ce que plusieurs auteurs ont remarqué chez le petit pois (Okcu, Kaya et Atar (2005) ; les céréales (Atak, Kaya, Kaya, Cikili , Ciftci, 2006) ; la luzerne (Abdul Qados 2011).

En revanche, l'application de 0,5 mM de l'acide salicylique associé avec 50 mM de CaCl_2 (S1+AS1) à révéler une amélioration remarquable de la longueur de la partie aérienne chez la variété Simeto comparativement à la variété Vitron. Les longueurs enregistrées correspondent à 7,93 cm et 6 cm chez les deux variétés testées respectivement. Alors que la combinaison 100 mM de CaCl_2 avec 0,50 mM d'acide salicylique (S2+AS1) a exercé une amélioration remarquable de la longueur de la partie aérienne chez la variété Vitron comparativement à la variété Simeto. Les longueurs enregistrées sont de 5,55cm et 7, cm respectivement chez les deux variétés étudiées.

Il est à noter que la combinaison 50 mM de CaCl_2 avec 1 mM d'acide salicylique (S1+AS2) à révéler les longueurs de la partie aériennes des deux variétés testées les plus faibles par rapport aux traitements étudiés.

I.3. Effet de la CaCl_2 et l'acide salicylique sur la longueur de la partie racinaires de deux variétés testées (stade germinatif)

Les résultats de l'effet de la salinité exercé par 50 et 100 mM de CaCl_2 combinée ou non avec 0,5 et 1mM d'acide salicylique sur la longueur de la partie racinaires des deux variétés de blé dur (Vitron et Simeto) sont illustrées dans l'hystogramme suivant.

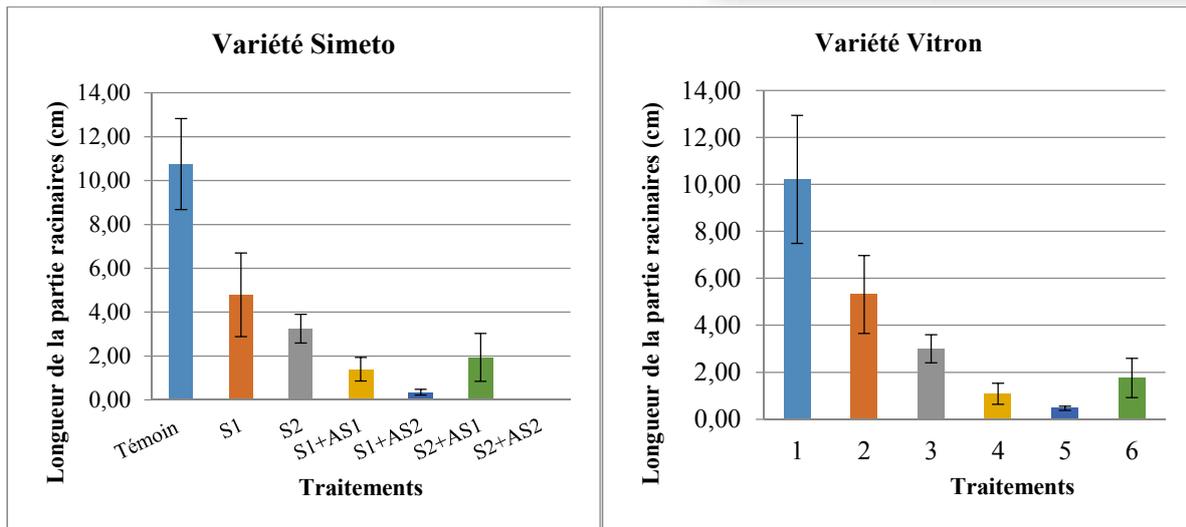


Figure 14: Impact de la salinité et de l'acide salicylique sur la longueur de la partie racinaires des variétés de blé dur (Simeto et Vitron) en stade germinatif

D'après ces résultats, nous avons constatés un effet dépressif significativement remarquable de la salinité exercée par 50 et 100 mM de CaCl_2 . Cette réduction correspond à 55,44% et 69,76% respectivement pour la longueur de la partie racinaires chez la variété Simeto alors que pour la variété Vitron, les réductions enregistrées sont de l'ordre de 47,99% et 70,61%.

Ces résultats confirment la recherche de (Tuteja, 2007), selon laquelle les plantes perçoivent la présence de fortes concentrations de sulfate de sodium dans le sol, ce qui entraîne une diminution de la croissance des racines. Le système racinaire est plus sensible à la salinité que les parties aériennes de la plante (Radhouane, 2008).

En revanche, l'application de 0,5 mM de l'acide salicylique associée avec 50 mM de CaCl_2 (S1+AS1) à une augmentation remarquable de la longueur de la partie racinaires chez la variété Simeto comparativement à la variété Vitron. Les longueurs enregistrées correspondent à 1.40 cm et 1.08 cm chez les deux variétés testées respectivement. Alors que la combinaison 100 mM de CaCl_2 avec 0,50 mM d'acide salicylique (S2+AS1) a exercé une amélioration remarquable de la longueur de la partie racinaire chez la variété Simeto comparativement à la variété Vitron. Les longueurs enregistrées sont de 1.94cm et 1.76 cm respectivement chez les deux variétés étudiées.

Il est à noter que la combinaison 50 mM de CaCl_2 avec 1 mM d'acide salicylique (S1+AS2) à révéler la longueur de la partie racinaires les plus faibles par rapport aux traitements étudiés.

I.4. Effet de la CaCl₂ et l'acide salicylique sur la biomasse fraîche de la partie aérienne de deux variétés testées (stade germinatif)

Les résultats de l'effet de la salinité exercé par 50 et 100 mM de CaCl₂ combinée ou non avec 0,5 et 1mM d'acide salicylique sur la biomasse fraîche de la partie aérienne des deux variétés de blé dur (Vitron et Simeto) sont illustrées dans l'histogramme suivant.

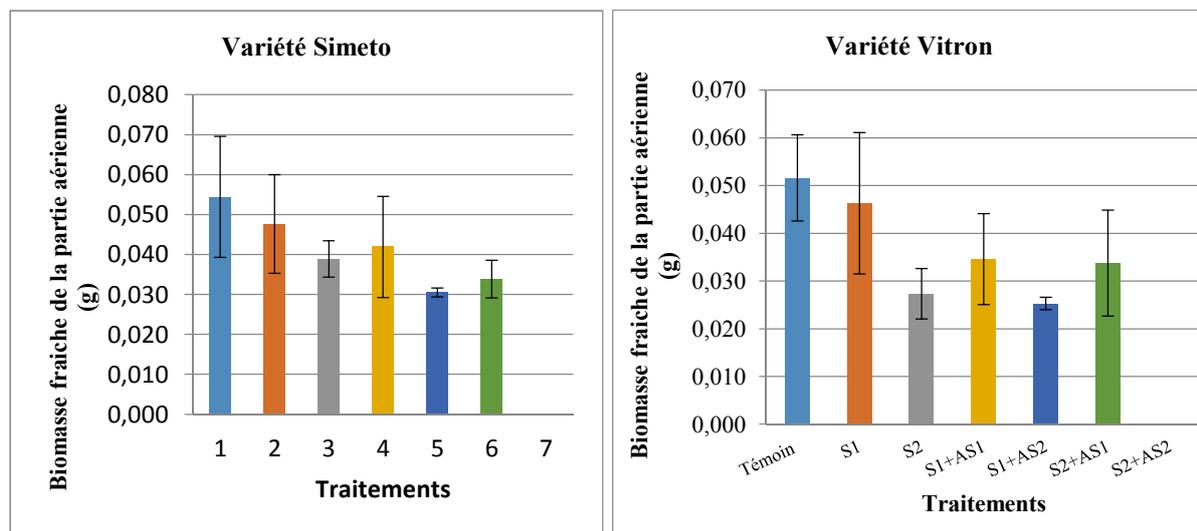


Figure 15: Impact de la salinité et de l'acide salicylique sur la biomasse fraîche de la partie aérienne des variétés de blé dur (Simeto et Vitron) en stade germinatif

D'après ces résultats, nous avons constatés un effet dépressif significativement remarquable de la salinité exercée par 50 et 100 mM de CaCl₂. Cette réduction correspond à 11,11% et 27,77% respectivement pour la biomasse fraîche de la partie aérienne chez la variété Simeto alors que pour la variété Vitron, les réductions enregistrées sont de l'ordre de 11,53% et 48%. Les travaux de Tahraoui (2016) confirment les observations faites par SNOUSSI et al. 2014), la diminution de la partie aérienne constitue la première réponse significative face aux effets destructeurs d'une exposition prolongée à la salinité. Cette réduction est causée par l'accumulation croissante de sel dans le milieu nutritif, ce qui entraîne une diminution de la division cellulaire, de l'allongement cellulaire et, par conséquent, de la croissance des plantes. En revanche, l'association de 0,5 mM d'acide salicylique avec 50 mM de CaCl₂ (S1+AS1) a entraîné une augmentation significative de la biomasse fraîche de la partie aérienne tant chez la variété Simeto que chez la variété Vitron. Les valeurs de biomasse fraîche enregistrées étaient de 0,042 g et 0,035 g respectivement pour les deux variétés testées. En comparaison, la combinaison de 100 mM de CaCl₂ avec 0,5 mM d'acide salicylique (S2+AS1) a conduit à

une biomasse fraîche similaire chez les deux variétés Vitron et Simeto, avec des valeurs de 0,034 g respectivement.

Il est important de noter que la combinaison de 50 mM de CaCl₂ avec 1 mM d'acide salicylique (S1+AS2) a montré les valeurs de biomasse fraîche de la partie aérienne les plus faibles parmi tous les traitements étudiés.

I.5. Effet de la CaCl₂ et l'acide salicylique sur la biomasse fraîche de la partie aérienne de deux variétés testées (stade de croissance)

Les résultats de l'effet de la salinité exercé par 50 et 100 mM de CaCl₂ combinée ou non avec 0,5 et 1mM d'acide salicylique sur la biomasse fraîche de la partie aérienne des deux variétés de blé dur (Vitron et Simeto) sont illustrées dans l'hystogramme suivant.

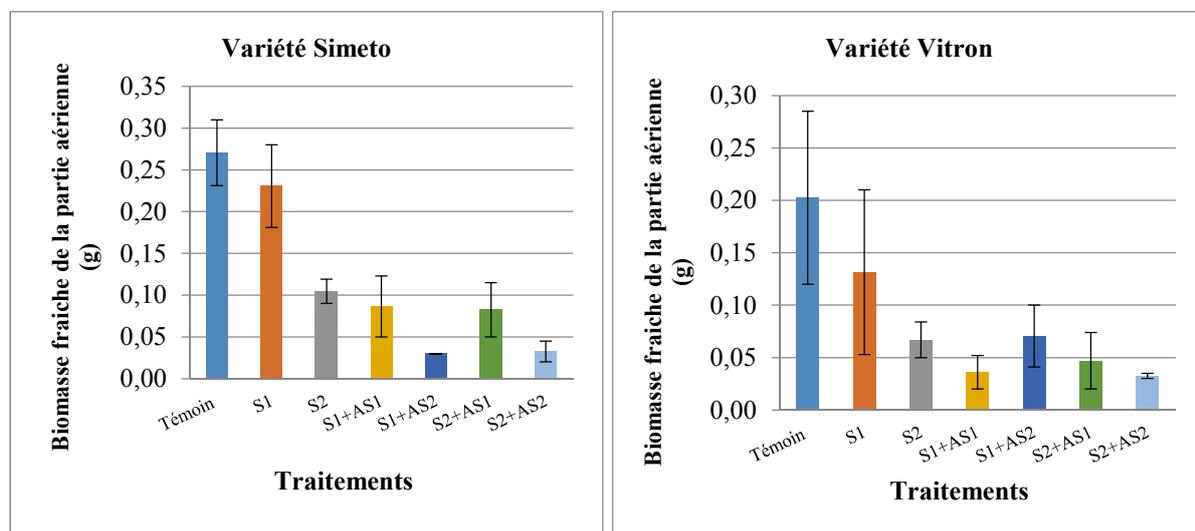


Figure 16: Impact de la salinité et de l'acide salicylique sur la biomasse fraîche de la partie aérienne des variétés de blé dur (Simeto et Vitron) en stade de croissance

Suite à l'analyse des résultats, des effets significatifs et remarquables de la salinité induite par des concentrations de 50 et 100 mM de CaCl₂ ont été observés. Ces conditions ont entraîné des réductions importantes de la biomasse fraîche de la partie aérienne chez la variété Simeto, soit 14,81% et 62,96% respectivement. Pour la variété Vitron, des réductions de l'ordre de 35% et 65% ont été enregistrées.

Selon Munns (2002), La salinité a un effet global sur toute la plante, mais elle a tendance à freiner davantage la croissance des parties aériennes que celle des racines. Selon Munns et

Rawson (1999), l'effet de la salinité se manifeste généralement par une réduction de la croissance végétative, qui se traduit par une diminution de la hauteur de la tige, du nombre de talles et de feuilles. Cette réduction est généralement attribuée à des altérations de la division et de l'élongation cellulaires.

En revanche, l'application de 0,5 mM d'acide salicylique en combinaison avec 50 mM de CaCl₂ (S1+AS1) a révélé une diminution significative de la biomasse fraîche de la partie aérienne chez la variété Vitron par rapport à la variété Simeto. Les valeurs enregistrées étaient de 0,09 g et 0,04 g respectivement. En comparaison, la combinaison de 100 mM de CaCl₂ avec 0,5 mM d'acide salicylique (S1+AS2) a entraîné une amélioration remarquable de la biomasse fraîche de la partie aérienne chez la variété Vitron, tandis que la variété Simeto a présenté le poids le plus faible par rapport aux autres traitements, avec des valeurs de biomasse fraîche enregistrées de 0,03 g et 0,07 g respectivement. Une autre combinaison, Les valeurs de biomasse pour la variété Simeto et la variété Vitron sont respectivement de 0,08 g et 0,05 g. Cela signifie qu'il y a une augmentation de biomasse plus élevée chez la variété Simeto par rapport à la variété Vitron lorsque la combinaison de 100 mM de CaCl₂ avec 0,5 mM d'acide salicylique (S2+AS1) est utilisée.

Il est à noter que la combinaison de 100 mM de CaCl₂ avec 1 mM d'acide salicylique (S2+AS2) a révélé les biomasses fraîches de la partie aérienne les plus faibles parmi les traitements étudiés.

I.6. Effet de la CaCl₂ et l'acide salicylique sur la longueur de la partie aérienne de deux variétés testées (stade de croissance)

Les résultats de l'expérience sur l'effet de la salinité, à travers l'utilisation de différentes concentrations de CaCl₂ (50 et 100 mM), combinées ou non avec de l'acide salicylique à des concentrations de 0,5 et 1 mM, sur la longueur de la partie aérienne de deux variétés de blé dur (Vitron et Simeto), sont présentés de manière graphique dans l'histogramme suivant.

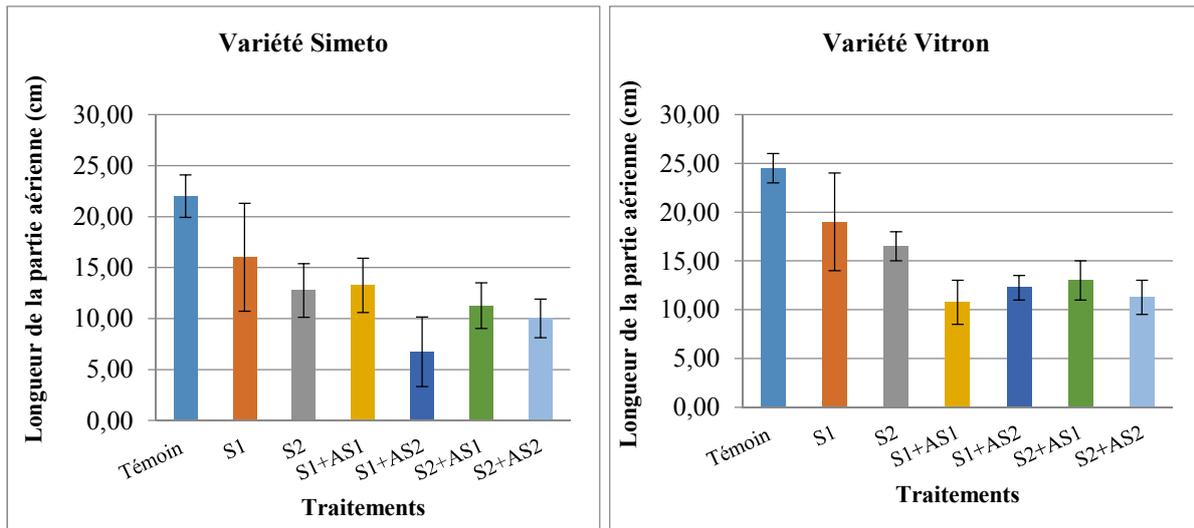


Figure 17: Impact de la salinité et de l'acide salicylique sur la longueur de la partie aérienne des variétés de blé dur (Simeto et Vitron) en stade de croissance

Les données obtenues ont révélé des changements significatifs dans la longueur de la partie aérienne des plantes en réponse aux différents traitements appliqués. Les plantes traitées avec 50 mM de CaCl_2 ont montré une réduction de la longueur de la partie aérienne par rapport au groupe témoin, tandis que les plantes traitées avec 100 mM de CaCl_2 ont affiché une diminution encore plus importante. Les réductions remarquées sont de l'ordre de 27,27% et 42,04% respectivement en présence de 50 et 100 Mm respectivement par rapport au témoin. Pour la variété Vitron, des réductions de l'ordre de 22% et 32,65% ont été enregistrées. En revanche, l'application de 0,5 mM de l'acide salicylique associé avec 50 mM de CaCl_2 (S1+AS1) a révélé une amélioration remarquable de la longueur de la partie aérienne chez la variété Simeto comparativement à la variété Vitron. Les longueurs enregistrées correspondent à 13,25 cm et 10,75 cm chez les deux variétés testées respectivement. Alors que la

combinaison 100 mM de CaCl_2 avec 0,50 mM d'acide salicylique (S2+AS1) a exercé une diminution remarquable de la longueur de la partie aérienne chez la variété Simeto comparativement à la variété Vitron. Les longueurs enregistrées sont de 13 cm et 11.25 cm respectivement chez les deux variétés étudiées. Les valeurs de longueur de la partie aérienne pour la variété Simeto et la variété Vitron sont respectivement de 11,25 cm et 10 cm. Par conséquent, il y a en réalité une augmentation de la longueur de la partie aérienne plus élevée chez la variété Vitron par rapport à la variété Simeto lorsque la combinaison de 100 mM de CaCl_2 avec 1 mM d'acide salicylique (S2+AS2) est utilisée.

Il est à noter que la combinaison 50 mM de CaCl_2 avec 1 mM d'acide salicylique (S1+AS2) a révélé les longueurs de la partie aériennes des deux variétés testées les plus faibles par rapport aux traitements étudiés.

Conclusion

Les résultats de cette étude indiquent que la salinité exercée par des concentrations élevées de CaCl_2 a des effets négatifs sur la germination, la croissance et la biomasse des plantes de blé dur. Cependant, l'application d'acide salicylique a montré des effets bénéfiques en atténuant les effets néfastes de la salinité.

L'acide salicylique a amélioré la faculté germinative des graines de blé dur en présence de CaCl_2 , bien que son efficacité ait varié en fonction de la concentration utilisée. De plus, l'acide salicylique a stimulé la croissance de la partie aérienne et des racines des plantes de blé dur, ainsi que la biomasse fraîche de la partie aérienne, atténuant ainsi les effets inhibiteurs de la salinité.

Ces résultats suggèrent que l'acide salicylique peut jouer un rôle important dans l'amélioration de la tolérance des plantes de blé dur à la salinité. Cependant, il convient de noter que les effets de l'acide salicylique peuvent dépendre des spécificités des variétés de blé dur étudiées et des conditions spécifiques du stress salin.

En conclusion, cette étude met en évidence le potentiel de l'acide salicylique comme outil pour améliorer la tolérance des plantes de blé dur à la salinité. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour mieux comprendre les mécanismes d'action de l'acide salicylique et pour évaluer son applicabilité dans des conditions de terrain. L'utilisation de l'acide salicylique en combinaison avec d'autres approches de gestion de la salinité peut être prometteuse pour atténuer les effets négatifs de la salinité sur les cultures de blé dur et contribuer ainsi à assurer la sécurité alimentaire dans les régions touchées par la salinité des sols.

Références bibliographiques

- [1] T. de Sousa, M. Ribeiro, C. Sabença, et G. Igrejas, « The 10,000-Year Success Story of Wheat! », *Foods*, vol. 10, no 9, p. 2124, sept. 2021, doi: 10.3390/foods10092124.
- [2] A. Bonjean, « Histoire de la culture des céréales et en particulier de celle du blé tendre (*Triticum aestivum* L.) », Doss. L'environnement L'INRA, vol. 21, p. 29-37, 2001.
- [3] « Production mondiale de blé », Yara France, 19 février 2018. <https://www.yara.fr/fertilisation/solutions-pour-cultures/ble/production-mondiale-ble>
- [4] « Classement des États du monde par production de blé », Atlasocio.com, 2022. <https://atlasocio.com/classements/economie/agriculture/classement-etats-par-production-ble-monde.php>.
- [5] B. L. Beres et al., « A Systematic Review of Durum Wheat: Enhancing Production Systems by Exploring Genotype, Environment, and Management (G × E × M) Synergies », *Front. Plant Sci.*, vol. 11, 2020. Disponible sur: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2020.568657>
- [6] « What is the Outlook for World Durum Production? », U.S. Wheat Associates, 21 juillet 2022. <https://www.uswheat.org/wheatletter/what-is-the-outlook-for-world-durum-production/>.
- [7] « Production mondiale de blé par pays », AtlasBig, 1 janvier 1970. <https://www.atlasbig.com/fr-fr/pays-par-production-de-ble> (consulté le 4 juin 2023).
- [8] « Algérie: la production de blé pourrait grimper à 3,3 millions de tonnes en 2022/2023 », 2022. <https://www.agenceecofin.com/cereales/0610-101795-algerie-la-production-de-ble-pourrait-grimper-a-3-3-millions-de-tonnes-en-2022/2023>.
- [9] « Cerealiculture.pdf ». [En ligne]. Disponible sur: <https://agri-info.inva.dz/wp-content/uploads/2022/02/Cerealiculture.pdf>
- [10] A. F. Abou-Hadid, R. Mougou, A. Mokssit, et A. Iglesias, « ASSESSMENT OF IMPACTS, ADAPTATION, AND VULNERABILITY TO CLIMATE CHANGE IN NORTH AFRICA: FOOD PRODUCTION AND WATER RESOURCES », 2003.
- [11] N. Drouiche, « Impact du changement climatique sur le rendement du blé dur et apport palliatif des techniques membranaires - Contribution », *le Soir d'algérie*, 2022. <https://www.lesoirdalgerie.com/contribution/impact-du-changement-climatique-sur-le-rendement-du-ble-dur-et-apport-palliatif-des-techniques-membranaires-90547>.
- [12] M. G. Cromey, C. Harvey, M. Braithwaite, K. Farrell, et S. Ganey, « Effects of diseases and pests on yield and quality of wheat. ».
- [13] N. Chourghal, J. P. Lhomme, F. Huard, et A. Aidaoui, « Climate change in Algeria and its impact on durum wheat », *Reg. Environ. Change*, vol. 16, no 6, p. 1623-1634, août 2016, doi: 10.1007/s10113-015-0889-8.
- [14] R. Rossi et al., « Root and Shoot Growth of a Modern and an Old Tall Durum Wheat (*Triticum durum* Desf.) Variety under Dual-Purpose Management », *Plants*, vol. 12, no 3, Art. no 3, janv. 2023, doi: 10.3390/plants12030588.
- [15] « *Triticum turgidum durum* - Useful Tropical Plants ». <https://tropical.theferns.info/viewtropical.php?id=Triticum+turgidum+durum>.
- [16] « Wheat botany ». <http://corn.agronomy.wisc.edu/Crops/Wheat/L001.aspx>.
- [17] « dessins botanique ecole - Dessins botanique ecole -52- Ble - Plant, épi, épillet, fleur, diagramme, grains - Gravures, illustrations, dessins, images », 2013. <http://informationsdocuments.com/environnement/coppermine15x/displayimage.php?pid=26480>.
- [18] P. Gate, *Ecophysiologie du blé: de la plante à la culture*. Paris: Technique et Documentation-Lavoisier, 1995.

- [19] « Wheat growth and physiology - E. Acevedo, P. Silva, H. Silva ». <https://www.fao.org/3/y4011e/y4011e06.htm>.
- [20] C. Casnin et J.-F. Madre, « Le Blé, une plante modèle pour étudier la biologie végétale au lycée ».
- [21] « PHYSIOLOGIE DU BLÉ : HUIT SEMAINES POUR REMPLIR UN GRAIN », Agriculture du Maghreb. <https://www.agri-mag.com/2021/05/26/physiologie-du-ble-huit-semaines-pour-remplir-un-grain/>.
- [22] D. J. Major, H. H. Janzen, R. S. Sadasivaiah, et J. M. Carefoot, « Morphological characteristics of wheat associated with high productivity », *Can. J. Plant Sci.*, vol. 72, no 3, p. 689-698, juill. 1992, doi: 10.4141/cjps92-085.
- [23] P. Kumar, V. RAO, O. BHAVANI, A. DUBEY, C. SINGH, et B. Venkateswarlu, « Sensitive growth stages and temperature thresholds in wheat (*Triticum aestivum* L.) for index-based crop insurance in the Indo-Gangetic Plains of India », *J. Agric. Sci.*, vol. P. VIJAYA KUMAR, V. U. M. RAO, O. BHAVANI, A. P. DUBEY, C. B. SINGH and B. VENKATESWARLU. (2015) Sensitive growth stages and temperature thresholds in wheat (*Triticum aestivum* L.) for index-based crop insurance in the Indo-Gangetic Plains of India. 2015. *The Journal of Agricultural Science*, available on CJO2015. doi:10.1017/S0021859615000209., mars 2015, doi: 10.1017/S0021859615000209.
- [24] Aya, « La culture du blé dur: Besoins et contraintes », 12 octobre 2016. <https://www.agrimaroc.ma/la-culture-du-ble-dur-besoins-et-contraintes/>.
- [25] M. Hlaváčová et al., « Effect of heat stress at anthesis on yield formation in winter wheat », *Plant Soil Environ.*, vol. 63, p. 139-144, avr. 2017, doi: 10.17221/73/2017-PSE.
- [26] M. A. Mojid, K. Mousumi, et T. Ahmed, « Performance of Wheat in Five Soils of Different Textures under Freshwater and Wastewater Irrigation », *Agric. Sci.*, vol. 2, juill. 2020, doi: 10.30560/as.v2n2p89.
- [27] « Tout savoir sur le blé », *Agrico'Notes*. <http://blog.agriconomie.com/tout-savoir-sur-le-ble/>.
- [28] Wikifarmer, « Besoins en eau du blé et systèmes d'irrigation », Wikifarmer, 22 juillet 2022. <https://wikifarmer.com/fr/besoins-en-eau-du-ble-et-systemes-dirrigation/>.
- [29] « Les maladies du blé », Syngenta France, 17 mars 2016. <https://www.syngenta.fr/cultures/cereales/article-fongicide/maladies-du-ble>.
- [30] « Le stress des plantes | Plant Care Knowledge Center », 6 janvier 2021. <https://kcenter.lallemandplantcare.com/fr/canada/fondamentaux/le-stress-des-plantes-fr/>.
- [31] « Water salinity and plant irrigation ». <https://www.agric.wa.gov.au/water-management/water-salinity-and-plant-irrigation>.
- [32] T. Yamaguchi et E. Blumwald, « Developing salt-tolerant crop plants: challenges and opportunities », *Trends Plant Sci.*, vol. 10, no 12, p. 615-620, déc. 2005, doi: 10.1016/j.tplants.2005.10.002.
- [33] I. Stavi, N. Thevs, et S. Priori, « Soil Salinity and Sodicity in Drylands: A Review of Causes, Effects, Monitoring, and Restoration Measures », *Front. Environ. Sci.*, vol. 9, 2021. Disponible sur: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenvs.2021.712831>
- [34] Z. Haj-Amor et al., « Soil salinity and its associated effects on soil microorganisms, greenhouse gas emissions, crop yield, biodiversity and desertification: A review », *Sci. Total Environ.*, vol. 843, p. 156946, oct. 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.156946.

- [35] S. Jasechko, D. Perrone, H. Seybold, Y. Fan, et J. W. Kirchner, « Groundwater level observations in 250,000 coastal US wells reveal scope of potential seawater intrusion », *Nat. Commun.*, vol. 11, p. 3229, juin 2020, doi: 10.1038/s41467-020-17038-2.
- [36] A. Mohanavelu, S. R. Naganna, et N. Al-Ansari, « Irrigation Induced Salinity and Sodicity Hazards on Soil and Groundwater: An Overview of Its Causes, Impacts and Mitigation Strategies », *Agriculture*, vol. 11, no 10, Art. no 10, oct. 2021, doi: 10.3390/agriculture11100983.
- [37] N. Rajmohan, M. H. Z. Masoud, et B. A. M. Niyazi, « Impact of evaporation on groundwater salinity in the arid coastal aquifer, Western Saudi Arabia », *CATENA*, vol. 196, p. 104864, janv. 2021, doi: 10.1016/j.catena.2020.104864.
- [38] D. Eswar, R. Karuppusamy, et S. Chellamuthu, « Drivers of soil salinity and their correlation with climate change », *Curr. Opin. Environ. Sustain.*, vol. 50, p. 310–318, juin 2021, doi: 10.1016/j.cosust.2020.10.015.
- [39] c=AU; o=The S. of Queensland; « Types of salinity | Salinity ». <https://www.qld.gov.au/environment/land/management/soil/salinity/types> (consulté le 17 avril 2023).
- [40] M. Khondoker, S. Mandal, R. Gurav, et S. Hwang, « Freshwater Shortage, Salinity Increase, and Global Food Production: A Need for Sustainable Irrigation Water Desalination—A Scoping Review », *Earth*, vol. 4, no 2, Art. no 2, juin 2023, doi: 10.3390/earth4020012.
- [41] O. Bessaoud, « L 'Algérie agricole : de la construction du territoire à l'impossible émergence de la paysannerie », *Insaniyat إنسانيات Rev. Algér. Anthropol. Sci. Soc.*, no 7, Art. no 7, avr. 1999, doi: 10.4000/insaniyat.12124.
- [42] M. Ashraf, « Some important physiological selection criteria for salt tolerance in plants », *Flora - Morphol. Distrib. Funct. Ecol. Plants*, vol. 199, no 5, p. 361–376, janv. 2004, doi: 10.1078/0367-2530-00165.
- [43] D. Paul, « Osmotic stress adaptations in rhizobacteria », *J. Basic Microbiol.*, vol. 53, no 2, p. 101–110, févr. 2013, doi: 10.1002/jobm.201100288.
- [44] G. W. Netondo, J. C. Onyango, et E. Beck, « Sorghum and Salinity », *Crop Sci.*, vol. 44, no 3, p. 806–811, 2004, doi: 10.2135/cropsci2004.8060.
- [45] R. K. Sikder et al., « Nitrogen Enhances Salt Tolerance by Modulating the Antioxidant Defense System and Osmoregulation Substance Content in *Gossypium hirsutum* », *Plants*, vol. 9, no 4, p. 450, avr. 2020, doi: 10.3390/plants9040450.
- [46] P. Carillo, « GABA Shunt in Durum Wheat », *Front. Plant Sci.*, vol. 9, p. 100, févr. 2018, doi: 10.3389/fpls.2018.00100.
- [47] A. Loudari, A. Mayane, R. Naciri, Y. Zeroual, G. Colinet, et A. Oukarroum, « Root morphological and anatomical responses to increasing phosphorus concentration of wheat plants grown under salinity », *Plant Stress*, vol. 6, p. 100121, déc. 2022, doi: 10.1016/j.stress.2022.100121.
- [48] T. B. dos Santos, A. F. Ribas, S. G. H. de Souza, I. G. F. Budzinski, et D. S. Domingues, « Physiological Responses to Drought, Salinity, and Heat Stress in Plants: A Review », *Stresses*, vol. 2, no 1, Art. no 1, mars 2022, doi: 10.3390/stresses2010009.
- [49] « Managing Pests in Gardens: Environmental Factors: Nutrient and mineral excesses, salinity, and salt toxicity—UC IPM ». <https://ipm.ucanr.edu/PMG/GARDEN/ENVIRON/salttoxicity.html>.
- [50] D.-Z. Ouiza, « REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE », 2019.

Références bibliographiques

- [51] A. Litalien et B. Zeeb, « Curing the earth: A review of anthropogenic soil salinization and plant-based strategies for sustainable mitigation », *Sci. Total Environ.*, vol. 698, p. 134235, janv. 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134235.
- [52] R. Munns, J. B. Passioura, T. D. Colmer, et C. S. Byrt, « Osmotic adjustment and energy limitations to plant growth in saline soil », *New Phytol.*, vol. 225, no 3, p. 1091–1096, févr. 2020, doi: 10.1111/nph.15862.
- [53] J. R. Acosta-Motos, M. F. Ortuño, A. Bernal-Vicente, P. Diaz-Vivancos, M. J. Sanchez-Blanco, et J. A. Hernandez, « Plant Responses to Salt Stress: Adaptive Mechanisms », *Agronomy*, vol. 7, no 1, Art. no 1, mars 2017, doi: 10.3390/agronomy7010018.
- [54] « L'acide salicylique : définition et utilisations », Novabaume, 31 mars 2022. <https://www.novabaume.com/articles-sante/lacide-salicylique-definition-et-utilisations/>.
- [55] « oscillateurs ». <https://www.chimix.com/devoirs/t245.htm> (consulté le 4 juin 2023).
- [56] « Acide salicylique ». http://www.analgesique.wikibis.com/acide_salicylique.php.
- [57] J. Chong et P. Saindrenan, Résistance induite chez les plantes et métabolisme des phénylpropanoïdes : étude de la biosynthèse de l'acide salicylique et du rôle de glucosyltransférases induites par l'acide salicylique et les agents pathogènes. 2001.
- [58] « Effet de l'acide salicylique et du stress salin sur quelques paramètres de croissance de certaines plantes aromatiques et médicinales - Sécheresse info ». <http://www.secheresse.info/spip.php?article73031>.
- [59] M. Bouabdelli, « IMPACT DE L'ACIDE SALICYLIQUE SUR LA GERMINATION ET LE STATUT HYDRIQUE DE LA TOMATE IRRIGUEE PAR UNE EAU SALINE NON CONVENTIONNELLE. », *AGROBIOLOGIA*, vol. 11, no 2, p. 2660–2669, déc. 2021.. de Sousa, M. Ribeiro, C. Sabença, et G. Igrejas, « The 10,000-Year Success Story of Wheat! », *Foods*, vol. 10, n° 9, p. 2124, sept. 2021, doi: 10.3390/foods10092124.

