



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE
ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة الشاذلي بن جديد - الطارف
UNIVERSITÉ CHADLI BENDJEDID D'EL-TARF



Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

Département de BIOLOGIE

Mémoire en vue de l'obtention d'un Diplôme de master

Spécialité : Toxicologie fondamentale et appliquée

THEME

**Application du silicium comme outil de remédiation et
d'atténuation des dommages oxydatifs chez les plantes de blé
soumises au stress salin**

Présenté par :

Merzougui Soumaya

et

Nafaa Roumaïssa

Sous la Direction de : Dr. ALAYAT Amel

MCB ; Univ. C. Bendjedid-El Tarf

Devant le jury

Présidente : Dr. TLIDJEN Sara

MCB ; Univ. C. Bendjedid-El Tarf

Examinatrice : Dr. MOUISSI Samia

MCB ; Univ. C. Bendjedid-El Tarf

Année Universitaire : 2019- 2020

REMERCIEMENTS

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail

Nous tenons à remercier mon encadreur Dr. Alayat Amel, pour sa patience, sa disponibilité, son aide durant toute la période du travail et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter notre réflexion.

Nous tenons également à remercier les membres de jury qui ont accepté d'examiner notre travail

Nos remerciements les plus sincères à toutes les personnes qui ont contribué de prêt ou de loin à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire !

...

Dédicace



Sincèrement, les mots ne peuvent dire ni refléter la vraie vérité que je peux ressentir.

À ma très chère mère, pour tout l'amour qu'elle m'a réservé et les sacrifices qu'elle m'a consenti pour mon éducation et la réussite de ma carrière. Je demande à dieu de nous guérir. Aucune dédicace ne pourrait exprimer, à sa juste valeur, ma reconnaissance et mon amour.

À mon très cher Père, qui m'a inlassablement soutenu et encouragé le long de mes études, qui a assumé une lourde responsabilité et consenti d'énormes sacrifices pour parfaire ma formation. Aucune dédicace ne saurait exprimer, à sa juste valeur, mon profond amour et mon dévouement.

À mon fiancé, Hamza, qui a été mon soutien permanent pour m'encourager à étudier et à réussir. Toutes les phrases ne vous suffisent pas. Je vous souhaite tout ce qui est beau dans leur vie .

À ma belle sœur Chaima et mes très chers frères ; Housseem Eddine et Mohamed lamine .

À ma très chère famille(ma cousine Sabrina et Hinda et ma Chère tante je vous aime tous . Je vous souhaite la bonne santé, le bonheur et la longue vie afin que je puisse à mon tour vous combler, sans jamais vous décevoir.

Roumaissa

Dédicace

A mes chers parents

Aucune dédicace ne pourrait exprimer la profondeur des sentiments que j'éprouve pour vous. Vos sacrifices, vos prières pour moi et votre soutien aussi bien moral que matériel.

Veillez voir en ce modeste travail, le fruit des longues années d'effort et le gage de gratitude et ma tendre affection.

Que dieu te puissant vous protèges et vous procure santé et longue vie.

A mon frère et mes sœurs

Vos encouragements et vos aides précieux ne cessent de m'impressionner
Aucune dédicace ne saurait exprimer l'estime, le respect et l'amour que je porte pour vous.

Que Dieu vous aides a réalisé tous vos rêves et à satisfaire toutes vos ambitions.

A mes amis et camarades de classe

Au nom de l'amitié qui nous a lié, je vous dédiez ce modeste travail, veuillez croire à mes sincères remerciement et mes souhaits de succès et de bonheur.

A toutes les personnes qui ont participé à la réalisation de ce travail.

Et à toi aussi lecteur, lectrice...

Soumaya

Résumé

A l'heure actuelle, la salinité est considérée parmi les problèmes environnementaux les plus étudiés. Dans ce contexte, le présent travail, a pour but d'évaluer l'effet du silicium sur le développement et la croissance des plantes du blé dur (*Triticum durum* Desf.) soumises ou non au stress salin à des concentrations croissantes en NaCl (chlorure de sodium), pendant la phase de germination jusqu'à la phase de croissance.

En effet, le blé est une céréale importante en termes de consommation humaine dans de nombreux pays du monde. Il est cultivé principalement dans les pays du bassin Méditerranéen à climat arides et semi-arides. Ainsi, le silicium est un élément minéral tout comme l'azote, le phosphore ou le potassium. Il est très présent dans le sol, mais sous forme de SiO₂, non disponible à la plante.

Le silicium pourrait figurer parmi les moyens d'atténuation du stress oxydant. Il est reconnu pour son effet prophylactique chez les plantes capables de l'absorber en réduisant les dommages causés par les stress abiotiques. L'apport de silicium se traduit par un effet bénéfique sur la croissance des plantes de blé, ceci étant associé à l'augmentation de taux de la teneur relative en eau et la synthèse du Malondialdéhyde (MDA) et une accroissement significative de la synthèse du peroxyde d'hydrogène (H₂O₂). D'un autre côté, nous avons constaté une diminution de l'élongation racinaires et l'élongation foliaire des plantes de blé dur .aussi diminution du taux de fuite des électrolytes.

Mots clés: Mots clés: Silicium, Stress salin, Blé dur, Espèces réactives de l'oxygène, Stress oxydant, perméabilité membranaire, Atténuation du stress, Tolérance.

Abstract

Currently, salinity is considered one of the most studied environmental issues. In this context, the aim of this work is to evaluate the effect of silicon on the development and growth of durum wheat plants (*Triticum durum* Desf.) Subjected or not to salt stress at increasing concentrations of NaCl (chloride sodium), during the germination phase until the growth phase.

Indeed, wheat is an important cereal in terms of human consumption in many countries of the world. It is cultivated mainly in the countries of the Mediterranean basin with arid and semi-arid climates. Thus, silicon is a mineral element just like nitrogen, phosphorus or potassium. It is very present in the soil, but in the form of SiO₂, not available to the plant.

Silicon could be one of the means of reducing oxidative stress. It is recognized for its prophylactic effect in plants able to absorb it by reducing damage caused by abiotic stresses. The supply of silicon results in a beneficial effect on the growth of wheat plants, this being associated with an increase in the rate of the relative water content and the synthesis of Malondialdehyde (MDA) and a significant increase in the synthesis of Hydrogen peroxide (H₂O₂). On the other hand, we have seen a decrease in root elongation and leaf elongation in durum wheat plants. also decrease in the rate of electrolyte leakage.

Keywords: Silicon, Salt stress, Durum wheat, Reactive oxygen species, Oxidative stress, membrane permeability, Stress reduction, Tolerance.

الملخص

تعتبر الملوحة حاليًا من أكثر القضايا البيئية المدروسة. في هذا السياق ، فإن الهدف من هذا العمل هو تقييم تأثير السيليكون على تطور ونمو نباتات القمح القاسي (*Triticum durum* Desf.) المعرضة أو غير المعرضة للإجهاد الملحي بتركيزات متزايدة من NaCl (كلوريد الصوديوم) ، خلال مرحلة الإنبات حتى مرحلة النمو.

في الواقع ، يعتبر القمح من الحبوب الهامة من حيث الاستهلاك البشري في العديد من دول العالم. يزرع بشكل رئيسي في دول حوض البحر الأبيض المتوسط ذات المناخ الجاف وشبه الجاف. وبالتالي ، فإن السيليكون عنصر معدني تمامًا مثل النيتروجين أو الفوسفور أو البوتاسيوم. إنه موجود جدًا في التربة ، ولكن في شكل SiO₂ ، غير متوفر للنبات.

يمكن أن يكون السيليكون أحد وسائل تقليل الإجهاد التأكسدي. يُعرف بتأثيره الوقائي في النباتات القادرة على امتصاصه عن طريق تقليل الضرر الناجم عن الضغوط اللاأحيائية. ينتج عن إمداد السيليكون تأثير مفيد على نمو نباتات القمح ، ويرتبط ذلك بزيادة معدل المحتوى المائي النسبي وتخليق (Malondialdehyde (MDA) وزيادة كبيرة في تخليق بيروكسيد الهيدروجين (H₂O₂) من ناحية أخرى شهدنا انخفاضًا في استطالة الجذور واستطالة الأوراق في نباتات القمح القاسي ، وكذلك انخفاض في معدل تسرب الإلكترونات.

الكلمات المفتاحية: السيليكون ، إجهاد الملح ، القمح القاسي ، أنواع الأكسجين التفاعلية ، الإجهاد التأكسدي ، نفاذية الأغشية ، تقليل الإجهاد ، تحمل الأكسدة.

Sommaire

Remerciements

Résumé

Abstract

ملخص

Liste des Figures

Liste des Tableaux

Liste des abréviations

Introduction **1**

I– Synthèse bibliographique

Chapitre 1 : Blé dur «*Triticum durum* Desf.»

1. Généralités et historique **3**
2. Importance économique et production en Algérie **3**
3. Origine et diversité du blé dur en Algérie **4**
4. Classification botanique du blé dur **5**
5. Caractéristiques morphologiques et Cycle végétal du blé dur **5**

Chapitre 2 : Stress salin

1. Définition de la salinité **7**
2. Les sols salés en Algérie **7**
3. Notions de stress **8**
4. Le stress Salin **8**
 - 4.1. Stress hydrique **8**
 - 4.2. Stress ionique **9**
 - 4.3. Stress nutritionnel **9**
5. Influence du stress salin sur la croissance et le développement des plantes **9**

Chapitre 3 : Atténuation du stress par le Silicium

1. Généralités	11
2. Silice et atténuation des stress	11
3. <i>Silicium</i> et salinité	12
4. <i>Silicium</i> et sécheresse	12
5. <i>Silicium</i> et herbivores	13
6. <i>Silicium</i> et maladie des plantes	13
<u>II</u> - Matériel et méthodes	
1. Matériel végétal et condition de culture	15
2. Conduite de l'essai et traitements	17
3. Méthodes d'analyses	20
3.1 Paramètres de croissance (morpho-métriques)	20
3.2 Analyse de la perméabilité membranaire	20
4. Analyse statistique	22
<u>III</u> – Résultats et Discussion	
III. 1. Résultats	23
III. 2. Discussion	30
Conclusion et Perspectives	35
Références bibliographiques	37

Lister des figures

Figure 01	Histogramme présentant la production des céréales en Algérie	4
Figure 02	Histologie du grain de blé	6
Figure 03	Carte montrant la répartition des sols salins du Nord de l'Algérie	7
Figure 04	Effets toxiques du NaCl sur la plante	10
Figure 05	Schéma des Mécanismes d'atténuation de la sécheresse et le stress salin chez les plantes au moyen de contributions de silicium	14
Figure 06	Blé dur, variété Siméto	15
Figure 07	Schéma du dispositif expérimental de l'essai	19
Figure 08	Dispositif expérimental de l'essai (germination).	19
Figure 09	Effet du silicium sur le taux de germination des graines de blé dur soumises ou non au stress du chlorure de sodium.	23
Figure 10	Effet du silicium sur la longueur moyenne des racines des plantes de blé dur soumises ou non au stress du chlorure de sodium.	24
Figure 11	Effet du silicium sur la longueur moyenne des feuilles au niveau des feuilles des plantes de blé dur soumises ou non au stress du chlorure de sodium.	25
Figure 12	Effet du silicium sur le teneur relative en eau au niveau des feuilles des plantes de blé dur soumises ou non au stress du chlorure de sodium	26
Figure 13	Effet du silicium sur le taux de fuite des électrolytes au niveau des feuilles des plantes de blé dur soumises ou non au stress du chlorure de sodium.	27
Figure 14	Effet du silicium sur les concentrations du Malondialdéhyde (MDA) dans les feuilles des plantes de blé dur soumises ou non au stress du chlorure de sodium.	28
Figure 15	Effet du silicium sur les concentrations du peroxyde d'hydrogène (H ₂ O ₂) dans les feuilles des plantes de blé dur soumises ou non au stress du chlorure de sodium.	29

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques agronomiques de la variété du blé dur « SIMETO»16

Tableau 2: Composition des traitements.....18

Tableau 3 : Composition de la solution nutritive utilisée dans la culture hydroponique18

Liste d'Acronymes

OAIC : Office Algérien Interprofessionnel Des Céréales

FAO: Food and Agricultural Organization of United Nations (Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture)

Liste des abréviations

Si :Silicium

$(\text{NH}_4)_2 \text{SO}_4$: Sulfate d'ammonium

$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$: Nitrate de calcium

EC : Conductivité électrique

g : Tours

H_4SiO_4 ou $\text{Si}(\text{OH})_4$: Acide silicique monomérique ou Acide ortho-silicique

$\text{Mn Cl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$: Chlorure de Manganèse

ROS : Reactive Oxygen Species (Espèces Réactives de l'Oxygène)

TRE : Teneur relative en eau

SAU : Superficie Agricole Utile

SiO₂: Silice

TBA : Acide 2- thiobarbiturique

$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$: Sulfate de Zinc

INTRODUCTION

Introduction

Au cours de leur vie, les plantes cultivées sont soumises à une multitude de stress susceptibles de leur causer préjudice. Tant de nature biotique qu'abiotique, les stress environnementaux affectent la croissance et le développement des cultures causant ainsi des pertes substantielles de rendement pour l'industrie agroalimentaire. La salinité des sols constitue l'un des principaux stress abiotiques limitant la croissance des plantes cultivées (**Epstein et al., 1980; Boyer et al., 1982; Tanji et al., 1990; Abdelly et al., 2008; Munns et al., 2006**). Cette salinité peut être naturelle ou induite par les activités agricoles comme l'irrigation (avec de l'eau de faible qualité) ou l'utilisation de certains types d'engrais (**Bartels et Nelson, 1994 ; Rubio et al., 1995**). Ainsi, chaque année, près de 10 millions d'hectares de terres cultivables sont perdus dans le monde du fait de l'accumulation, au cours du temps, de petites quantités de sels contenues dans l'eau d'irrigation.

Chez les plantes, le stress salin modifie les traits morphologiques, physiologiques et biochimiques des plantes (**Gómez-Cadenas et al., 1996, Gómez-Cadenas et al., 1998**). Le stress salin est souvent accompagné d'un stress oxydatif, générant une bioaccumulation dans les tissus cellulaires des composés toxiques tels que les espèces réactives de l'oxygène (ROS). Ces molécules toxiques endommagent les membranes cellulaires, les enzymes et l'ADN mitochondrial et chloroplastique, perturbant la croissance voire la survie de la plante (**Allen, 1995 ; Munns et al., 2006**).

Ainsi, il devient essentiel de développer des méthodes de lutte alternatives moins dommageables. A cet effet, le silicium (ou silice) pourrait s'avérer une avenue intéressante. Peu connu des phytologistes, cet élément occupe une place prépondérante dans la nature où il est rencontré en quantité importante tant dans le sol, que chez les animaux et les végétaux. Généralement considérée comme non essentiel au cycle vital des plantes, la silice est reconnue depuis des dizaines d'années pour ses propriétés prophylactiques envers les stress biotiques et abiotiques tels que la verse, la sécheresse, les métaux lourds, les insectes phytophages et les pathogènes fongiques (**Sellami, 2016**).

En outre, dans notre travail nous avons choisi d'étudier dans un premier temps l'impact du stress salin et de son atténuation chez les plantes de blé dur (*Triticum durum* Desf.). Un des objectifs de cette étude est d'évaluer les effets du chlorure de sodium sur le métabolisme oxydant. L'analyse de cette partie a été initiée par la détermination de certains paramètres

témoignant de l'établissement du stress oxydant tels que, la lipoperoxydation membranaire et la génération des espèces réactives de l'oxygène.

Dans un second temps, nous avons axé notre travail sur l'évaluation de l'utilisation du silicium comme un moyen de remédiation et d'atténuation des dommages oxydatifs engendrés par le stress salin.

SYNTHESE
BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre 1

1. Généralités et historique

Le blé dur (*Triticum durum*) est une espèce tétraploïde distincte de blé. Le blé dur a 28 chromosomes représentant A et B génomes contre 42 chez le blé hexaploïde (panifiable) avec les génomes A, B et D. Le grain de blé dur typique est très dur, vitreux et ambré à haute teneur en protéines. Le blé dur est utilisé pour produire une gamme de produits alimentaires, tels que comme la semoule, les pâtes, le blé burghul, le couscous et les desserts (**Kadkol et Sissons, 2016**).

La culture des céréales a permis l'essor des grandes civilisations, car elle a constitué l'une des premières activités agricoles. En effet, Il y'a plus de trois millions d'années, l'homme préhistorique était nomade, pratiquait la chasse et la cueillette des fruits pour assurer sa nourriture. Le nomadisme a progressivement laissé la place à la sédentarité qui permit la culture des céréales. Le blé est l'une de ces céréales connue depuis l'antiquité. Sa culture remontée au mésolithique vers 7000 avant Jésus-Christ. Le blé dur provient des territoires de la Turquie, de la Syrie, de l'Iraq et de l'Iran (**Nedjah, 2015**).

Le terme blé vient probablement du gaulois blato (à l'origine du vieux français *blaie, blee, blaiier, blaver*, d'où le verbe emblaver, qui signifie ensemercer en blé) et désigne les grains qui broyés, fournissant de la farine, pour des bouillies (*polenta*), des crêpes ou du pain. On trouve sous le nom de blé des espèces variées: le genre *Triticum* (du latin *Tritus, us*= broiement, frottement): le blé moderne (*froment*), l'orge (*Hordeum*) et le seigle (*Secalecereale*), le blé noir (*sarrasin*) (**Nedjah, 2015**).

2. Importance économique et production en Algérie

Les céréales occupent une place dominante dans l'agriculture en Algérie. Elles constituent avec leurs dérivés l'épine dorsale du système alimentaire algérien. Les céréales fournissent 54% des apports énergétiques et 62% des apports protéiques du ratio alimentaire journalier. Ceci a situé l'Algérie au premier rang mondial pour la consommation de blé par tête d'habitant avec plus de 200 kg, devant l'Egypte (131 kg) et la France (98 kg). Les produits céréaliers occupent une place stratégique dans le système alimentaire et dans l'économie nationale. Durant les deux périodes 2000-2009 et 2010-2017, la superficie des céréales a occupé en moyenne annuelle de **40%** de la Superficie Agricole Utile (SAU). La superficie ensemencée en céréales durant la décennie 2000-2009 est évaluée à **3 200 930** ha, dans laquelle, le blé dur et l'orge

Synthèse bibliographique

occupent la majeure partie de cette superficie avec **74%** de la production céréalière totale (Figure 1). Durant la période 2010-2017, cette superficie a atteint en moyenne **3 385 560ha**, en évolution de **6%** par rapport à la période précédente (2000-2009). La production réalisée des céréales au cours de la période 2010-2017 est estimée à **41.2** millions de quintaux en moyenne, soit un accroissement de **26%** par rapport à la décennie 2000-2009 où la production est estimée en moyenne à **32.6** Millions de quintaux (**Ministère de l'agriculture du développement rural et de la pêche, 2018**).

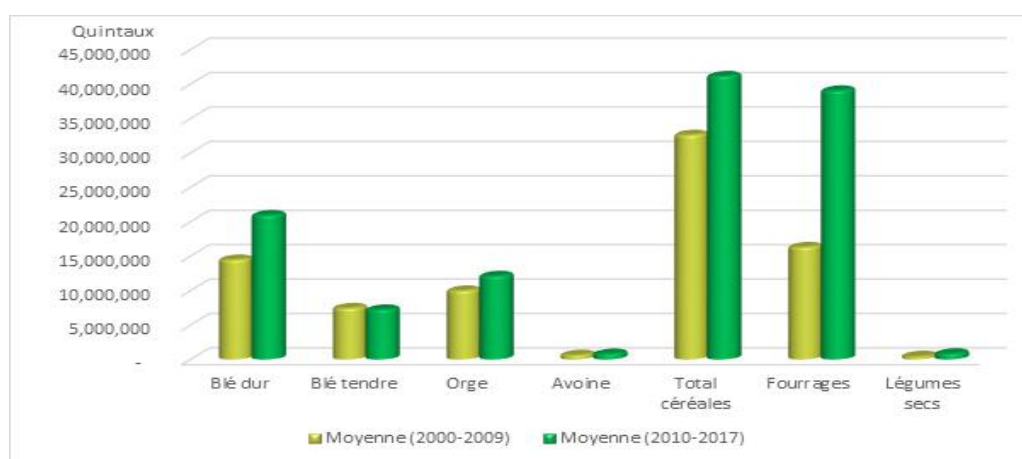


Figure 1 : Histogramme présentant la production des céréales en Algérie (**Ministère de l'agriculture du développement rural et de la pêche, 2018**)

3. Origine et diversité du blé dur en Algérie

Les blés constituent le genre *Triticum*, qui comporte un certain nombre d'espèces cultivées. Du point de vue génétique on peut les classer en diploïdes (*Triticum monococcum*:14 chromosomes), tétraploïdes (*Triticum turgidum*:28 chromosomes), et hexaploïdes (*Triticum aestivum*:42 chromosomes). Ainsi l'origine du blé dur est un hybride, résultant du croisement aléatoire et naturel de l'espèce *Triticum monococcum* (sauvage) et une herbe spontanée apparentée au blé nommée *Aegilops speltoides*, toutes deux vraisemblables, puisqu'on les rencontre dans la même aire géographique. Les blés cultivés en Algérie appartiennent pour la presque totalité aux espèces *T. aestivum* L. (blé tendre) et *T. durum* Desf. (Blé dur) ; à l'intérieur de chaque espèce on trouve de nombreuses variétés botaniques. En effet, la diversité des blés Algériens a été à l'origine, étudiée à partir des caractères morphologiques. D'autres paramètres tels que la taille, la forme de l'épi, la position des barbes ont été pris en considération afin de distinguer ainsi un grand nombre de populations (**Nedjah, 2015**).

4. Classification botanique du blé dur

Le blé dur (*Triticum durum* Desf.) est une plante annuelle de la classe des monocotylédones de la famille des *poaceae*, de la classe des Triticées et du genre *Triticum* (Feillet, 2000). En termes de production commerciale et d'alimentation humaine, cette espèce est la deuxième plus importante du genre *Triticum* après le blé tendre. Leur famille comprend 600 genres et plus de 5000 espèces (Feillet, 2000).

5. Caractéristiques morphologiques et cycle de vie de blé dur

Le grain de blé est obtenu après le battage, c'est à dire une fois que les balles enveloppant le grain ont été supprimées. La couleur des grains de blé varie généralement du roux au blanc et pourpre à l'occasion, la longueur de 0,48 à 0,95 centimètre et le poids d'environ 35 milligrammes selon les variétés et le degré de maturité ainsi qu'une amande de texture très vitreuse et résistante au broyage (Boudreau et Ménard, 1992). Du point de vue de la composition chimique, le blé dur se distingue généralement par des teneurs en protéines et en pigments caroténoïdes élevées (Hélène, 2010).

Du point de vue technologique, c'est principalement la texture vitreuse de l'amande qui confère au grain de blé dur une aptitude particulière à être transformé en produits céréaliers originaux. En fait, pour être utilisé dans la consommation humaine, le blé dur doit subir une transformation successive menant le blé dur à la semoule (Hélène, 2010).

Le grain de blé comporte trois parties distinctes (figure 2) :

- **L'albumen** (80 à 85% du grain), constitué de l'albumen amylicé (au sein duquel subsistent des cellules remplies de granules d'amidon dispersés au milieu d'une matrice protéique) et de la couche à aleurone. C'est l'albumen qui donnera la farine.
- **Les enveloppes** de la graine et du fruit (13 à 17% du grain), constituées de six tissus différents : épiderme du nucelle, tégument séminal ou testa (enveloppe de la graine), cellules tubulaires, cellules croisées, mésocarpe et épicarpe. Les enveloppes sont éliminées pendant la mouture et deviennent les sons (Feillet, 2000).
- **Le germe** (3% du grain), composé d'un embryon (lui-même formé de la coléoptile, de la gemmule, de la radicule, du coléorhize et de la coiffe) et du scutellum. Il est éliminé à la mouture pour éviter le rancissement et augmenter la durée de conservation.

Synthèse bibliographique

Le grain est principalement constitué d'amidon (environ 70%), de protéines (10 à 15%) et de pentosanes (8 à 10%) et contient aussi en faibles quantités des lipides, de la cellulose, des sucres libres, des minéraux et des vitamines (**Feillet, 2000**). Les sons de blé sont constitués principalement de polysaccharides, incluant des arabinoxylanes, des xyloglucanes et de la cellulose, mais contiennent aussi des quantités significatives d'acides phénoliques, de lignine et de protéines (**Parker *et al.*, 2005**).

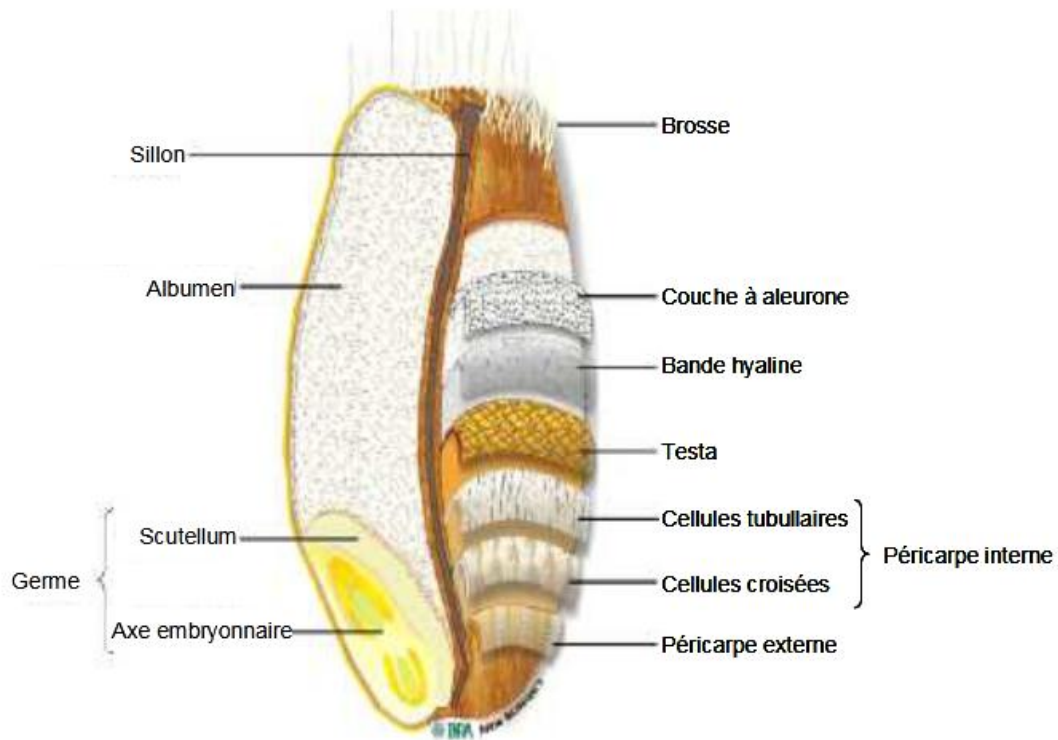


Figure 2: Histologie du grain de blé (Surget et Barron, 2005)

Chapitre 2

Synthèse bibliographique

1. Définition de la salinité

La salinité est un des processus de dégradation des sols les plus largement répandus sur la Terre. Elle constitue l'un des facteurs abiotiques les plus répandus au niveau de la planète et qui limite fortement les rendements agricoles, notamment dans les régions arides et de semi-arides, où les précipitations sont limitées et ne sont pas suffisantes pour transporter les sels du profil racinaire des plantes (**Khales et Baaziz, 2006 ; Schulze et al., 2005**). La salinité se produit après l'évaporation de l'eau dans son état pur laissant derrière elle les sels et les autres substances (**Carter, 1975**). Elle se produit en raison de l'augmentation des concentrations de ces sels comme le chlorure de sodium (**Sun et al., 2007**).

2. Les sols salés en Algérie

Les sols salés sont très répandus en Algérie essentiellement dans les zones arides et semi-arides. Les estimations de la superficie totale représentée par les sols salés dans le monde sont très variables d'un auteur à l'autre. Les sols salés ont un caractère azonal, ils se rencontrent dans toutes les parties du monde (**Servant, 1976 ; Durand, 1983**). L'Afrique présente de vastes régions affectées par les sels (notamment les zones arides et à proximité grands fleuves) (**Cherbuy, 1991**). En effet, selon la **FAO (2005)**, on rencontre plusieurs types de sols salés en Algérie localisés surtout dans les étages bioclimatiques arides et semi- arides (Figure 3).

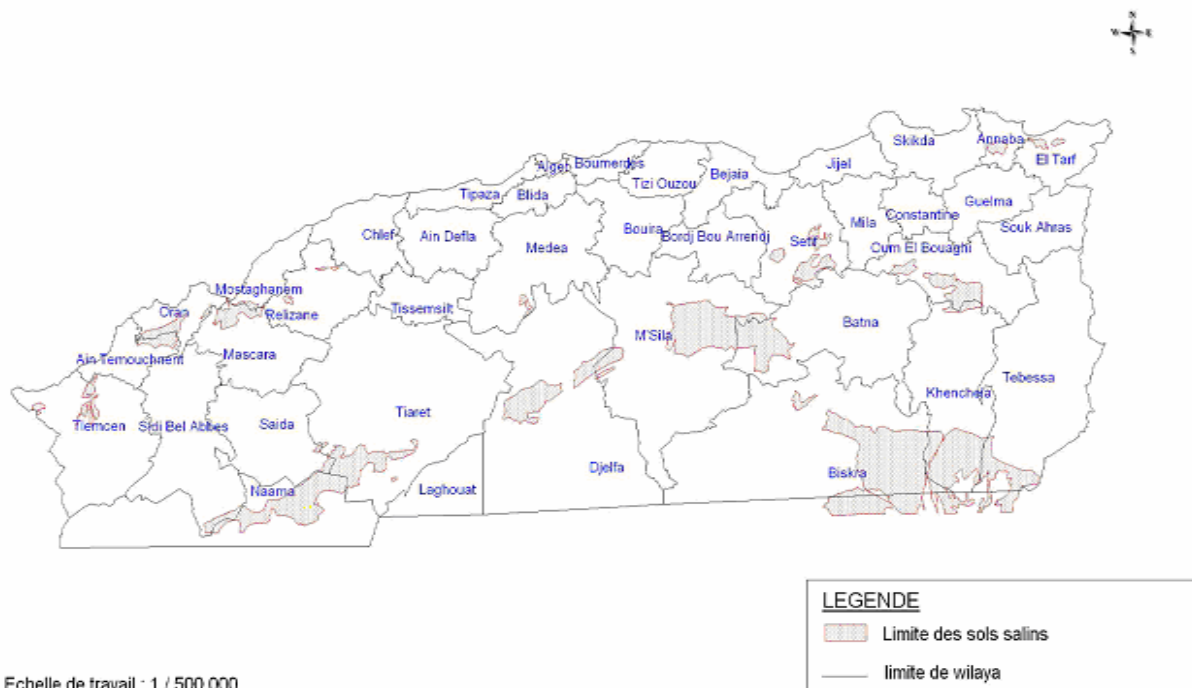


Figure 3: Carte montrant la répartition des sols salins du Nord de l'Algérie

3. Notions de stress

Le stress est l'ensemble des conditions qui provoquent des changements des processus physiologiques résultant éventuellement en dégâts, dommages blessures, inhibition de la croissance ou de développement (**Hopkins, 2003**). Selon ce même auteur, on peut distinguer deux types du stress dans la nature, le stress abiotique dû principalement à des facteurs environnementaux comme la sécheresse, les températures extrêmes, excès d'eau (asphyxie racinaire), la salinité,...Etc. et le stress biotique dû à une agression par un autre organisme : insectes, animal,...Etc.

Les stress biotiques et abiotiques, sont des conditions qui affectent la croissance et le rendement des plantes. Contrairement aux animaux, qui peuvent se déplacer lorsque les conditions de vie ne leur sont plus favorables, les plantes développent des stratégies d'adaptation pour répondre aux changements environnementaux en contrôlant et en ajustent leurs systèmes métaboliques (**Grime, 1989 ; Doumi, 2014**).

4. Le stress Salin

Le stress salin est un excès d'ions, en particulier, mais pas exclusivement, aux ions Na^+ et Cl^- (**Hopkins., 2003**). Le stress salin est dû à la présence de quantités importantes de sels potentiels hydriques. Il réduit fortement la disponibilité de l'eau pour les plantes, on parle alors de milieu "physiologiquement sec" (**Trembun, 2000**).

La quantité de sels dans le sol que les plantes peuvent supporter sans grand dommage pour leur culture, varie avec les familles, les genres et les espèces, mais aussi les variétés considérées (**Levigneron et al., 1995**).

Ces mêmes auteurs précisent que, les conséquences d'un stress salin peuvent résulter de trois types d'effets et de stress que le sel peut provoquer chez les végétaux :

4.1 Stress hydrique

Une forte concentration saline dans le sol est tout d'abord perçue par la plante comme une forte diminution de la disponibilité en eau. Cela nécessite un ajustement osmotique adapté, afin que le potentiel hydrique cellulaire demeure inférieur à celui du milieu extracellulaire et à celui du sol. Ce phénomène assure d'une part, la poursuite de l'absorption de l'eau du sol, et d'autre part, la rétention de l'eau intracellulaire et le maintien de la

turgescence. Lorsque l'ajustement osmotique n'est pas suffisant, l'eau a tendance à quitter les cellules, ce qui provoque un déficit hydrique et la perte de la turgescence.

4.2 Stress ionique

En dépit d'un ajustement osmotique correct, la toxicité ionique survient lorsque l'accumulation de sels dans les tissus perturbe l'activité métabolique. Des concentrations excessives d'ions chlorures et sodium dans la solution du sol peuvent causer une toxicité dans la plante. Les ions Cl^- peuvent être absorbés par les racines et s'accumuler dans les feuilles. Ces ions peuvent provoquer une brûlure des extrémités des feuilles et un jaunissement prématuré de celles-ci (Maillard, 2001).

4.3 Stress nutritionnel

Les effets nutritionnels de la salinité incluent les deux actions primaires du sel sur les plantes: la toxicité directe due à l'accumulation excessive des ions dans les tissus et un déséquilibre nutritionnel provoqué par l'excès de certains ions (Levigneron *et al.*, 1995 ; Haouala *et al.*, 2007). Des concentrations salines trop fortes dans le milieu, provoquent une altération de la nutrition minérale, en particulier vis-à-vis des transporteurs ioniques cellulaires. Le sodium entre en compétition avec le potassium et le calcium, et le chlorure avec le nitrate, le phosphore et le sulfate (Belaadi, 2014).

5. Influence du stress salin sur la croissance et le développement des plantes

La salinisation, enregistrée dans les écosystèmes aride et semi-aride, résulte de forte évaporation d'eau à partir du sol et d'une irrégulière et insuffisante pluviométrie (Hassani *et al.*, 2008). Chez les légumineuses, le stress salin perturbe, non seulement la croissance du végétal, mais également la fixation de l'azote en affectant les bactéries symbiotiques des nodules. La salinité influence également la qualité des gousses dont l'aspect (gousses plus petites et nécrosées) (Levigneron *et al.*, 1995). Elle affecte aussi la croissance des plantes qui est réduite et les limbes ont une couleur vert sombre plus marquée que celle des plantes dont la croissance est normale, la croissance de la partie aérienne est plus réduite que celle des racines.

Cet effet néfaste des sels solubles résulte d'une réduction de l'absorption de certains ions par antagonismes avec le sodium et le chlore et une diminution de l'alimentation hydrique par la pression osmotique (Figure 4) (Maas, 1990 ; Morard, 1995).

Synthèse bibliographique

La germination considérée comme une étape critique dans le cycle de développement de la plante, elle conditionne l'installation de la plantule, son branchement sur le milieu, et probablement sa productivité ultérieure. Le chlorure de sodium présent dans le sol ou dans l'eau d'irrigation affecte la germination des plantes (Mallek, 2001).

Par ailleurs les effets néfastes de la salinité sur la croissance des plantes sont généralement associés au faible potentiel osmotique de la solution du sol et au niveau élevé de toxicité du sodium (et du chlore pour certaines espèces) qui provoquent des perturbations multiples sur le métabolisme, la croissance et le développement des plantes aux niveaux moléculaire, biochimique et physiologique (Figure 4) (Hanana *et al.*, 2011). En effet, la salinité est susceptible de perturber la nutrition minérale des plantes en interférant avec le prélèvement de certains éléments essentiels comme le potassium et le calcium et ceci soit par substitution, soit par compétition au niveau des sites d'absorption membranaire. Par conséquent, la capacité des génotypes à maintenir des niveaux plus élevés de K^+ et de Ca^{2+} et de faibles niveaux de Na^+ dans les tissus est l'un des mécanismes clés contribuant à l'expression de la tolérance au sel (R'him *et al.*, 2013 ; Doumi, 2014).

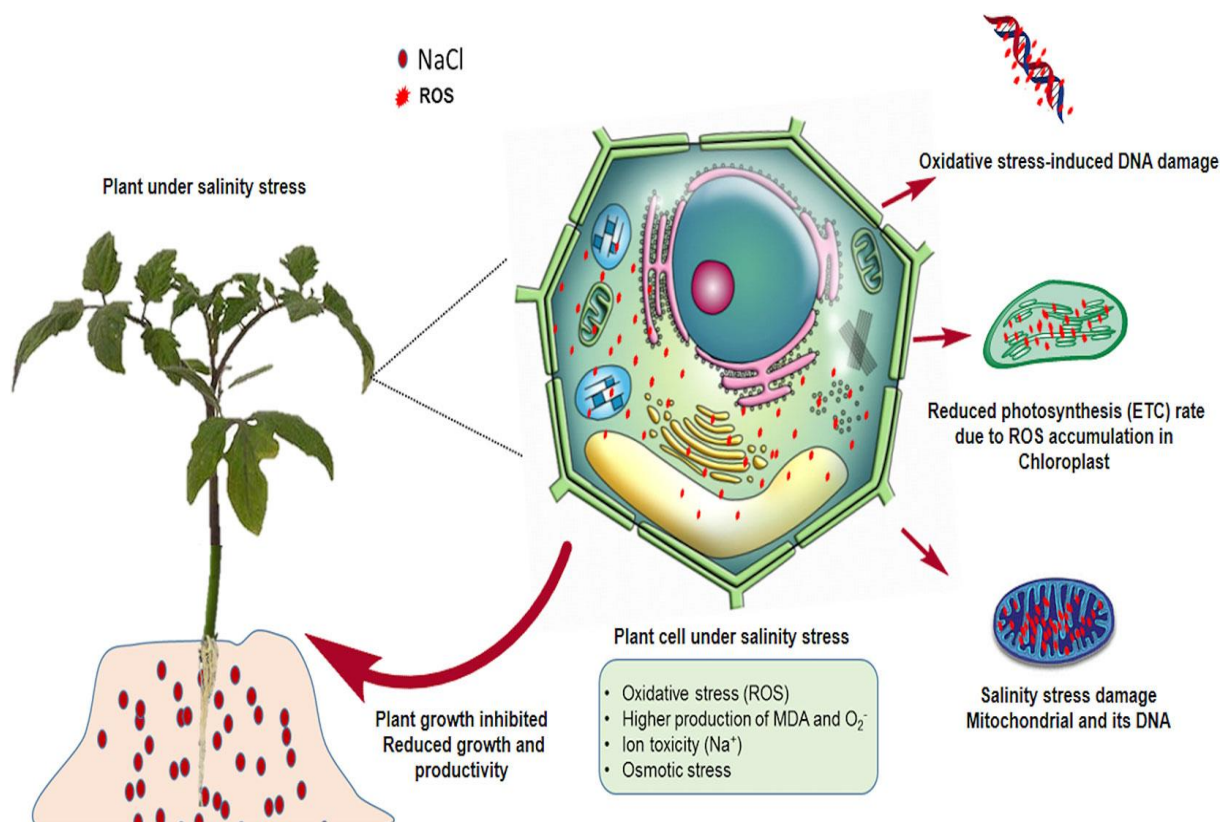


Figure 4 - Effets toxiques du NaCl sur la plante (du site : europepmc.org/article/med/31787997).

Chapitre 3

1. Généralités

Le silicium est un élément chimique de la famille des cristallogènes, de symbole « Si » et de numéro atomique 14. C'est l'élément le plus abondant dans la croûte terrestre après l'oxygène, soit 25,7% de sa masse. Il n'existe pas à l'état libre, mais sous forme de composés : sous forme de dioxyde de silicium (SiO_2), la silice (dans le sable, le quartz, la cristobalite, etc.) ou d'autres silicates (dans les feldspaths, la kaolinite, etc.). Il est utilisé depuis longtemps sous forme d'oxyde de silicium amorphe (silice ou SiO_2) comme composant essentiel du verre (**Kurtz., 2014**).

Dans le sol, le silicium est présent dans la phase liquide, solide et adsorbée (**Opfergelt., 2008**). Il est présent dans la solution (forme liquide ou phase liquide) du sol sous forme d'acide silicique monomérique (H_4SiO_4) (**Faure., 1991**). Et sous forme solide dans le sol; la silice (SiO_2 ; molécule constituée d'un atome de Silicium lié à deux atomes d'oxygène); non disponible à la plante. Sa forme soluble est l'acide silicique (H_4SiO_4) appelé également l'acide ortho-silicique $\text{Si}(\text{OH})_4$, très peu présente dans le sol. C'est l'élément peu ou pas connu par les agriculteurs, est très peu utilisé (**Bouzoubaâ et al., 2009**).

2. Silice et atténuation des stress

Le *Silicium* chez les plantes déclenche un large éventail de défenses naturelles qui permettent d'atténuer les effets de stress abiotiques, toxicité des métaux lourds, sécheresse, excès d'eau, vent, températures extrêmes, salinité, déséquilibrenutritionnel ou les effets de stress biotiques dus aux insectes et autres herbivores, nématodes ou champignons, bactéries et virus. Le stress abiotique affecte toute la plante, ou au moins l'appareil racinaire ou la tige dans leur totalité, alors que le stress biotique est une agression localisée. Dans ce dernier cas et contrairement au stress abiotique, on admet que des mécanismes de transmission de signaux à longedistance jouent un rôle important. Chez les plantes accumulatrices, ces effets sont corrélés avec le dépôt de silice dans les tissus ; une accumulation importante semble nécessaire. (**Epstein, 1994 et 2009 ; Ma et al., 2001 ; Richmond et Sussman, 2003 ; Currie et Perry, 2009 ; Liang et al., 2007 ; Yamaji et al., 2008 ; Cooke et Leishman, 2011 ; Ma et al., 2011 ; Mitani et al., 2011**).

3. *Silicium* et salinité

Il s'agit principalement de la salinité due aux sels de sodium à concentration élevée. La salinité endommage fortement les membranes plasmiques et vacuolaires ainsi que celle du chloroplaste. L'effet du *Si* porte sur la correction des dommages membranaires : réduction de la perméabilité, inhibition de la peroxydation des lipides, diminution de la concentration tissulaire de sodium et augmentation de celle du potassium et du calcium, stockage du sodium dans les vacuoles. Il s'ensuit la réduction du stress osmotique, l'augmentation de l'absorption racinaire de l'eau et de l'efficacité de son utilisation (réduction de l'évapotranspiration). Globalement les fonctions trophiques sont stimulées : activité de la racine, amélioration du rendement photosynthétique (augmentation de l'approvisionnement en CO₂) et augmentation significative de la biomasse. La correction par le *Si* des effets négatifs de la salinité a été observée pour le riz, le blé, l'orge, le concombre, la tomate ou encore de *Prosopis juliflora* (Mimosoïdeae) (Ma *et al.*, 2001 et 2011 ; Habibi *et al.*, 2014).

4. *Silicium* et sécheresse

La sécheresse ralentit la croissance, diminue l'élongation des tiges, diminue l'expansion du limbe et les mouvements stomatiques, augmente la concentration des espèces oxygénées réactives (ROS) qui endommagent les lipides membranaires (plasmique, vacuolaire, chloroplastique) et les protéines de la photosynthèse. L'apport de *Si* corrige ces effets négatifs, en modifiant les mêmes aspects physiologiques et biochimiques que dans le cas de salinité excessive. Il est à remarquer que les effets du *Si* ne sont explicites qu'en cas de sécheresse : on n'observe pas de différences significatives entre plantes alimentées ou non en *Si*, si l'apport d'eau est suffisant (Gong *et al.*, 2005 ; Hattori *et al.*, 2005 ; Ma *et al.*, 2001 et 2011 ; Katz *et al.*, 2013 ; Habibi et Hajiboland, 2013 ; Shi *et al.*, 2014 ; Cao *et al.*, 2015). La formation d'une couche sous-cuticulaire de silice précipitée est un autre moyen contribuant à atténuer les effets de la sécheresse en réduisant l'évaporation (Ma *et al.*, 2001 ; Bauer *et al.*, 2011).

5. *Silicium* et herbivores

Il existe de nombreux moyens de défense contre les herbivores (mammifères, insectes folivores, suceurs et perceurs), parmi lesquels les épines, les aiguillons, les trichomes, les raphides, la dureté des cellules épidermiques. Le *Si* fait partie de ces mécanismes de défense physiques. Les dépôts de silice, le matériau le plus dur des tissus de la plante, constituent une

barrière, renforcent la rugosité des feuilles et des tiges et diminuent leur acceptabilité et leur digestibilité, ce qui empêche, diminue ou retarde l'attaque par les herbivores. En outre, ils perturbent les performances biologiques des insectes herbivores, retarde la ponte des œufs, augmente la mortalité des larves et des nymphes, et contrarie l'utilisation efficace de l'azote. Il en résulte que les insectes herbivores sont exposés plus longtemps à leurs prédateurs naturels. L'efficacité de cette barrière est conditionnée par la densité et l'homogénéité des dépôts de silice. Elle est une alternative aux systèmes mettant en jeu les dérivés carbonés (cf. phénols). L'accumulation de silice peut être induite et stimulée par les dommages causés par les herbivores, ce qui constitue une stratégie utile si l'herbivorie est intermittente ou prévisible. C'est ainsi que la concentration foliaire en silice chez *Lolium perenne* et *Festuca ovina* (Poaceae) augmente de 400% après l'intervention répétée d'herbivores (mouton) (Hunt *et al.*, 2008 ; Bauer *et al.*, 2011 ; He *et al.*, 2014).

6. Silicium et maladies des plantes

Le Silicium est indispensable pour assurer la résistance aux parasites (virus, bactéries, champignons). Par exemple, le Si ajouté au milieu de culture, rend le concombre résistant au champignon du mildiou poudreux (*Sphaerotheca fuliginea*). Il est à noter que même après l'application répétée de fongicides, la maladie fongique fait son apparition chez les plantes cultivées sans Si, contrairement aux plantes traitées par du Si. La même méthode réussit pour la vigne. Cette observation est particulièrement intéressante et il semble plus efficace d'ajouter du Si au milieu de culture que de traiter par des fongicides (Epstein, 1994).

Pour le riz et pour d'autres céréales, les résultats sont du même ordre. Par exemple, lorsque le riz est cultivé sur des sols amendés par du Si, on observe une nette augmentation du rendement et la réduction spectaculaire de la sévérité des maladies fongiques (pyriculariose, syndrome de dépérissement foliaire, maladie des taches brunes ou des taches pâles, maladie de la pourriture des tiges et mildiou). La réponse peut varier en fonction du génotype de riz étudié. Globalement, les résultats obtenus sont impressionnants et économiquement valables (Yamaji *et al.*, 2008).

Ma *et al.* (2001) montrent que l'apport de Si augmente dans les tissus la valeur du rapport Si / N et atténue sensiblement l'effet promoteur de l'azote de la pyriculariose du riz.

Les observations sont semblables avec des plantes non accumulatrices comme par exemple le tabac (*Nicotina tabacum*, Solanaceae). On constate que le Si protège, retarde, ou

Synthèse bibliographique

réduit les lésions dues au ring spot virus et que la teneur en *Sides* feuilles est influencée par le virus : les feuilles des plantes infestées contiennent quatre fois plus de *Si* qu'en l'absence d'infection (Zellner *et al.*, 2011). En revanche, le *Si* ne protège pas contre la mosaïque du tabac et dans ce cas la teneur en *Si* dépend uniquement du *Si* disponible dans le milieu. Par contre, on ne constate pas d'effet net de l'amendement en *Si* sur l'implantation d'holoparasites du genre *Striga* (Orobanchaceae) sur du riz, du sorgho, du millet (*Milium sinensis*, Poaceae), du maïs, du blé ou de la canne à sucre (Epstein, 1994).

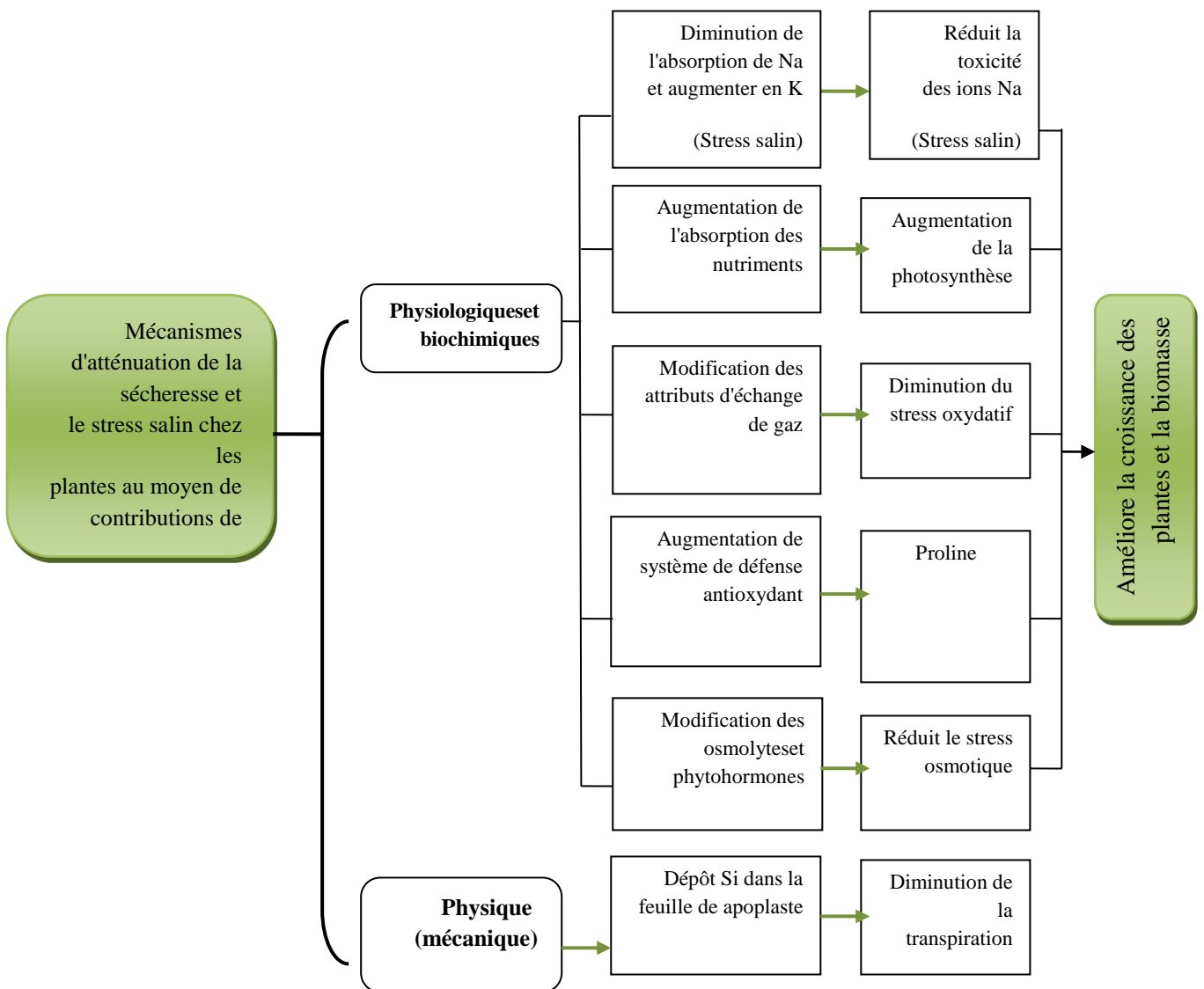


Figure 5 : Schéma des Mécanismes d'atténuation de la sécheresse et le stress salin chez les plantes au moyen de contributions de silicium (Rizwan *et al.*, 2015).

***MATERIEL ET
METHODES***

II. Matériel et méthodes

Le chapitre Matériel et Méthodes de ce mémoire décrit les procédures expérimentales mises en œuvre pour l'évaluation de l'effet du chlorure de sodium sur les plantes de blé dur (*Triticum durum* Desf.) d'une variété nommée Simeto, ainsi que l'effet d'atténuation de la toxicité de la salinité par le silicium.

1. Matériel végétal et condition de culture

Dans cette étude nous avons utilisé comme matériel végétal une variété de céréales, qui constituent la base de l'alimentation Algérienne d'où leur grande consommation, elle occupe une place privilégiée dans l'agriculture algérienne, et revêtent une importance stratégique dans l'économie algérienne; C'est le blé dur variété Simeto (**Figure 6**).

Cette variété est une variété locale, elle nous a été fournie gracieusement par l'Office Algérien Interprofessionnel Des Céréales (OAIC) d'Annaba. Le choix de la variété est géré par l'origine, les paramètres phénologiques, les paramètres morphologiques et le degré de tolérance aux stress abiotiques.



Figure 6: blé dur; variété Simeto

Les principales caractéristiques de cette variété utilisée sont mentionnées dans le (**Tableau 1**). La collection du modèle biologique utilisé, intègre des variétés issues de sélection locales, réputées par leur haut rendement et résistance à divers contraintes.

Matériel et méthodes

Tableau 1 : Caractéristiques agronomiques de la variété du blé dur «SIMETO»

Variété	SIMETO
Origine	Variété de blé dur d'origine Italienne introduite en Algérie
Caractéristiques agronomiques et culturales	Rendement élevé
Caractéristiques technologiques	- Poids de mille grains (PMG) : élevé - Qualité semoulière : Très bonne - Mitadinage : Résistante
Résistance aux maladies	- Oïdium sur feuille : Moyennement sensible - Oïdium sur épi : Résistante - Rouille brune : moyennement sensible - Résistante à la sécheresse et au froid

Taxonomie et classification botanique du blé dur (Feillet, 2000)

Embranchement	Spermaphytes
Sous Embranchement	Angiospermes
Classe	Monocotylédones
Ordre	Poales
Famille	Poaceae ou Graminae
Sous-famille	Festucoideae
Tribu	Triticeae
Sou-Tribu	Triticineae
Genre	Triticum
Espèce	<i>Triticum durum</i> Desf.



2. Conduite de l'essai et traitements

Pour réaliser notre travail, nous avons adopté la méthode suivante :

➤ **Préparation des grains :** Avant de réaliser la germination des grains de blé dur pour obtenir les plantules, nous avons choisi des bonnes graines et nous avons clarifié le blé pour avoir un bon résultat de la germination.

C'est-à-dire que les graines sont méticuleusement choisies avant leur utilisation (pas de cassures, ni de signes apparents de maladies).

Les graines de blé dur de la variété SIMETO sont stérilisées pendant 10 min dans 5% hypochlorite de sodium pour éliminer toute contamination fongique, puis elles sont rincées abondamment à l'eau distillée. Pour faciliter et homogénéiser leur germination, les graines sont placées dans de l'eau distillée pendant une nuit (imbibées pendant 24h dans l'eau distillée). Elles sont ensuite, mises à germer dans des boîtes de pétri sur du papier filtre. La culture se déroule sous conditions contrôlées: 16h de lumière / 8h d'obscurité et une température de 25°C / 20°C (Alayat, 2015).

Pour chaque traitement, 3 répétitions sont réalisées (Figure 6). Les plantes sont récoltées après 21 jours de traitement.

➤ **Préparation des différentes solutions et traitement**

➤ **Arrosage des graines**

L'arrosage des échantillons par les différents traitements a été effectué un jour sur deux pendant une durée de 21 jours, à raison de 10 ml de solution hydroponique pour chaque échantillon (Tableaux 2 et 3).

Les solutions nutritives sont aérées en permanence par des pompes à oxygène, leur pH ajustés (pH 5,8), et sont renouvelées toutes les deux semaines (Ali *et al.*, 2011).

Matériel et méthodes

Tableau 2: Composition des traitements

Traitements	Composition
Témoin	Solution nutritive
50 mM NaCl	Solution nutritive + 50 mM NaCl
NaCl + 1 mM Si	Solution nutritive + 50 mM NaCl + 1 mM Si
NaCl + 2 mM Si	Solution nutritive + 50 mM NaCl + 2 mM Si

Tableau 3 : Composition de la solution nutritive utilisée dans la culture hydroponique (Ali et al., 2011).

Eléments chimiques	Concentrations (mg. L ⁻¹)
(NH ₄) ₂ SO ₄	48.2
MgSO ₄	65.9
K ₂ SO ₄	15.9
KNO ₃	18.5
Ca (NO ₃) ₂	59.9
KH ₂ PO ₄	24.8
Fe citrate	6.8
MnCl ₂ .4H ₂ O	0.9
ZnSO ₄ .7 H ₂ O	0.11

Dispositif expérimental

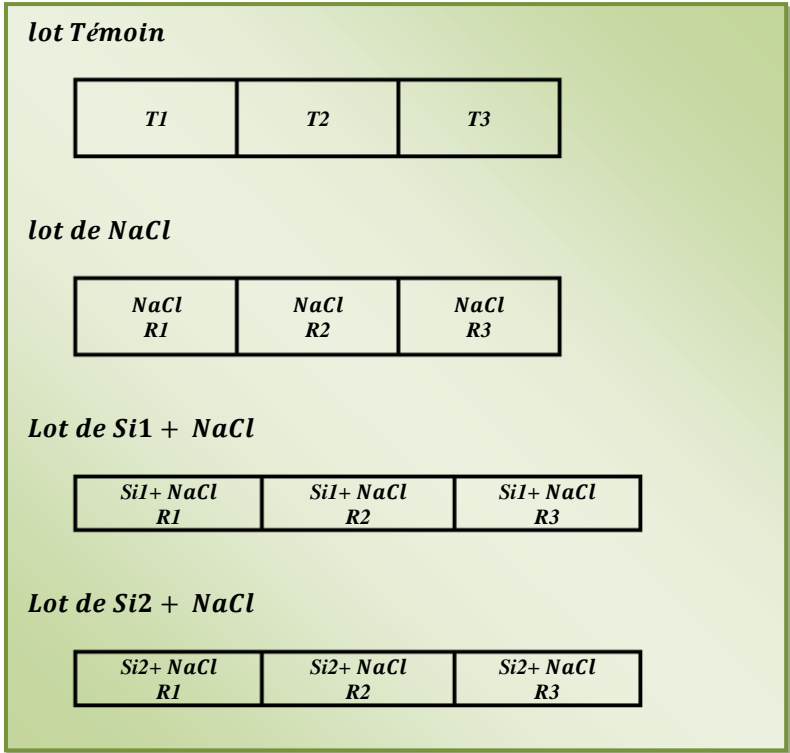


Figure 7: Schéma du dispositif expérimental de l'essai

R : répétition / *T* : témoin / *Si* : silicium / *NaCl* : Chlorure de sodium

3.2 Récolte des plantes

Lors de la récolte, les parties aériennes des plantes ont été séparées des racines. Les lots destinés à l'étude de la croissance sont pesés et les longueurs des racines et des feuilles sont mesurées (**Figure 8**).

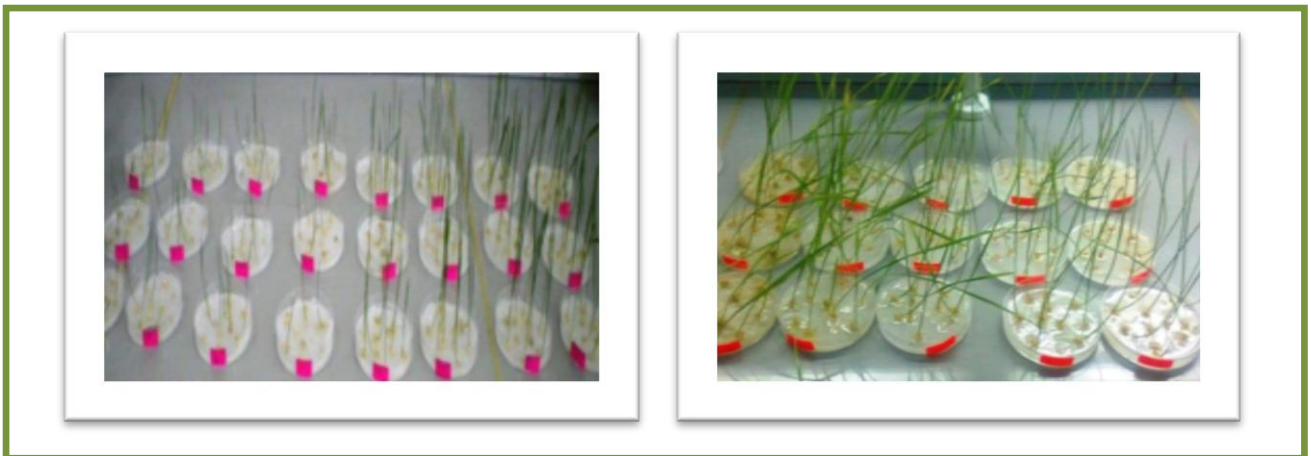


Figure 8: Dispositif expérimental de l'essai (germination).

3. Méthodes d'analyses

3.1 Paramètres de croissance (morpho-métriques)

a. Taux de germination

La germination est notée par comptage effectué tous les 24 heures, jusqu'au 10^{ième} jour. Le pourcentage de graines germées est déterminé par le rapport entre le nombre des plantules normales développées sur le nombre total de graines incubées (ISTA, 2003), d'où:

$$G (\%) = 100 \left(\frac{NGG}{NTG} \right),$$

Où **G (%)** est le pourcentage de germination, **NGG** est le nombre des graines germées et **NTG** est le nombre total des graines incubées.

Toute plantule dont la longueur de la racine est égale ou supérieure à 2mm est considérée comme normale (ISTA, 2003).

b. Longueur moyenne des racines (LMR)

Les graines sont délicatement retirées des boîtes de pétri puis à l'aide d'une règle graduée on mesure les extrémités de chaque racine pour mesurer ensuite sa longueur en cm.

c. Longueur moyenne des feuilles (LMF)

À l'aide d'une règle graduée on mesure les longueurs des feuilles à partir de l'extrémité de la feuille jusqu'à son sommet.

3.2 Analyse de la perméabilité membranaire

a. La teneur relative en eau (TRE)

La teneur relative en eau (TRE) a été déterminée dans des disques de feuilles fraîches d'un diamètre de 2 cm²; les disques ont été pesés rapidement, puis la matière sèche des disques a été enregistrée après une déshydratation à 80 ° C pendant 48H. La teneur relative en eau a été calculée en plaçant les valeurs dans la formule suivante (Gong *et al.*, 2003) :

$$TRE = \frac{\text{Poids frais} - \text{poids sec}}{\text{poids frais}} \times 100$$

Matériel et méthodes

Le poids frais des feuilles (la matière fraîche) a été déterminé avec une balance de précision, La biomasse exprimée en gramme. Chaque échantillon pesé est enveloppé dans du papier aluminium. Et après étuvage à 80 °C pendant 48 h jusqu'à l'obtention d'un poids sec (la matière sèche).

b. Taux de fuite des électrolytes

Les ions inorganiques totaux fuite à partir des tissus foliaires ont été déterminés selon la méthode de **Dionisio-Sese *et al.* (1998)**. Vingt disques de feuilles ont été placés dans un tube contenant 10 ml d'eau déminéralisée bouillante et une première mesure de conductivité électrique (EC0) est prise à l'aide d'un conductimètre (Hanna professionnel HI9829). Ensuite le même contenu est chauffé dans un bain Marie à 50 et 60 °C pendant 25 min, une deuxième mesure de conductivité est réalisée (EC1). Plus tard, le contenu est porté de nouveau à ébullition à 100°C pendant 10 min et la conductivité électrique est de nouveau enregistrée (EC2). La fuite des électrolytes a été calculée en utilisant la formule :

$$\text{Taux de fuite des électrolytes (\%)} = \frac{(EC1-EC0)}{(EC2-EC0)} \times 100$$

c. Détermination des concentrations du Malondialdéhyde (MDA)

Les produits de peroxydation lipidique, qui réagissent avec le TBA (acide 2-thiobarbiturique) sont principalement le malondialdéhyde (MDA) et les hydroperoxydes (**Buege *et al.*, 1978**). Le niveau de la peroxydation lipidique est déterminé selon la méthode de **Hodges *et al.* (1999)**. Des échantillons frais (feuilles) de 0,5 g sont homogénéisés dans 4,0 ml d'acide trichloracétique (TCA) à 1% et centrifugés à 10 000 x g pendant 10 min. Le surnageant est ajouté à 1 ml de TBA à 0,5% (p/v) préparé dans du TCA à 20%. Le mélange est chauffé dans un bain Marie à 100°C pendant 30 min. Ensuite, la réaction est stoppée en plaçant les tubes dans un bain de glace. Après une centrifugation de 10 000 x g pendant 10 min, le surnageant est récupéré pour la mesure de l'absorbance par spectrophotomètre (UV mini 1240) à 532 nm,. La densité optique est corrigée par une lecture à 600 nm. La concentration de MDA est calculée en utilisant son coefficient d'extinction molaire ($\epsilon = 155Mm^{-1}cm^{-1}$).

d. Détermination des concentrations du peroxyde d'hydrogène (H₂O₂)

Les concentrations du peroxyde d'hydrogène (H₂O₂) dans les feuilles sont mesurées selon la méthode de **Velikova *et al.* (2000)**. Les feuilles ont été homogénéisées dans du TCA à 0,1% (p/v) dans un bain de glace. L'extrait a été centrifugé à 12,000xg pendant 15 minutes, puis 0,5 ml du surnageant ont été ajoutés à 0,5 ml de tampon phosphate de potassium (10 mM, pH 7,0) et 1 ml de 1M KI. L'absorbance est lue à une longueur d'onde de 390 nm.

4. Analyse statistique

L'analyse statistique effectuée dans notre étude est déterminée à l'aide du logiciel *Minitab* (version 16.0). Pour chaque dosage, trois répétitions ont été analysées (n=3). Les résultats correspondant aux moyennes de ces différentes mesures +/- l'erreur standard. Afin de tester la significativité des différences de moyennes pour chaque variable dépendante nous avons utilisé les analyses de variances uni-variées (ANOVA).

***RESULTATS ET
DISCUSSION***

III. Résultats et Discussion

III. 1. Résultats

III. 1.1 Influence du silicium sur le taux de germination des graines de blé dur soumises ou non au stress du chlorure de sodium

L'observation des résultats (Figure 9) montre que les graines de l'essai sont viables. En effet, dans les lots témoins la variété présente une bonne faculté germinative. Concernant l'effet du 50mL du NaCl sur ce paramètre, il a été constaté une fluctuation du taux de germination, avec des différences non significatives des lots traités par rapport aux lots témoins. Par ailleurs, le traitement des graines par l'ajout des deux concentrations de silicium (1 et 2 mM) induit une amélioration du taux de germination.

L'analyse de la variance n'a révélé aucun effet significatif de l'apport du silicium sur le taux de germination ($p > 0,05$).

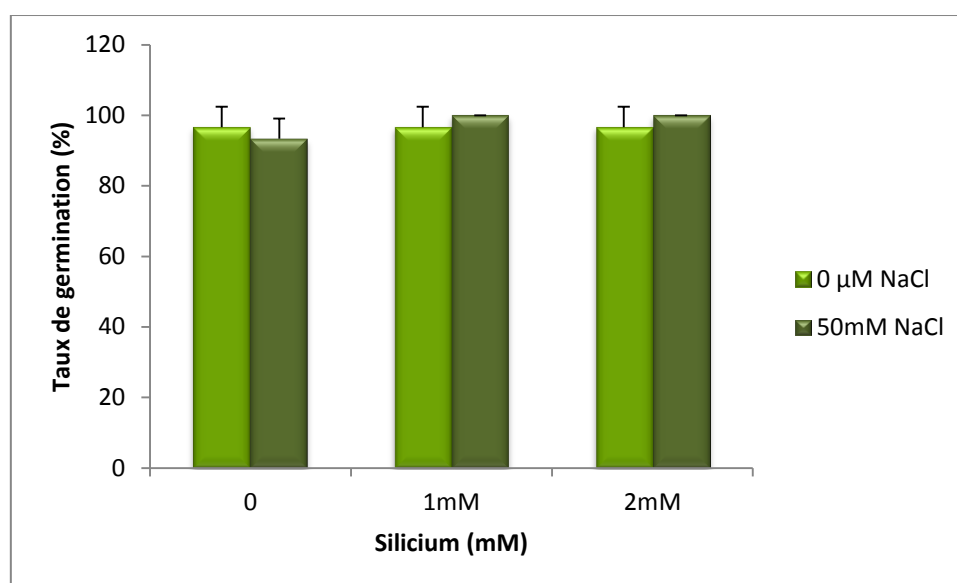


Figure (9): Effet du silicium sur le taux de germination des graines de blé dur soumises ou non au stress du chlorure de sodium.

III. 1. 2. Influence du silicium sur la longueur moyenne des racines des plantes de blé dur soumises ou non au stress du chlorure de sodium

La figure (10) représente l'effet du silicium sur la longueur des racines de blé dur soumises ou non au stress du chlorure de sodium. Nous remarquons que les traitements par la concentration 50 mM du chlorure de sodium induit une diminution de l'élongation racinaires des plantes de blé dur.

Par ailleurs, nous observons en absence du chlorure de sodium que l'addition des deux concentrations de silicium à la solution nutritive permet de noter une augmentation des longueurs moyennes des racines des plantes traitées à celui du témoin. Nos résultats montrent également que l'application du silicium a amélioré l'élongation racinaire des plantes soumises au chlorure de sodium. Ainsi, l'analyse statistique (Anova) indique que la différence des variations des longueurs moyennes des racines de tous les lots des plantes de blé dur est très hautement significative ($p \leq 0.001$).

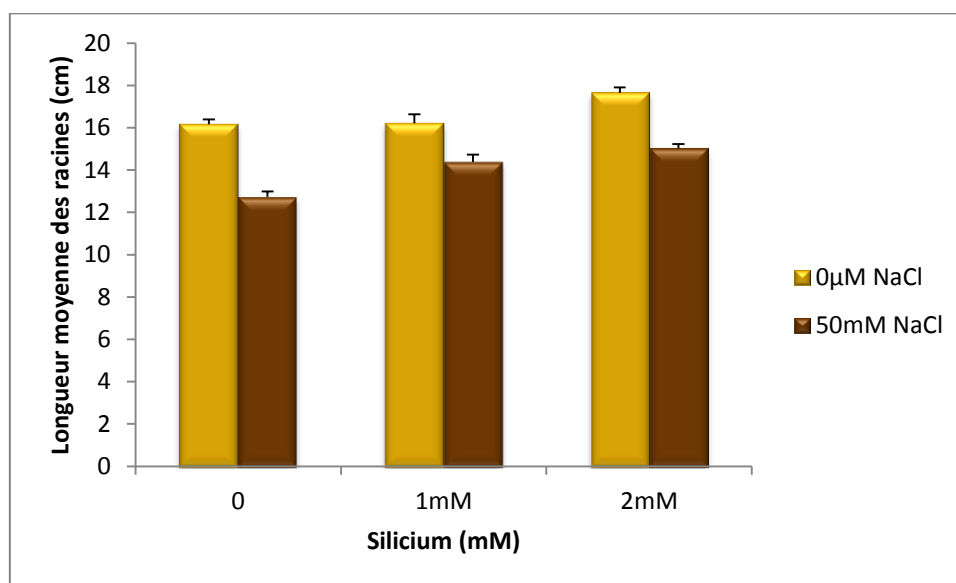


Figure (10) : Effet du silicium sur la longueur moyenne des racines des plantes de blé dur soumises ou non au stress du chlorure de sodium.

Résultats et Discussion

III. 1. 2. Influence du silicium sur la longueur moyenne des feuilles des plantes de blé dur soumises ou non au stress du chlorure de sodium

Les résultats mentionnés dans la figure 11 représentent l'effet du silicium sur l'élongation foliaire des plantes de blé dur soumises ou non au stress salin. Les longueurs des feuilles des plantes traitées au NaCl diminuent de manière très hautement significative par rapport à celles du témoin ($p \leq 0.001$).

Toutefois, nous notons qu'en absence du NaCl, l'ajout du silicium dans la solution hydroponique induit une augmentation des longueurs moyennes des feuilles des plantes de blé dur. Ainsi, nous remarquons que l'application du silicium atténue les effets nocifs du stress salin et aide à améliorer la croissance des plantes de blé dur. L'analyse statistique révèle que la différence des variations de l'élongation foliaire de tous les échantillons des plantes de blé dur est très hautement significative ($p \leq 0.001$).

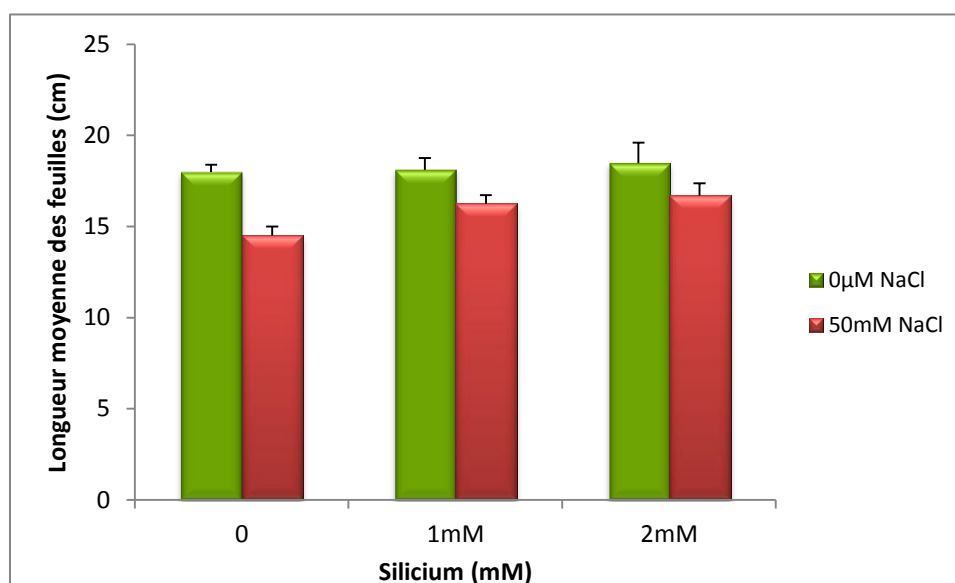


Figure (11) : Effet du silicium sur la longueur moyenne des feuilles au niveau des feuilles des plantes de blé dur soumises ou non au stress du chlorure de sodium.

III. 1. 2. Influence du silicium sur la teneur relative en eau des plantes de blé dur soumises ou non au stress du chlorure de sodium

L'effet du silicium sur la teneur relative en eau des plantes de blé dur soumises ou non au stress du chlorure de sodium illustré par la figure (TRE) ci-dessous. D'après nos résultats, nous notons que la teneur relative en eau des plantes de blé dur traitées par de chlorure de sodium diminue d'une manière hautement significative par rapport à celles du témoin.

Nous constatons également selon nos résultats, l'effet bénéfique sur la teneur relative en eau le plus important a été observé chez les plantes prétraitées par les deux concentrations de silicium (1 et 2 mM) en présence de chlorure de sodium.

Ainsi, l'analyse statistique indique que la différence des variations de la teneur relative en eau de tous les lots des plantes de blé dur est hautement significative ($p \leq 0.01$).

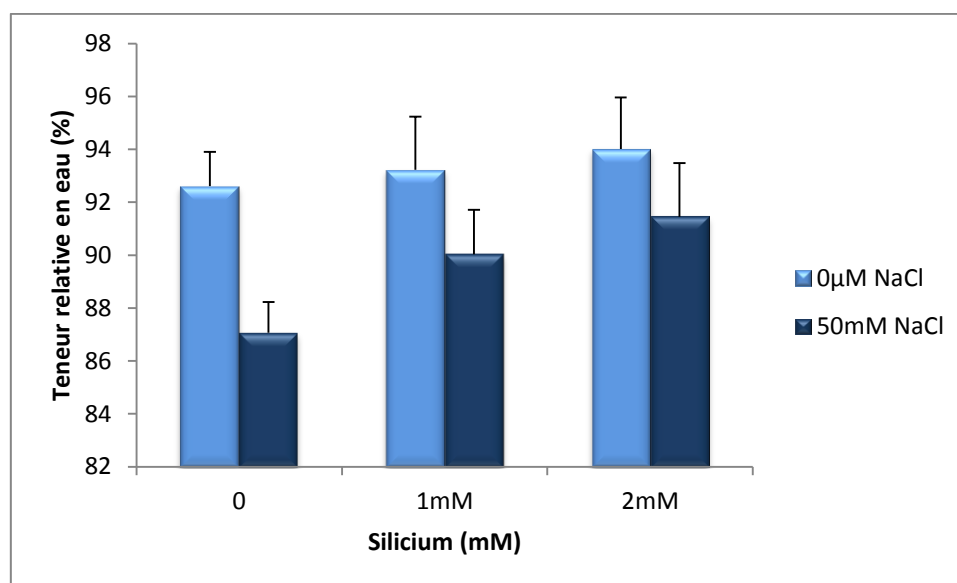


Figure (12) : Effet du silicium sur le teneur relative en eau au niveau des feuilles des plantes de blé dur soumises ou non au stress du chlorure de sodium.

III. 1.5 Influence du silicium sur le taux de fuite des électrolytes au niveau des feuilles des plantes de blé dur soumises ou non au stress du chlorure de sodium

Selon la figure 13, on note que le taux de fuite des électrolytes chez les plantes traitées par le chlorure de sodium (50mM) enregistre une augmentation très hautement significative ($p \leq 0.001$) par rapport à celui des plantes témoins.

Cependant, l'effet combiné du NaCl et du Silicium (concentration 1mM et 2mM) permet d'observer une diminution remarquable du taux de fuite des électrolytes chez les plantes traitées au niveau des feuilles des plantes de blé dur. En outre, l'analyse de la variance révèle un effet très hautement significatif ($p \leq 0.001$).

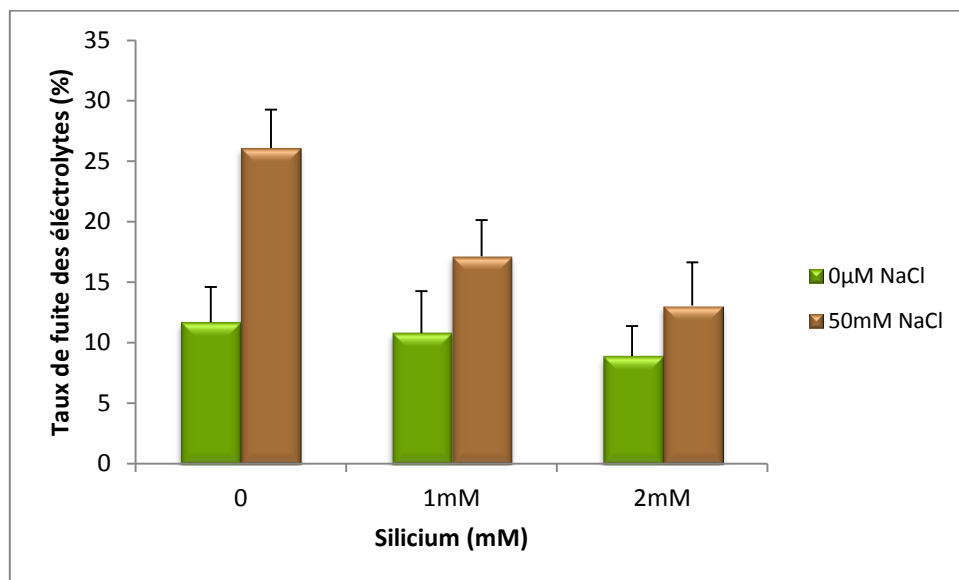


Figure (13) : Effet du silicium sur le taux de fuite des électrolytes au niveau des feuilles des plantes de blé dur soumises ou non au stress du chlorure de sodium.

III. 1.6 Influence du silicium sur la synthèse du Malondialdéhyde (MDA) dans les feuilles des plantes de blé dur soumises ou non au stress du chlorure de sodium

La figure 14 illustre l'effet du silicium sur la synthèse du Malondialdéhyde (MDA) dans les feuilles des plantes de blé dur soumises ou non au stress salin. D'après les résultats obtenus, nous remarquons que le traitement du chlorure de sodium provoque une augmentation des concentrations du MDA au niveau des feuilles des plantes de blé dur par rapport au témoin.

En revanche, l'ajout du silicium dans les solutions nutritives en présence du chlorure de sodium induit une diminution graduelle de la synthèse du Malondialdéhyde (MDA) chez les lots traités. L'analyse de la variance montre que la différence des variations de la synthèse du malondialdéhyde chez les plantes de blé dur est très hautement significative ($p \leq 0.001$).

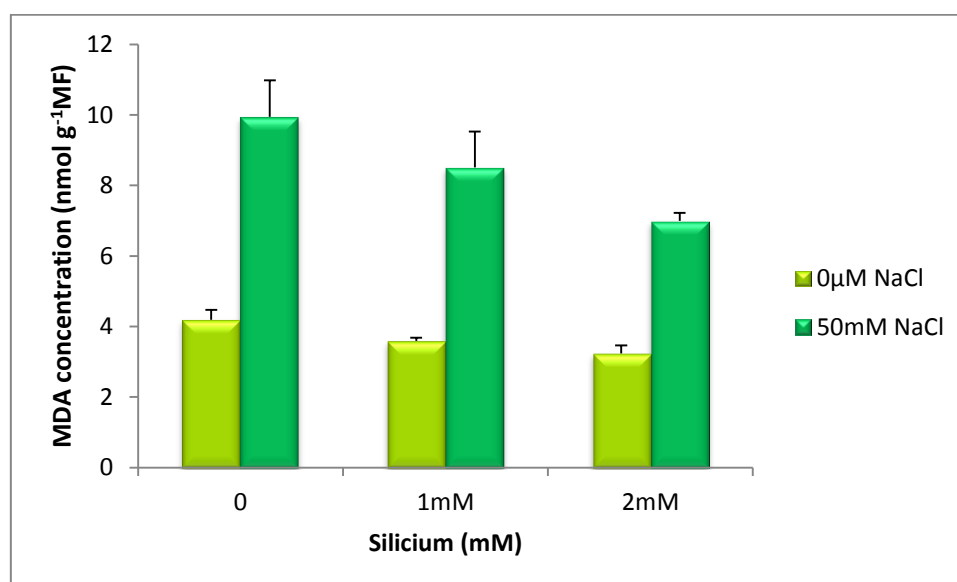


Figure (14): Effet du silicium sur les concentrations du Malondialdéhyde (MDA) dans les feuilles des plantes de blé dur soumises ou non au stress du chlorure de sodium.

III. 1. 7 Influence du silicium sur la production du peroxyde d'hydrogène (H₂O₂) dans les feuilles des plantes de blé dur soumises ou non au stress du chlorure de sodium

La figure 15 représente l'effet du silicium sur la production du peroxyde d'hydrogène (H₂O₂) dans les feuilles des plantes de blé dur soumises ou non au stress du chlorure de sodium. Nos résultats montrent que l'exposition des plantes de blé dur à la concentration 50mM du chlorure de sodium induit une accroissement significative de la synthèse du peroxyde d'hydrogène (H₂O₂) au niveau des feuilles des plantes de blé dur par rapport à celles du témoin. Néanmoins, l'application des deux concentrations du silicium a fait baisser significativement la production du peroxyde d'hydrogène (H₂O₂) dans les feuilles des plantes traitées au chlorure de sodium.

Nous notons selon nos résultats, que l'atténuation de la surproduction du peroxyde d'hydrogène (H₂O₂) par le silicium a été plus importante au niveau des lots traités par le chlorure de sodium. Ainsi, les concentrations du silicium ont fait amoindrir la synthèse du H₂O₂ dans les feuilles des plantes en présence du chlorure de sodium d'environ 22%.

En outre, l'analyse statistique révèle que la différence des variations des concentrations du H₂O₂ dans les feuilles des plantes de blé dur est significative ($p \leq 0.05$).

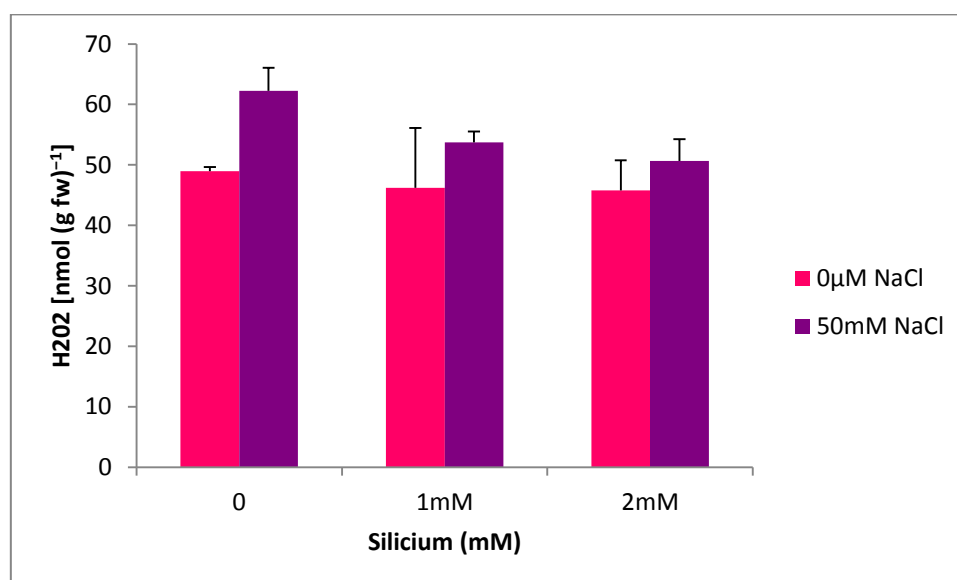


Figure (15): Effet du silicium sur les concentrations du peroxyde d'hydrogène (H₂O₂) dans les feuilles des plantes de blé dur soumises ou non au stress du chlorure de sodium.

III. 2. Discussion

En premier lieu, nous avons évalué les réponses de blé dur (*Triticum durum* Desf.) au stress oxydant induit par le chlorure de sodium. Pour cela, nous avons évalué différents paramètres physiologiques et biochimiques (croissance et analyse de la perméabilité membranaire). Par la suite, nous avons décidé d'étudier l'effet du silicium comme un moyen d'atténuation des dommages oxydatifs chez les plantes de blé dur soumises au stress salin.

Le développement des plantes traverse plusieurs phases de croissance allant de graine (germination) à la graine (récolte). En effet, La germination est considérée comme une étape critique dans le cycle de développement de la plante, car elle conditionne l'installation et la relation de la plante avec le milieu ; ainsi que sa productivité ultérieure. De ce fait, La germination ou l'embryogénèse tardive est un processus complexe, il implique de nombreux changements métaboliques.

Dans notre travail, nous avons constaté que la présence du chlorure de sodium dans le milieu de culture des plantes traitées provoque une diminution du taux de germination ainsi que le ralentissement de sa vitesse. Ce retard pourrait être dû à l'altération des enzymes et des hormones qui se trouvent dans la graine (**Botia et al., 1998**). D'autres auteurs signalent que l'effet du chlorure de sodium pourrait s'agir également soit d'une difficulté d'hydratation des graines suite à un potentiel osmotique élevé entraînant une inhibition des mécanismes aboutissant à la sortie de la radicule hors des téguments et par conséquent un retard de germination des graines (**Gill et al., 2003**), ou soit d'une augmentation de la pénétration d'ions qui peuvent s'accumuler dans la graine à des doses qui deviennent toxiques (**Debez et al., 2001**).

Toutefois, nous avons constaté lors de nos résultats que le taux de germination des plantes soumises ou non au stress salin s'est amélioré suite à l'application du silicium. Différentes études ont démontré que l'application du silicium pourrait favoriser la croissance des plantes sous l'effet du stress salin ; il agit de manière positive sur la croissance, le développement et le rendement des plantes, en améliorant la croissance, le développement et le rendement de nombreuses plantes telles que le riz (*Oryza sativa* L.), canne à sucre (*Saccharum officinarum* L.), tomate (*Solanum lycopersicum* L.) et de nombreuses céréales (**Epstein, 2000 ; Datnoff et al., 2001 ; Ma et Takahashi, 2002 ; Alayat, 2015 ; Wasti et al., 2016**).

Résultats et Discussion

Nos résultats ont également mis en évidence que le chlorure de sodium induit une diminution de l'élongation des racines et des feuilles des plantes de blé dur comparées aux plantes témoins. Selon **Munns et al. (2002)**, la salinité abaisse le potentiel hydrique des racines, et ceci cause des réductions du taux de croissance. Ceci pourrait être dû aux effets osmotiques du stress salin limitant la croissance des racines, ce qui affecte les possibilités d'absorption des éléments nutritifs du sol (**Tester et Davenport, 2003 ; Jabnoune, 2008**). En outre, la salinité est une contrainte majeure qui affecte la croissance et le développement des plantes (**Bouaouina et al., 2000**). La salinité des sols et des eaux demeure, pour les régions arides et semi arides, un obstacle majeur à la croissance des végétaux. En effet, les sels accumulés dans le sol peuvent limiter ou complètement arrêter la croissance du végétal suite à une élévation de la pression osmotique du milieu et/ou à l'effet toxique spécifique des éléments (**Arbaoui et al., 1999**). Le stress salin ou la salinité du sol est un facteur environnemental important qui affecte la croissance des plantes et la productivité agricole.

Nos résultats démontrent également que l'application du silicium améliore nettement la croissance des plantes stressées. Il a été observé par **Chaffai, (2017)** que l'inhibition de croissance a été réduite lors du prétraitement au silicium qui a atténué la réduction de l'élongation racinaire et foliaire des plantes de blé dur soumises au stress salin. Plusieurs travaux similaires ont été rapportés (**Liang et al., 2005 ; Zeng et al., 2011 ; Ahsan Farooq et al., 2013 ; Bharwana et al., 2013 ; Alayat, 2015**). Par ailleurs, il a été constaté que la réduction de l'absorption du potassium causé par le stress salin peut être surmontée par le prétraitement au silicium en particulier au niveau des racines (**Zuccarini, 2008**). Ainsi, il a été trouvé que le silicium peut servir comme un élément bénéfique pour la croissance et le développement des plantes (**Epstein, 2001**). Ces effets bénéfiques sur la croissance pourraient être dus à la limitation des pertes d'eau et à l'optimisation de la nutrition hydrominérale des plantes (**Bouzoubaa et al., 2009 ; Ahsan Farooq et al., 2013**).

De plus, le sel entraîne une réduction de la quantité de l'eau disponible dans le sol (piégeage des molécules d'eau par les ions). Les niveaux de tolérance à la salinité sont très variables entre plantes (**Rabie et Almadini, 2005**). En effet, la salinité entraîne une réduction de la capacité des plantes à absorber l'eau, une chute des potentiels hydrique foliaire et osmotique (déshydratation cellulaire) (**Hamdia et Shaddad, 2010 ; Joseph et Jini, 2011**). Dans notre travail, nous avons remarqué que la teneur relative en eau des plantes de blé dur diminue de façon hautement significative chez les plantes traitées au chlorure de sodium, par

Résultats et Discussion

rapport aux plantes témoins. Ainsi, selon divers auteurs, le stress salin résulte de la perturbation des fonctions de nutrition hydrique, minérale et carboné des plantes (**Levitt, 1980 ; Levigneron *et al.*, 1995**). La teneur relative en eau est souvent considérée comme un excellent indicateur de l'état hydrique de la plante. Elle est liée à la capacité de la plante à maintenir un niveau d'hydratation des tissus afin de lui garantir la continuité de son métabolisme ou bien de l'activité métabolique (**Monneveux *et al.*, 1992 ; Aoumeur, 2012**).

Néanmoins, l'addition du silicium dans les solutions hydroponiques des traitements des plantes de blé dur a bonifié leur teneur relative en eau chez les plantes exposées au stress salin. Ceci peut être lié à la limitation des pertes d'eau et à l'optimisation de la nutrition hydrominérale des plantes en diminuant la transpiration excessive, un excès de transpiration entraînant la fermeture des stomates et une diminution de la photosynthèse (**Ma et Takahashi 2002 ; Abdollah *et al.*, 2010 ; Ahsan Farooq *et al.*, 2013**).

Dans le sol, le chlorure de sodium agirait par cimentation de différentes particules constitutives élémentaires, réduisant ainsi les taux d'absorption hydrique. La perturbation de la nutrition minérale proviendrait quant à elle de la compétition des ions Na^+ et Cl^- avec les ions nutritifs telluriques (Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} ...) (**Nabors, 1980**). En effet, nos résultats indiquent que la concentration de chlorure de sodium appliquée sur les plantes de blé dur a montré une augmentation très hautement significative du taux de fuite des électrolytes au niveau des feuilles des plantes de blé dur traitées par rapport aux plantes témoins. L'augmentation significative de la fuite des électrolytes observée pourrait désigner que le stress salin a affecté l'intégrité et la stabilité membranaire des plantes stressées. Des résultats similaires ont été obtenus par **Lutts *et al.* (1996) ; Kaya *et al.* (2002) et Levent Tuna (2007)** qui ont signalé qu'une concentration élevée de sel peut affecter la perméabilité membranaire des variétés de riz, de fraise et du blé, respectivement. Le dysfonctionnement de la perméabilité membranaire cellulaire peut être exprimé par le taux accru de fuites des électrolytes (**Lutts *et al.*, 1996**).

En outre, dans notre travail, nous avons également constaté que l'application du silicium a fait baisser le taux de fuite des électrolytes chez les plantes soumises ou non au stress salin. Plusieurs travaux similaires ont été rapportés (**Liang *et al.*, 1996 ; Levent Tuna, 2007 ; Abassi *et al.*, 2014 ; Xu *et al.*, 2015 ; Li *et al.*, 2015, Imtiaz *et al.*, 2016**) ; ce qui suggère que le silicium pourrait restaurer la perméabilité membranaire et maintenir l'intégrité membranaire (**Zhu *et al.*, 2004**).

Résultats et Discussion

La membrane cellulaire peut être la cible des espèces réactives de l'oxygène (ROS). Ces dernières ciblent en premier les lipides présents dans les membranes cellulaires et subcellulaires. Les membranes riches en acides gras polyinsaturés (AGPI) sont très sensibles à l'oxydation en raison de leur degré élevé d'insaturation (**Chebab et al., 2009**). L'oxydation des lipides génère des peroxydes lipidiques qui sont eux-mêmes très réactifs. La peroxydation des lipides induit une modification de la fluidité, de la perméabilité et de l'excitabilité des membranes (**Pamplona et al., 2000**).

Le malondialdéhyde est le produit d'oxydation des membranes lipidiques, s'accumule quand les plantes sont exposées au stress oxydatif. Les concentrations du MDA sont considérées comme un indicateur de la peroxydation des lipides après un stress abiotique (**Ding et al., 2004**). La détermination de ses concentrations est utilisée comme un outil fiable pour détecter la peroxydation lipidique (**Taulavuori et al., 2001 ; Loureiro et al., 2006 ; Yadav, 2010**). Ainsi, nos résultats ont montré que le chlorure de sodium a provoqué une augmentation très hautement significative des concentrations du MDA au niveau des feuilles des plantes de blé dur stressées. **Daud et al. (2015)** a également enregistré que le niveau de MDA augmente chez le Cotton (*Gossypium hirsutum* L.) soumis au stress salin. Cela peut être dû à une peroxydation lipidique ; et donc à une déstabilisation de la membrane en raison de la forte production de ROS causant des dommages oxydatifs (**Alayat, 2015**). En effet, la surproduction des ROS cause une peroxydation des lipides qui conduit à la formation de produits de dégradation tels que les alcanes et des aldéhydes (Malondialdéhyde) (**Ferrat et al., 2003**). L'effet le plus néfaste des ROS dans les plantes est la peroxydation lipidique, qui peut entraîner une désorganisation membranaire (**Timbrell, 2009 ; Wahsha et al., 2010**).

En revanche, l'addition des deux concentrations du silicium aux lots traités par le stress salin a fait diminuer les concentrations du MDA dans les feuilles des plantes du blé dur. Ce qui indique que le silicium réduit la peroxydation lipidique en améliorant la perméabilité membranaire des cellules des plantes exposées au stress salin. Des résultats similaires ont été rapportés (**Song et al., 2011 ; Tripathi et al., 2013 ; Alzahrani et al., 2018**).

L'effet le plus néfaste des ROS dans les plantes est la peroxydation lipidique, qui peut entraîner une désorganisation membranaire (**Timbrell, 2009 ; Wahsha et al., 2010**). En ce qui concerne le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2), nous avons noté une nette augmentation au niveau des feuilles des plantes de blé dur traitées. Ceci peut être lié aux dommages oxydatifs subis par la membrane. Nos résultats montrent également que l'accumulation du H_2O_2 est plus

Résultats et Discussion

notée au niveau des feuilles des plantes traitées par rapport aux témoins. Ces résultats indiquent que le chlorure de sodium provoque une surproduction importante du H_2O_2 . Le peroxyde d'hydrogène peut provenir de la réaction de dismutation de l'anion superoxyde par la SOD (Cakmak, 2000; Mishra *et al.*, 2006). Il peut provenir aussi de l'altération du transport d'électrons dans les chaînes photosynthétique et respiratoire (Dixit *et al.*, 2001; Gomes-Junior *et al.*, 2006). Cette augmentation pourrait être expliquée, par le rôle important que joue le H_2O_2 dans la signalisation d'un stress oxydatif (Neil *et al.*, 2002). Le H_2O_2 peut être diffusé à des distances relativement longues provoquant les changements dans le statut redox des tissus et des cellules environnantes où à des concentrations relativement faibles ou il déclenche une réponse antioxydante. C'est-à-dire que le H_2O_2 joue le rôle d'une molécule signal qui alerte la cellule de la présence d'un stress environnemental (Rentel et Knight, 2004). Le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) peut fonctionner comme un messenger secondaire à des faibles concentrations mais il devient toxique à fortes concentrations (Dat *et al.*, 2000).

Cependant, dans notre travail nous avons remarqué que le prétraitement avec le silicium a baissé significativement la production du peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) dans les feuilles des plantes de blé dur traitées par le NaCl. La diminution de la synthèse des H_2O_2 après application du silicium a été montrée par de nombreux auteurs (Gunes *et al.*, 2007 ; Li *et al.*, 2012 ; Tripathi *et al.*, 2012 ; Liu *et al.*, 2013 ; Malcovska *et al.*, 2014 ; Chalmardi *et al.*, 2014).

***CONCLUSION ET
PERSPECTIVES***

Conclusion et perspectives

La salinisation des terres est un problème majeur à l'échelle mondiale. Selon la FAO, elle affecte déjà au moins 400 millions d'ha et en menace gravement une surface équivalente. On distingue en général la salinisation primaire, liée à la présence naturelle relativement concentrée de sels (proximité de mers ou d'océans, présence de dépôts de sels...), et la salinisation secondaire, dont le développement apparaît étroitement lié à l'irrigation. Cette dernière est le processus de dégradation de la qualité des sols le plus rapide dans les périmètres irrigués et particulièrement dans les zones arides et semi arides.

L'utilisation du silicium (silice) comme outil d'atténuation des effets délétères de la salinité chez les plantes s'avère être une approche prometteuse afin de limiter et réduire les dommages oxydatifs causés par le stress salin. En effet, le silicium élément minéral abondant de la croûte terrestre après l'oxygène est connu pour ses effets bénéfiques pour la croissance des plantes et le rendement de différentes cultures.

Pour réaliser cet objectif, nous nous sommes consacrés tout d'abord à l'étude de l'effet du stress salin sur la croissance des plantes de blé et sur quelques biomarqueurs. Par la suite, nous nous sommes intéressés à l'évaluation du silicium comme un moyen d'atténuation du stress salin chez les plantes de blé dur.

Ainsi nos résultats ont montré que le stress causé par la salinité, engendre des désordres dans la croissance des plantes de *Triticum durum*, ainsi qu'une altération de la membrane cellulaire des tissus des plantes traitées causée par des dommages oxydatifs. Ces altérations se manifestent, à l'échelle de la plante entière, par une réduction de l'élongation racinaire et foliaire, une réduction des biomasses fraîche et sèche et une induction des concentrations en MDA et H₂O₂.

Par ailleurs, le prétraitement des plantes avec le silicium a favorisé l'accroissement foliaire et racinaire ainsi que la teneur relative en eau des lots exposés ou non au stress salin. En ce qui concerne la perméabilité membranaire, nos résultats ont montré que l'addition du silicium aux cultures des plantes, a fait baisser le taux de fuite des électrolytes, les concentrations du malondialdéhyde (MDA) et celles du H₂O₂. Ce qui indique, d'une part, que le silicium pourrait réduire la peroxydation lipidique en améliorant la perméabilité membranaire des cellules des plantes exposées au stress salin. D'autre part, le prétraitement

des plantes du blé dur par le silicium pourrait nettement améliorer la capacité de défense contre les dommages oxydatifs induits par le stress salin.

Pour conclure, il est important de noter que, le silicium agit positivement et de façon efficiente à tous les stades de développement de la plante. De plus, il a un impact positif sur la bourse de l'agriculteur d'une part et la protection de l'environnement par le raisonnement et l'économie de l'eau et des fertilisants.

En perspectives, il serait intéressant de :

- Enquêter sur les mécanismes d'absorption, de transport et d'accumulation du silicium par les systèmes racinaires des plantes.
- Recommander et intégrer le silicium dans la composition des fertilisants en raison de ses multiples propriétés bénéfiques pour les plantes.
- Evaluer les effets du silicium à long terme sur des cultures en champs, en étudiant sur le terrain les concentrations du silicium à utiliser, la fréquence d'utilisation au moment d'application dans les cycles de cultures.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- Abbasi G.H, Akhtar J, Anwar-ul-Haq M, Ali S, Chen Z.H, Malik W, 2014. Exogenous potassium differentially mitigates salt stress in tolerant and sensitive maize hybrids. Pak. J. Bot. 46, 135-146.
- Abdelly C, Öztürk M, Ashraf M, Grignon C, 2008. Biosaline Agriculture and High Salinity Tolerance. (Eds) Birkhäuser Verlag /L Swizerland, 367 p. 102.
- Abdollah H.A, Abdolzadeh, H, Sadeghipour R, 2010. Beneficial effects of silicon nutrition in alleviating salinity stress in hydroponically grown canola, *Brassica napus* L., plants. Soil Sci. Plant Nutr. 56, 244-253.
- Ahsan-Farooq M, Shafaqat A, Amjad H, Wajid I, Khalid M, Zafar I, 2013. Alleviation of cadmium toxicity by silicon is related to elevated photosynthesis, antioxidant enzymes; suppressed cadmium uptake and oxidative stress in cotton. Ecotoxicology and Environmental Safety, 96, 242–249.
- Alayat A, 2015. Etude de l'impact toxicologique de certains agents chimiques sur la qualité des céréales : cas du blé et de l'orge. Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar - Annaba, 266 p.
- Ali S, Bai P, Zeng F, Cai S, Shamsi I.H, Qiu B, Wu F, Zhang G, 2011. The ecotoxicological and interactive effects of chromium and aluminum on growth, oxidative damage and antioxidant enzymes on two barley genotypes differing in Al tolerance. Environ. Exp. Bot, 70, 185-191 p.
- Allen G.J, Muir S.R, Sanders D, 1995. Release of Ca^{2+} from individual plant vacuoles by both InsP3 and cyclic ADP-ribose. Science 268 (5211): 735-737.
- Alzahrani Y, Kusvran A, Alharby H.F, Kusvuran S, Rady MM., 2018. The defensive role of silicon in wheat against stress conditions induced by drought, salinity or cadmium: Ecotoxicology and Environmental Safety, 187–196 p.
- Anonyme, 1972. IMPRIMERIE PIRMIN-DIDOT. - PARIS - MESNIL - IVRY – 6918. Édition na 415 - Dépôt légal fer trimestre 1972.
- Aoumeur H, 2012. L'effet stressant du plomb sur la croissance du radis « *Raphanus sativus* L. » : Réponses physiologiques, biochimiques et efficacité potentielle de phyto remédiation. Mémoire de Magister. Université d'Oran, 153 p.

- Arbaoui M., Benkhelif M., Belkhodja M, 1999. Réponses physiologiques de quelques variétés de blé dur à la salinité au stade juvénile. CIHEAM - Options Méditerranéennes, pp. 167-
- Arun Kumar S, Venkateswarlin B, 2011. Abiotic stress in plants – mechanisms and adaptations. Croatia.p.440.
- Aubert G, 1976. Les sols sodiques en afrique du nord. Disponible en ligne sur :(<https://core.ac.uk/download/pdf/39881064.pdf>)
- Bharwana SA., Ali S., Farooq MA., Iqbal N., Abbas F., et al, 2013. Alleviation of Lead Toxicity by Silicon is Related to Elevated Photosynthesis, Antioxidant Enzymes Suppressed Lead Uptake and Oxidative Stress in Cotton. J Bioremed Biodeg, 4, 187.
- Bartels D, Nelson D, 1994. Approaches to improve stress tolerance using molecular genetics. Plant Cell Environment. 17: 659-667.
- Belaadi M, 2014. Etude de l'effet de la salinité sur la germination et la croissance de quelques variétés d'Haricot (*Phaseolus vulgaris* L.). Mémoire de Master : phytopathologie et phytopharmacie. Université 8 Mai 1945_Guelma ,54 p.
- Benzellat B, 2011. Contribution à l'amélioration des rendements des plantes cultivées en sols sales. Mémoire de Magister. Université de Tlemcen ,170 p. :disponible sur(<http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/2387/1/Contribution-a-l-amelioration.pdf>)
- Bernard Q, 2016. Le cycle biogéochimique du silicium dans l'océan. .ISTE lid 2016. Britain. 145. Disponible sur : [https://books.google.dz/books\(978-1-7806-144-6\(e-book\)\)](https://books.google.dz/books(978-1-7806-144-6(e-book)))
- Botia P, Carvajal M, Cerda A, Martinez V, 1998. “Response of eight *Cucumis melo* cultivars to salinity during germination and early vegetative growth”: Agronomie 18, 503-513 p.
- Bouaouina, S., Zid, E. and Hajji M, 2000. Tolérance à la salinité, transports ioniques et fluorescence chlorophyllienne chez le blé dur (*Triticum turgidum* L.). Royo C., Nachit MM, Di Fonzo N. & Araus JL, éd. L'amélioration du blé dur dans la région méditerranéenne: nouveaux défis. Zaragoza: CIHEAM-IAMZ: 239-243.
- Boudreau A, Ménard G, 1992. Le blé : éléments fondamentaux et transformation. Sainte-Foy (Canada). Presses de l'Université Laval, 439 p.
- Bouzoubaâ Z, Ait Lhaj A, Mimouni A, 2009. Le silicium ; levier minéral indispensable pour une agriculture durable du Maroc, Symposium international « Agriculture durable en région Méditerranéenne », Maroc, 14-16 mai 2009.
- Boyer J.S, 1982. Plant productivity and environment. Science 218: 443-448.

- Brink M *et al.*, 2006. Céréales et légumes secs. Wageningen : Fondation PROTA, cop. 2006. 1 vol. (327 p.). Ressources végétales de l'Afrique tropicale ; 1 (ISBN 90-5782-172-9)
- Buege J.A, Aust S.D, 1978. Microsomal lipid, Peroxidation. *In*: Flesicher, S., Packer, L. (Eds.), *Methods in Enzymology*. Vol. 52. Academic Press, New-York, pp 302–310.
- Cakmak I, 2000. Possible role of zinc in protecting plant cells from damage by reactive oxygen species. *New Phytologist*, 146, 185–205.
- Carter D.I, 1975. Problems of salinity in agriculture. *Plants in Saline Environments*. Springer-Verlag Berlin. pp. 25-35.
- Chalmardi Z.K, Abdolzadeh A, Sadeghipour H.R, 2014. Silicon nutrition potentiates the antioxidant metabolism of rice plants under iron toxicity. *Acta Physiol. Plant.*, 36, 493–502.
- Chebab S., Belli N., Leghouchi E., Lahouel M, 2009. Stress oxydatif induit par deux pesticides : l'endosulfan et le chlorpyrifos. *Environnement, Risques*.
- Cherbuy B, 1991. Les sols salés et leur réhabilitation étude bibliographique. Cemagraf, école. Nat. Renne, 170 p.
- Dat J.F, Lopez-Delgado H, Foyer C.H, Scott I.M, 2000. Effects of salicylic acid on oxidative stress and thermo tolerance in tobacco. *Journal of Plant Physiology*, 156, 659-665.
- Daud M.K, Quiling H, Lei M, Ali B, Zhu S.J, 2015. Ultrastructural, metabolic and proteomic changes in leaves of upland cotton in response to cadmium stress, *Chemosphere*, vol. 120: 309-320
- Debez A, Chaibi W, Bouzid S, 2001. Effet du NaCl et de régulateurs de croissance sur la germination d'*Atriplex halimus* L. *Agricultures*, 135-138 p.
- Ding H.D, Wan Y.H, Qi NM, Zhu WM, Yang X.F, Shao Y.C, 2004. Effects of Cd²⁺ and Zn²⁺ stress on antioxidant enzyme system of tomato seedlings. *Acta Agr Shanghai*, 20, 79-82.
- Dionisio-Sese M.L, Tobita S, 1998. Antioxidant responses of rice seedlings to salinity stress. *Plant Sci*, 135, 1-9.
- Dixit V, Pandey V, Shyam R, 2001. Differential oxidative responses to cadmium in roots and leaves of pea (*Pisum sativum* cv. Azad). *J. Exp. Bot*, 52 : 1101-1109.
- Doumi A, 2014. Analyse du comportement de 06 lignées de petit pois (*pisum sativum*) soumises au stress salin. Thèse de magister : Sciences Agronomiques .Université Mohamed Boudiaf M'sila, 91p.
- Durand J.H, 1958. Les sols irrigables : Etude pédologique -ED. Imbert , Alger, 190 p.
- Epstein E, Norlyn J.D, Rush D.W, Kingsbury R.W, Kelley D.B, Cunningham G.A, Wrona A.F, 1980. Saline culture of crops: a genetic approach. *Science* 210(4468): 399-404.

- Epstein E, 2001. Silicon in plants : Facts vs. Concepts. Silicon in agriculture. Amsterdam. Elsevier Science B.V, 1-15.
- Erroux J, 1991. « Blé », in Gabriel Camps (dir.), *10 / Beni Isguen – Bouzeis*, Aix-en-Provence, Edisud (« Volumes », no 10) , décembre 1991 [En ligne], mis en ligne le 01 mai 2013. URL <http://journals.openedition.org/encyclopedieberbere/1766>
- Etesami H, Jeong B.R, 2018. Silicon (Si): Review and future prospects on the action mechanisms in alleviating biotic and abiotic stresses in plants. *Ecotoxicology and environmental safety*, 147, 881-896 p.
- FAO, 2005. Foresterie en zone aride. Archives de documents de la FAO, 12 p.
- Faure G, 1991. Principles and application of inorganic geochemistry. New York: MacMillan
- Feillet P, 2000. Le grain de blé : composition et utilisation, ED ; Institut National de la Recherche Agronomique, Paris, 308p.
- Ferrat L, Pergent-Martini C, Roméo M, 2003. Assessment of the use of biomarkers in aquatic plants for the evaluation of environmental quality : application to seagrasses. *Aquat. Toxicol*, 65, 187–204.
- Franconie H, Chastanet M, Sigaut F, 2010. Couscous, boulgour et polenta. Transformer et consommer les céréales dans le monde Paris, Karthala, 480 p.
- Gama P.B.S, Inanaga S, Tanaka K, Nakazawa R, 2007. Physiological response of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) seedlings to salinity stress. *Afr. J. Biotechnol.* 6 (2).
- Gill P.K, Sharma A.D, Singh P, Bhullar S.S, 2003. Changes in germination, growth and soluble sugar contents of Sorghum bicolor L. Moench seeds under various abiotic stresses, *Plant Growth Regulation* 40 (2), pp. 157-162.
- Gómez-Cadenas A, Tadeo F, Primo-Millo E, Talon M, 1998. Involvement of abscisic acid and ethylene in the responses of citrus seedlings to salt shock: *Physiologia Plantarum* 103(4): 475-484.
- Gómez-Cadenas A, Tadeo F.R, Talon M, Primo-Millo E, 1996. Leaf abscission induced by ethylene in water-stressed intact seedlings of Cleopatra mandarin requires previous abscisic acid accumulation in roots: *Plant physiology* 112 (1): 401-408.
- Gomes-Junior R.A, Moldes C.A, Delite F.S, Pompeu G.B, Gratao P.L, Mazzafera P, Lea P.J, Azevedo R.A, 2006. Antioxidant metabolism of coffee cell suspension cultures in response to cadmium. *Chemosphere*, 65, 1330-1337.
- Gong J.M., Lee D.A, Schroeder J.I, 2003. Long-distance root-to-shoot transport of phytochelatin and cadmium in Arabidopsis. *Proc Natl Acad Sci USA*, 100, 10118-10123.

- Gunes A, Inal A, Bagci E.G, Coban S, Sahin O, 2007. Silicon increases boron tolerance and reduces oxidative damage of wheat grown in soil with excess boron. *Biol. Plant.*, 51, 571–574.
- Hamdani D, 2012. Actions des poudres et des huiles de quelques plantes aromatiques sur les paramètres biologiques de la bruche de haricot, *acanthoscelus obtectus* Say. (*Coleoptera : bruchidae*) Thèse de Magister . université Mammérie Tizi-Ozou
- Hamdia M., Shaddad M.A.K, Doaa M.M, 2004. Mechanisms of salt tolerance and interactive effects of *azospirillum brasilense* inoculation on maize cultivars grown under salt stress conditions. *Plant Growth Regulation*. V 44, n°02, p 165-174. (10).
- Haouala F *et al.*, 2007. Effet de la salinité sur la répartition des cations (Na^+ , K^+ et Ca^{2+}) et du chlore (Cl^-) dans les parties aériennes et les racines du ray-grass anglais et du chiendent : *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* Vol. 11, n°3, pp. 235-244.
- Hodges D.M, DeLong J.M, Forney C.F, Prange R.K, 1999. Improving the thiobarbituric acid-reactive-substances assay for estimating lipidperoxidation in plant tissues containing anthocyanin and other interfering compounds. *Planta*, 207, 604–611 p.
- Imtiaz M, Rizwan M.S, Mushtaq M.A, Ashraf M, Shahzad S.M, Yousaf B, Saeed D.A, Rizwan M, Nawaz M.A, Mehmood S, Tu S, 2016. Silicon occurrence, uptake, transport and mechanisms of heavy metals, minerals and salinity enhanced tolerance in plants with future prospects: A review. *Journal of Environmental Management* 183 (2016) 521-529.
- Inaki A, Marie-Anne V, 1988. Introduction à la chimie générale. 1^{ère} édition. Bruxelles. 510 p. Disponible sur : <https://books.google.dz/books> (2-8041-0720-5).
- INSID, 2008. Sols salins en Algérie. Disponible sur : (<http://www.insid.dz/realisation/autres%20activites/A8.pdf>).
- ISTA, 2003. International Rules For Seed Testing. Zurich, Switzerland.
- Jabnoun M, 2008. Adaptation des plantes à l'environnement. Faculté des sciences Aix Marseille université : Microbiologie, biologie végétale et biotechnologies. 71p.
- Jean-Claude T, 2019. Le silicium organique du rêve à la réalité. Disponible sur : <https://books.google.dz/books> (978-0-244-65569-3).
- Jean-Georges B, 2016. Silicium: l'élément longtemps oublié des plantes terrestres. Disponible sur : <https://www.soin-de-la-terre.org/wp-content/uploads/Silicium-1%C3%A9l%C3%A9ment-longtemps-oubli%C3%A9-des-plantes-terrestres- Jean-Georges-Barth.pdf>.

- Jean-Paul, L, 2007. Les grands sols du monde. Première édition Espagne. 576 p.(science et technologie de l'environnement). Disponible sur : (<https://books.google.dz/books> (978-2-88074-723-7)).
- Joseph B, Jini D, 2011. Development of salt stress-tolerant plants by gene manipulation of antioxidant enzymes. Asian journal of agricultural research 5 (1): 17-27.
- Kadkol G.P, Sissons M, 2016. Durum Wheat: Overview. In: Wrigley, C., Corke, H., and Seetharaman, K., Faubion, J., (eds.) *Encyclopedia of Food Grains, 2nd Edition*, pp. 117-124. Oxford: Academic Press.
- Kaya, C., Ak, B.E., Higgs, D., Murillo-Amador B, 2002. Influence of foliar applied calcium nitrate on strawberry plants grown under salt stress conditions. Aust. J. Exp. Agric. 42, 631–636.
- Khadri M, Pliego L, Soussi M, Luch C, Ocana A, 2001. Ammonium assimilation and ureide metabolism in common bean (*Phaseolus Vulgaris*) nodules under salt stress. Agronomie, 21
- Khales A, Baaziz M, 2006. Etude des peroxydases d'écotypes d'*Opuntia Ficus indica* L. en relation avec le développement dans les conditions de stress Salin. Congrès international de Biochimie, Agadir: pp, 133-136.
- Khan A, Latif khan A, Munner S, Yoon H, Al Rawahi A, Al Harrasi A, 2019. Silicon and Salinity: Crosstalk in Crop-Mediated Stress Tolerance Mechanisms. Frontiers in plant science, 10 : p .1-21
- Khelil A, 2013. Effets du Silicium sur la réponse de la tomate à la contrainte saline. 2^{ème} Workshop sur l'agriculture saharienne "Situation actuelle et contraintes". Université Kasdi Merbah-Ouargla : Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, le 12 novembre 2013
- Levent Tuna A., Cengiz Kayab , David Higgs, Bernardo Murillo-Amador, Salih Aydemir , Ali R, Girgin, 2007. Silicon improves salinity tolerance in wheat plants, Environmental and Experimental Botany Elsevier.121: 1- 7.
- Levigneron A, Lopez F, Berthomieu. P, casse-delbart F., 1995. Les plantes face au stress salin. Cahiers Agriculture : 4:263-273. France.
- Levitt J, 1980. Respons of plants to environmental stresses : water, radiation, salt and other stresses, Academic Press, New York, pp. 365-488.
- Li Huanli, Zhu Y, Hu Y, Han W, Gong H, 2015. Beneficial effects of silicon in alleviating salinity stress of tomato seedlings grown under sand culture. Acta Physiol. Plant 37, 71. Disponible sur: <http://dx.doi.org/10.1007/s11738-015- 1818-7>.

- Liang Y.C, Wong J.W.C, Wei L, 2005. Silicon-mediated enhancement of cadmium tolerance in maize (*Zea mays* L.) grown in cadmium contaminated soil. *Chemosphere*, 58, 475- 483.
- Liu J, Zhang H, Zhang Y, Chai T, 2013. Silicon attenuates cadmium toxicity in *Solanum nigrum* L. by reducing cadmium uptake and oxidative stress. *Plant Physiol. Biochem.*, 68, 1-7.
- Loureiro J, Rodriguez E, Doležal J, Santos C, 2006. Flow cytometric and microscopic analysis of the effect of tannic acid on plant nuclei and estimation of DNA content. *Annals of Botany*, 98, 515–527.
- Lutts S, Kinet J.M, Bouharmont J, 1996. NaCl-induced senescence in leaves of rice (*Oryza sativa* L.) cultivars differing in salinity resistance. *Ann. Bot.* 78: 389-398
- Ma J.F, Miyake Y, Takahashi E, 2001. Silicon as a beneficial element for crop plants. In *Studies in plant Science* (Vol. 8, pp. 17-39) Elsevier.
- Malčovská S.M, Dučaiová Z, Maslaňáková I, Bačkor M, 2014. Effect of silicon on growth, photosynthesis, oxidative status and phenolic compounds of maize (*Zea mays* L.) grown in cadmium excess. *Water Air Soil Pollut.*, 225, 1–11.
- Maillard J, 2001. Le point sur l'Irrigation et la salinité des sols en zone sahélienne. Risques et recommandations. *Handicap International*. Novembre 2001, 34 p.
- Matoh T, Murata S, Takahashi E, 1991. Effect of silicate application on photosynthesis of rice [*Oryza sativa*] plants. *Japanese Journal of Soil Science and Plant Nutrition* (Japan).
- Ministère de l'agriculture du développement rural et de la pêche, 2018. Statistiques Agricoles 2018. Disponible sur : <http://madrp.gov.dz/agriculture/statistiques-agricoles/>
- Mishra S, Srivastava S, Tripathi R.D, Govindarajan R, Kuriakose S.V, Prasad M.N.V, 2006. Phytochelatin synthesis and response of antioxidants during cadmium stress in *Bacopa monnieri* L. *Plant Physiol. Bioch*, 44, 25-37.
- Monneveux P, 2002. Bilan d'activités du laboratoire sur le thème : amélioration de la tolérance a la sécheresse du blé dur. UER de génétique et amélioration des plantes, ENSA - INRA Montpellier.36p.
- Muuns R, 2002. Comparative physiology of salt and water stress *Plant Cell Environ*, 25 p.
- Nabors MW, Gibbs SE, Bernstein CS. and Neis ME, 1980. NaCl-tolerant tobacco plant from cultured cells. *Z.P.F. Lauzen Physiol.*, 97: 13-17.
- Nedjah I, 2015. Changements physiologiques chez des plantes (Blé dur *Triticum durum* Desf.) exposées à une pollution par un métal lourd (plomb).Thèse de doctorat : Département de biologie. Université Badji Mokhtar d'Annaba, 144 p.

- Neill S, Desikan R, Hancock J, 2002. Hydrogen peroxide signalling. *Curr Opin Plant Biol.*, 5, 388-395.
- Opfergelt S, 2008. Silicon cycle in the soil-plant system: biogeochemical tracing using Si isotopes. Thèse de doctorat. Université catholique de Louvain 311p.
- Parker M.L, Ng A, Waldron K.W, 2005. The phenolic acid and polysaccharide composition of cell walls of bran layers of mature wheat (*Triticum aestivum* L. cv. Avalon) grains. *Journal of the Science of Food and Agriculture* ; 85, 2539–2547.
- Pamplona R., Portero-Otín M., Riba D., Requena J. R., Thorpe S. R., López-Rentel M et Knight M.R, 2004. Oxidative stress-induced calcium signaling in Arabidopsis. *Plant Physiol.* 135 : 1471-1479. Rentel MC, Knight MR. 2004. Oxidative stress-induced calcium signaling in review. *LWT.* 40:1-11.
- Rabie G. H., Almadini A. M. (2005). Role of bioinoculants in development of salt-tolerance of *Vicia faba* plants under salinity stress. *Afr. J. Biotechnol.* 4: 210–222.
- Rizwan M, Ali *et al.*, 2015. Mecanisms of silicon- mediated alleviation of drought and salt stress in pplants a review. *Environ. Sci- pollut. Res. Int.* 2215416-15431. [10. 1007/ s11356-015-5305-x].
- Romero Aranda R, Soria T, Cuartero J, 2001. Tomato plant-water uptake and plant-water relationship under saline growth conditions. *Plant Sciences.* 160, 265-272 p.
- Rubio F, Gassmann W, Schröder J.I, 1995. Sodium driven potassium uptake by the plant potassium transporter HKT1 and mutations conferring salt tolerance. *Science* 270: 1660-1663.
- Schulze E.D *et al.*, 2005. *Plant ecology.* Edition Springer Berlin, Heidelberg,p 692.
- Sellami W, 2016. Effet du silicium sur la croissance et le rendement de blé tendre. Mémoire : Biotechnologie et Valorisation des Phyto-Ressources. Université Sidi Mohamed Ben Abdellah_Maroc (Fès), 43 p.
- Servant J.M, 1976. Sur quelques aspects de la pédogénèse en milieu halomorphe : l'exemple des sols salés de la région méditerranéenne Française. *Ann. de l'INRA.* Vol. VI. n° 1, pp : 225-245.
- Song A., Li P., Li Z., Fan F., Nikolic M and Liang Y, 2011. The alleviation of zinc toxicity by silicon-related to zinc transport and antioxidative reactions in rice. *Plant and Soil*, 344, 319-333.
- Sun F *et al.*, 2007. Salt Modulates Gravity Signaling Pathway to Regulate Growth Direction of Primary Roots in Arabidopsis. *Plant Physiol* , pp178-188.

- Surget A, Barron C, 2005. Histologie du grain de blé, Industrie des cereals, 145p.
- Tanji K.K, 1990. Nature and extent of agricultural salinity. In: Tanji KK (ed) Agricultural salinity assessment and management. American Society of Civil Engineers, New York, pp 1–17.
- Taulavuori K, Sarala M, Taulavuori E, 2001. Growth responses of trees to arctic light environment. Progress in Botany, 71, 157-168.
- Tester M, Davenport R.J, 2003. Na⁺ transport and Na⁺ tolerance in higher plants. Ann Bot (Lond), 91: 503 - 527.
- Timbrell J, 2009. Principles of Biochemical Toxicology, 4th ed. Informa Healthcare USA, Inc. New York.
- Tripathi D.K, Singh V.P, Kumar D, Chauhan D.K, 2012. Rice seedlings under cadmium stress : effect of silicon on growth, cadmium uptake, oxidative stress, antioxidant capacity and root and leaf structures. Chem. Ecol., 28, 281–291.
- Tripathi P, Tripathi R.D, Singh R.P, Dwivedi S, Goutam D, Shri M, Chakrabarty D, 2013. Silicon mediates arsenic tolerance in rice (*Oryza sativa* L.) through lowering of arsenic uptake and improved antioxidant defence system. Ecol. Eng. 52, 96–103.
- Velikova V, Yordanov I, Edreva A, 2000. Oxidative stress and some antioxidant systems in acidrain-treated bean plants-protective role of exogenous polyamines. Plant. Sci, 151, 59-66 pp.
- Wahsha M, Al-Jassabi S, Azirun M, Abdul-Aziz K., 2010. Biochemical Screening of Hesperidin and Naringin Against Liver Damage in Balb/c Mice Exposed to Microcystin-LR. Middle East. Journal of Scientific Research, 6 (4), 354-359.
- Wasti Chakroun S, 2016. Amélioration de la tolérance à la salinité de la tomate par l'application de différentes méthodes physiologiques : Acide salicylique et Silicium. Thèse de Doctorat, Sciences Biologiques, FST.
- Xu C.X, Ma Y.P, Liu Y.L, 2015. Effects of silicon (Si) on growth, quality and ionic homeostasis of aloe under salt stress. S. Afr. J. Bot. 98, 26e36.
- Yadav S.K, 2010. Cold stress tolerance mechanisms in plants. Agron. Sustain. Dev. 30, 515–527. doi:10.1051/agro/2009050.
- Zeng FR., Zhao FS., Qiu BY., Ouyang YN., Wu FB and Zhang GP, 2011. Alleviation of chromium toxicity by silicon addition in rice plants. Agr. Sci. China, 10, 1188– 1196.

- Zhu, Z., Wei, G., Li, J., Qian, Q., Yu, J., 2004. Silicon alleviates salt stress and increases antioxidant enzymes activity in leaves of salt-stressed cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Plant Sci.* 167, 527–533.
- Zuccarini P, 2008. Effects of silicon on photosynthesis, water relations and nutrient uptake of *Phaseolus vulgaris* L. under NaCl stress. *Biol Plantarum*, 157-160p.

- **Webographie :**

Site web 1 : europepmc.org/article/med/31787997.