



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

جامعة العربي التبسي - تبسة -

UNIVERSITE LARBI TEBESSI -TEBESSA-

Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie
Département de Biologie Appliquée

Mémoire

Présenté En vue de l'Obtention du Diplôme de Master en Biologie Appliquée
Spécialité: Analyses Toxicologiques et Biochimiques

Intitulé

Etude de l'Effet d'Atténuation du Stress Salin par Application du Silicium sur un Modèle Biologique Alternatif : le blé

Présenté par : Melle CHAFFAI GHANIA

Soutenu le : 27/05/2017.

Devant le jury :

Dr. AMAMRA Rima	MAB	Université de Tébessa	Présidente
Dr. ALAYAT Amel	MCB	Université de Tébessa	Promotrice
Mme. BOUADILA Soulef	MAA	Université de Tébessa	Examinatrice

Promotion : 2016 / 2017.



Université Larbi Tébessi - Tébessa



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Larbi Tébessi - Tébessa
Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie

Déclaration sur l'honneur de non-plagiat

(à joindre obligatoirement au mémoire, remplie et signée)

Je soussigné(e),

Nom, Prénom : CHAFFAI GHANIA

Régulièrement inscrit(e) en Master au département :

N° de carte d'étudiant : 2012/4077981

Année universitaire : 2016/2017

Domaine : Biologie Appliquée

Filière : Toxicologie Appliquée

Spécialité : Analyses Toxicologiques et Biochimiques

Intitulé du mémoire : Etude de l'Effet d'Atténuation du Stress Salin par Application du Silicium sur un Modèle Biologique Alternatif : le blé.

Atteste que mon mémoire est un travail original et que toutes les sources utilisées ont été indiquées dans leur totalité. Je certifie également que je n'ai ni recopié ni utilisé des idées ou des formulations tirées d'un ouvrage, article ou mémoire, en version imprimée ou électronique, sans mentionner précisément leur origine et que les citations intégrales sont signalées entre guillemets

Sanctions en cas de plagiat prouvé :

L'étudiant sera convoqué devant le conseil de discipline, les sanctions prévues selon la gravité du plagiat sont :

- L'annulation du mémoire avec possibilité de le refaire sur un sujet différent ;
- L'exclusion d'une année du master ;
- L'exclusion définitive.

Fait à Tébessa, le : 07/06/2017

Signature de l'étudiant(e) :



REMERCIEMENTS

Avant tout, je remercie « Dieu » pour l'aide qu'il m'a apporté durant la réalisation de ce travail.

*Je tiens à exprimer mon plus grand respect et mes vifs remerciements à ma promotrice de mémoire Madame le **Docteur. ALAYAT AMEL**, Maitre de conférences –B– à l'université de Tébessa, d'avoir bien assuré la direction et l'encadrement de mes travaux de mémoire. Million mille Merci pour sa rigueur scientifique, pour sa gentillesse, sa patience, la disponibilité constante qu'elle a manifesté, le soutien qu'elle m'a apporté, la confiance qu'elle m'a témoigné, et pour ses précieux conseils, pour son soutien moral et scientifique durant les moments les plus difficiles, afin de mener à terme mon mémoire. J'ai beaucoup apprécié de travailler à ses côtés tant sur le plan scientifique que sur le plan humain.*

*Mes profonds remerciements à tous les membres de cet honorable jury qui ont bien eu l'amabilité de siéger à cette soutenance et ont accepté de poser sur le présent travail leur clairvoyant regard d'évaluateur ; Madame le **Docteur AMAMRA Rima** de m'avoir fait l'honneur de présider ce jury.*

*Je remercie également Madame **BOUADILA Soulef** d'avoir accepté de faire partie du jury de ce mémoire. Je lui en suis très reconnaissante et lui exprime toute ma gratitude.*

Ma reconnaissance s'adresse aussi à l'Office Algérien Interprofessionnel Des Céréales, pour l'accueil bienveillant au sein de la direction, Pour tous les services qu'on m'a rendu, et pour leurs orientations, et leurs précieux conseils.





Mes vifs remerciements sont adressés à tous les enseignants de la faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie de l'Université L'ARBI TEBESSI-TEBESSA, pour toutes les connaissances acquises pendant toutes les années de formation, pour leur encouragement, pour leur soutien, surtout Madame BOUADILA SOULEF, Madame BENAMARA AMEL, et Monsieur FATMI HINDEL. Aussi à la Direction de la Faculté surtout Madame le Docteur BOUSSEKINE SAMIRA Chef de département de Biologie Appliquée.

Je remercie les techniciens des laboratoires, Karima, Nerdjess et Hamdi, qui m'ont fourni le matériel indispensable et de m'avoir assisté tout au long de mon travail. Merci pour l'aide précieuse ainsi que la gentillesse, la sympathie dont vous avez fait preuve à mon égard.

Mes sincères remerciements et reconnaissances pour mes très chers parents.

Pour m'avoir permis de faire des études, vous avez une grande part dans ma réussite

Pour m'avoir toujours soutenu durant toutes ces années

Pour vos encouragements

Tout simplement Merci pour tout ce que vous faites pour nous

Je remercie chaleureusement mes frères pour leurs encouragements, leurs soutiens et leurs intérêts pour mon travail.

Enfin, j'adresse avec toute sincérité mes remerciements et ma gratitude à toute personne ayant pu contribuer à la réalisation de ce travail.



ملخص

تُعدّ الملوحة نظاماً لا حيويّاً شائعاً على مستوى الكوكب. إذ تُمثّل وبشدةٍ مُضاداً لنموّ المحاصيل الزراعيّة، ولا سيما في المناطق القاحلة وشبه القاحلة.

والحقيقة التي لا يُمكن إنكارها، أنّ الإجهاد الملحي مُؤثّر سلبيّ، كونه يمنع نمو وتطوّر النباتات عامّةً وزراعة الحبوب على وجهٍ خاص، وبذلك تكون النتيجة فساد إنتاجيّة المحصول. وللتقليل من الآثار السلبيةّ التي يُخلّفها الإجهاد الملحي على المحاصيل الزراعيّة، توصلنا من خلال هذه الدّراسة -تخفيف الإجهاد الملحي بتطبيق السيليكون على نبات القمح- أنّ السيليكون بإمكانه التقليل من الضرر التأكسدي للنبات وتحسين مُموّه، كونه يتميّز بدوره الوقائي خاصّةً عند النباتات الكفاء في الامتصاص.

وبناءً على ما توصلنا إليه من نتائج في دراستنا، نستخلص ما يأتي ذكره:

- أنّ إضافة السيليكون على نبات القمح يُسهم في زيادة نسبة الإنتاج، وأيضاً القيم المتعلقة بنفوذية الماء، أيضاً لاحظنا انخفاضاً في إنتاج المانونديالدهيد (MDA)، ونقصاً في تصنيع بيروكسيد الهيدروجين (H_2O_2). ومن ثمّة فالسيليكون بمثابة التّهج الواعد إذ يُسهم في حماية النباتات من التأثيرات السلبيةّ لكلورور الصّوديوم، هذا إضافةً إلى مساهمته في تجديد النّمو.

كلمات مفتاحية: سيليكون، قمح صلب، أنواع الأكسجين التفاعليّة، الإجهاد التأكسدي، نمو، نفوذية غشائيّة، محصول.

Résumé

La salinité figure parmi les contraintes abiotiques les plus répandues au niveau de la planète et qui limitent fortement les rendements agricoles, notamment dans les régions arides et semi-arides. En effet, le stress salin affecte la croissance et le développement des plantes et notamment celles des cultures des céréales en altérant leur productivité et leur rendement.

Pour remédier à ces conditions de stress, et limiter ou réduire les effets délétères du stress salin sur les végétaux, différents moyens ont été évalués. Le silicium pourrait figurer parmi les moyens d'atténuation du stress oxydant. Le silicium est reconnu pour son effet prophylactique chez les plantes capables de l'absorber en réduisant les dommages causés par les stress abiotiques.

Ainsi, les résultats présentés dans cette étude mettent la lumière sur les effets d'atténuation du stress salin chez le blé par application du silicium. En effet, l'apport du silicium se traduit par un effet bénéfique sur la croissance des plantes de blé, ceci étant associé à une augmentation du taux de germination et de la teneur relative en eau.

D'un autre côté, nous avons constaté une diminution du taux de fuite des électrolytes, une baisse de la production de l'MDA, ainsi qu'une réduction de la synthèse du peroxyde d'hydrogène (H_2O_2). L'apport du silicium dans les traitements des plantes exposées au stress salin réduit considérablement les effets néfastes de stress, ceci se traduit par la réparation partielle ou régénération de la croissance perturbée par le chlorure de sodium.

Mots clés: Silicium, Blé dur, Espèces réactives de l'oxygène, Stress oxydant, Croissance, perméabilité membranaire, Rendement.

Abstract

Salinity appears among the abiotic constraints most widespread in the level of planet and which strongly limit the agricultural outputs, in particular in the arid areas and of semi-arid. Indeed, the saline stress affects the growth and the development of the plants and in particular those of the cultures of cereals by deteriorating their productivity and their output. To cure these conditions of stress, like limit in grand reducing the noxious effects of the saline stress on the plants, different averages were evaluated. Silicon could appear among the means of attenuation of the oxidizing stress. Silicon is recognized for its prophylactic effect at the plants able to absorb it by reducing the damage caused by the abiotic stress.

Thus, the results presented in this study clarify the effects of attenuation of the stress at wheat plants by application of silicon contribution results in a beneficial effect on the growth of the plants of wheat, this be associated with an increase in the rate of germination and relative content water.

On another side, we noted a reduction in the leakage rate of the electrolytes, a fall of the production of MDA, as well as a reduction of the synthesis of hydrogen peroxide (H_2O_2). The contribution of silicon in the treatments of the plants exposed to the saline stress reduced considerably the harmful effects of the saline stress and this result in repair partial or regeneration of the growth disturbed by sodium chloride.

Keywords: Silicon, durum wheat, reactive Species of oxygen, oxidizing stress, Growth, membrane permeability, Output.

Liste d'Acronymes

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

ITGC : Institut Technique des Grandes Cultures

OAIC : Office Algérien Interprofessionnel Des Céréales

Liste des abréviations

°C : Degré Celsius

ANOVA : Analyses de variances

AOX : Alternative oxydase

Ca²⁺ : Ion de calcium

CaCl₂ : Chlorure de calcium

CaCO₃ : Carbonate de calcium

CaSO₄ : Sulfate de calcium

Cl⁻ : Ion de chlore

Cm : Centimètre

CO₂ : Dioxyde de Carbone

EC : Conductivité électrique

g : Gramme

g : Tours

H₂O₂ : Peroxyde d'hydrogène

H₄SiO₄ ou Si (OH)₄ : Acide silicique monomérique ou Acide ortho-silicique

K⁺ : Ion de potassium

LMF : Longueur moyenne des feuilles

LMR : Longueur moyenne des racines

MDA : Malondialdéhyde

MgCl₂ : Chlorure de magnésium

mgCO₃ : Carbonate de magnésium

MgSO₄ : Sulfate de magnésium

min : Minutes

ml : Millilitre

mm : Millimètre

mM : Milli-molaire

Na⁺ : Ion de sodium

Na HCO₃ : Bicarbonate de sodium

Na₂CO₃ : Carbonate de sodium

NaSO₄ : Sulfate de sodium

NGG : Nombre des graines germées

nm : Nanomètre

NMR : Nombre moyen de racines

NTG : Nombre total des graines incubées

O₂ : Oxygène moléculaire

PF : Poids frais

PMG : Poids de mille grains

PS : Poids sec

R : Répétition

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

Si : Silicium

SiO₂ : Silice

SOD : Super-oxyde Dismutase

T : Témoin

TBA : Acide 2- thiobarbiturique

TCA : Acide trichloracétique

TRE : Teneur relative en eau

UV : Ultra-violet

G (%): Taux de germination ou Pourcentage de germination

NaCl : Chlorure de sodium

Liste des figures

N°	Titre	Page
01	Cycle végétal du blé	04
02	Coupe longitudinale d'un grain de blé	05
03	Effets toxiques du NaCl sur la plante	09
04	Equilibre entre les ROS et le système antioxydant	10
05	Schéma des Mécanismes d'atténuation de la sécheresse et le stress salin chez les plantes au moyen de contribution de silicium	13
06	blé dur; variété VITRON	15
07	Schéma du dispositif expérimental	18
08	Dispositif expérimental de l'essai (germination)	20
09	Spectrophotomètre (UV mini 1240)	23
10	Effet du silicium sur le taux de germination des graines de blé dur soumises ou non au stress du chlorure de sodium	24
11	Effet du silicium sur le nombre moyen des racines des plantes de blé dur soumises ou non au stress du chlorure de sodium	25
12	Effet du silicium sur l'élongation racinaire des plantes de blé dur soumises ou non au stress du chlorure de sodium	26
13	Effet du silicium sur l'élongation foliaire des plantes de blé dur soumises ou non au stress du chlorure de sodium	27
14	Effet du silicium sur la teneur relative en eau des plantes de blé dur soumises ou non au stress du chlorure de sodium	28
15	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.	29
16	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.	30
17	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.	31

Liste des Tableaux

N°	Titre	Page
01	Caractéristiques agronomiques de la variété du blé dur «VITRON»	16
02	Composition des traitements	19
03	Composition de la solution nutritive utilisée dans la culture hydroponique	20

Liste des abréviations

Liste des Figures

Liste des Tableaux

Introduction 01

Chapitre I – Synthèse bibliographique.....03

I. Blé dur «*Triticum durum* Desf».....03

I. 1. Généralités et historique.....03

I. 2. Importance économique et production en Algérie..... 03

I. 3. Classification botanique du blé dur.....03

I. 4. Caractéristiques morphologiques et cycle végétal du blé dur.....03

II. Stress salin.....06

II. 1. Les stress abiotiques et biotiques.....06

II. 2. Définition de la salinité 06

II. 3. Principaux sels solubles.....07

II. 4. Répartition des sols salés dans le monde et en Algérie.....07

II. 5. Causes et origines de la salinisation des sols.....07

II. 6. Salinisation des sols dans les régions arides et semi-arides.....08

II. 7. Les plantes et le stress salin08

a) Stress osmotique.....09

b) Stress ionique.....09

c) Stress nutritionnel.....09

d) Stress oxydatif.....10

III. Le silicium (silice) Moyen de lutte contre le stress oxydatif.....11

III. 1. Le silicium dans le sol.....11

III. 2. Teneurs du silicium chez les plantes.....12

III. 3. Rôles de silicium (Atténuation et réduction des stress).....12

Objectifs.....14

<u>Chapitre II</u> - Matériels et méthodes.....	15
I. Matériel et méthodes.....	15
I. 1. Matériel végétal et conditions de culture.....	15
I. 1.1. Conduite de l'essai et traitements	17
II. 2. Méthodes.....	19
II. 2. 1. Méthodes de l'essai et de traitement.....	19
II. 2. 1. 1. Récolte des plantes.....	20
II. 3. Méthodes d'analyses et paramètres mesurés.....	21
II. 3. 1. Paramètres de croissance (morpho-métriques).....	21
II. 3. 1. 1. Taux de germination.....	21
II. 3. 1. 2. Nombre moyen de racines (NMR)	21
II. 3. 1. 3. Longueur moyenne des racines (LMR).....	21
II. 3. 1. 4. Longueur moyenne des feuilles (LMF).....	22
II. 3. 2. Analyse de la perméabilité membranaire	22
II. 3. 2. 1. La teneur relative en eau (TRE).....	22
II. 3. 2. 2. Taux de fuite des électrolytes.....	22
II. 2. 2. 3. Détermination des concentrations du Malondialdéhyde (MDA).....	22
II. 2. 2. 4. Détermination des concentrations du peroxyde d'hydrogène (H ₂ O ₂)... ..	23
II. 3.3. Analyse statistique.....	23
<u>Chapitre III</u> – Résultats et Discussion.....	24
III. 1. Résultats.....	24
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.....	24
III. 1. 2. Influence du silicium sur le nombre moyen des racines des plantes de blé dur soumises ou non au stress du chlorure de sodium.....	25
III. 1. 3. Influence du silicium sur l'élongation racinaire des plantes de blé dur soumises ou non au stress du chlorure de sodium.....	26

III. 1. 4. Influence du silicium sur l'élargissement foliaire des plantes de blé dur soumises ou non au stress du chlorure de sodium.....	27
III. 1. 5. Influence du silicium sur la teneur relative en eau des plantes de blé dur soumises ou non au stress du chlorure de sodium.....	28
III. 1. 6. 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.....	29
III. 1. 7. 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.....	30
III. 1. 8. Influence du silicium sur la production 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.....	31
III. 2. Discussion.....	32
<u>Chapitre IV</u> – Conclusion et Perspectives.....	37
Références bibliographiques.....	39

Introduction

En Algérie, le blé dur (*Triticum durum* Desf.) a acquis au cours des siècles une véritable valeur symbolique, du fait de son importance dans l'agriculture et l'alimentation humaine. Son grain constitue un produit de base dans l'alimentation des algériens (couscous, pain...), il est considéré aussi comme une très grande ressource de protéines et d'hydrate de carbone. Il renferme également des acides aminés, des lipides et des vitamines. En outre, ses sous produits (paille) servent d'aliments pour le bétail (**Godon, 1985 et Bajji, 1999**).

Actuellement, l'Algérie achète plus de 5% de la production céréalière mondiale, cette situation risque de se prolonger à plusieurs années, faute de rendements insuffisants et des besoins de consommation sans cesse croissants devant une forte évolution démographique (**Chellali, 2007**).

Cette faiblesse de la production de blé en Algérie était toujours liée aux effets des stress environnementaux, notamment, le stress salin qui se fait ressentir de manière très importante depuis la dernière décennie. Dans certaines régions, et en Algérie, les cultures agricoles sont limitées par l'accumulation de sels dans les sols. Ces quantités excessives de sels, le plus souvent de chlorure de sodium (NaCl), auront des effets néfastes sur la croissance et la productivité des plantes (**Reynolds et al., 2005 ; Zilli et al., 2008 ; Sobhanian et al., 2010**).

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; Abdely et al., 2008; Munns et Tester, 2008**). 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. Ainsi, chaque année, près de 10 millions d'hectares de terres cultivables sont perdues dans le monde du fait de l'accumulation, au cours du temps, de petites quantités de sels contenues dans l'eau d'irrigation (**Bartels et Nelson, 1994; Rubio et al., 1995**).

Le stress salin modifie les traits morphologiques, physiologiques et biochimiques des plantes. (**Gómez-Cadenas et al., 1996; Gómez-Cadenas et al., 1998**). Et génère la bioaccumulation dans les tissus cellulaires des composés toxiques tels que les espèces réactives d'oxygène (ROS). Les ROS représentent les peroxydes, superoxydes et les radicaux

hydroxyyles (**Shen et al., 1997; Tsugane et al.,1999**). Ces molécules toxiques endommagent les membranes cellulaires, les enzymes et l'ADN mitochondrial et chloroplastique, perturbant la croissance voir la survie de la plante (**Allen, 1995; Munns et al., 2006**).

En effet, pour résoudre le problème de la salinité et afin de limiter les effets délétères du NaCl sur les plantes, certaines méthodes sont appliquées telles que le drainage et l'utilisation de l'eau d'irrigation mais elles sont assez difficiles et coûteuses ce qui limite leur utilisation.

Pour remédier à ces conditions de stress, ainsi que de limiter et réduire les effets nocifs de la salinité sur les végétaux, différents moyens ont été évalués. Le silicium (Silice) figure parmi ces moyens de lutte contre le stress. Il a été trouvé que le silicium peut servir comme un élément bénéfique pour la croissance et le développement des plantes (**Epstein, 2000**). Le silicium est un composant essentiel pour les plantes des céréales et son accumulation est utile dans le maintien de leur production durable (**Yamaji et al., 2011**). Au cours des dernières années, des études ont révélé la capacité du silicium à atténuer les différents stress biotiques (maladies des plantes) et abiotiques des plantes cultivées (**Lee et al., 2012**).

Au cours de ce travail, nous avons choisi d'étudier, dans un premier temps, les effets de sel (chlorure de sodium) sur les plantes de blé très appréciées et consommées en Algérie : le blé dur. Ainsi, notre premier objectif était de mieux comprendre les réponses des plantes de blé dur aux stress causés par la présence du chlorure de sodium, pour cela plusieurs points ont été analysés :

- L'impact du chlorure de sodium sur la croissance et le développement des plantes de blé étudié.

- 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 nous sommes intéressés à un cas particulier et peu étudié qui est l'atténuation du stress salin. De ce fait, nous avons tenté d'appliquer aux cultures des plantes de blé soumises au stress salin, le silicium, comme un moyen de remédiation et de lutte contre le stress oxydatif engendré par le chlorure de sodium. Ainsi, notre objectif a été d'évaluer l'effet du silicium sur quelques marqueurs du stress oxydant, et sur l'amélioration de la croissance des plantes de blé exposés au stress salin.

I. Blé dur

I. 1. Généralités et historique

Historiquement, le blé est l'une des premières céréales cultivées dans le monde. Au point de vue quantitatif, c'est la troisième céréale la plus cultivée avec environ 600 millions de tonnes par an (**Clerget, 2011**).

Le terme blé vient probablement du gaulois blato (à l'origine du vieux français blaie, blée, blaiier, blaver, d'où le verbe emblaver, qui signifie ensemercer en blé) et désigne les grains qui broyés, fournissent 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 (*Secale* céréale), le blé noir (sarrasin) (**Yves et de Buyer, 2000**).

I. 2. Importance économique et production en Algérie

Actuellement, l'Algérie est un grand importateur de blé et se trouve dépendante du marché international. Les quantités de blés (tendre ou dur) importées ont atteint 3.004 millions de tonnes, contre une production céréalière qui avait atteint 49,1 millions de quintaux au cours de la saison de 2012/2013 au niveau national. Cette situation risque de se prolonger à plusieurs années, faute de rendements insuffisants et des besoins de consommation sans cesse croissants devant une forte évolution démographique (**Nadjem, 2012**).

I. 3. 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 tribu des Triticées et du genre *Triticum*. 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**).

I. 4. Caractéristiques morphologiques et cycle végétal du blé dur

Il s'agit d'une graminée annuelle de hauteur moyenne et dont le limbe des feuilles est aplati. L'inflorescence en épi terminal se compose de fleurs parfaites (**Soltner, 1998**). Le système racinaire comprend des racines séminales produites par la plantule durant la levée, ainsi que des racines adventives qui se forment plus tard à partir des nœuds à la base de la

plante et constituent le système racinaire permanent.

Le blé dur possède une tige cylindrique, dressée, habituellement creuse et subdivisée en entrenœuds. Certaines variétés possèdent toutefois des tiges pleines. Le chaume (talles) se forme à partir de bourgeons axillaires aux nœuds à la base de la tige principale (**Bozzini, 1988**). Le nombre de brins dépend de la variété, des conditions de croissance et de la densité de plantation (**Clark et al., 2002**). Comme pour d'autres graminées, les feuilles de blé dur se composent d'une base (gaine) entourant la tige, d'une partie terminale qui s'aligne avec les nervures parallèles et d'une extrémité pointue. Au point d'attache de la gaine de la feuille se trouve une membrane mince et transparente (ligule) comportant deux petits appendices latéraux (oreillettes) (**Figure 01**) (**Bozzini, 1988; Ait Kaki, 1993; Meksem, 2007; Issaad, 2013**).

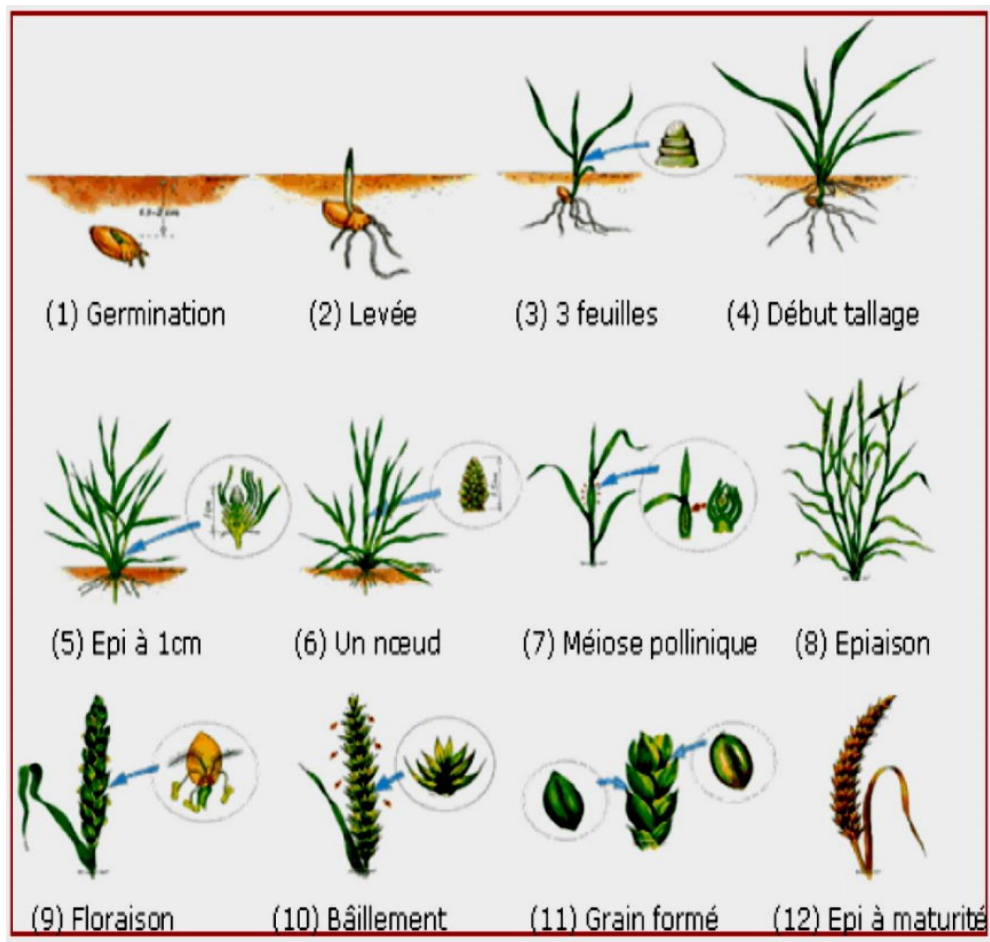


Figure 01: Cycle végétal du blé (**Fritas, 2012**).

Le grain de blé comporte trois parties distinctes (**Figure 02**):

- **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. 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**).

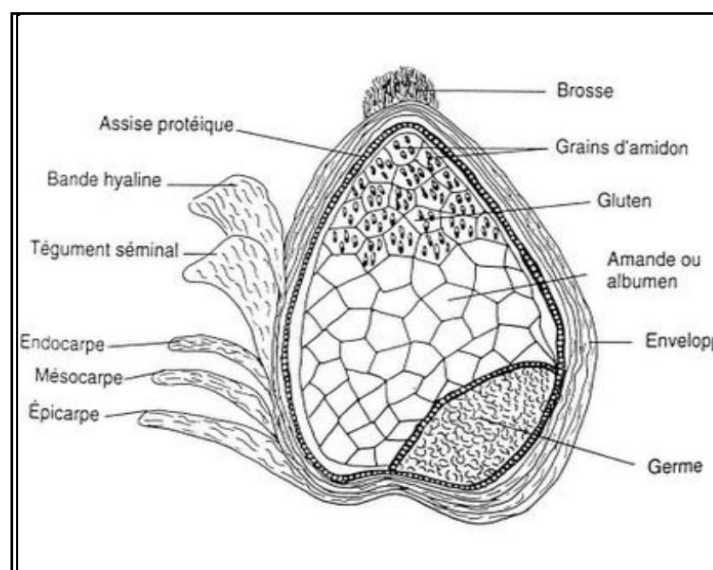


Figure 02: Coupe longitudinale d'un grain de blé (**Surget et Barron, 2005**).

II. Le stress salin

II. 1. Les stress abiotiques et biotiques

Les organismes sont généralement soumis à deux types de stress : les stress biotiques (dus à une agression par autres organismes) et les stress abiotiques (qui sont dus principalement à des facteurs environnementaux), cette contrainte abiotique susceptible de déclencher des modifications chimiques ou physiques dommageables (Zhu, 2002 ; Vincent, 2006).

Hopkins (2003), a défini le stress comme un ensemble de conditions qui provoquent des changements des processus physiologique, résultant éventuellement en dégâts, dommages blessures, inhibition de la croissance ou de développement.

Le stress perturbe les structures normales et la coordination des processus variés au niveau moléculaire, cellulaire, et de l'organisme entier. Le retour à la stabilisation et les réactions de répartition, et le maintien de grands pouvoirs de résistance font tous appel à une énergie additionnelle et métabolite (Larcher, 2001).

II. 2. Définition de la salinité

La salinité peut être définie comme étant la quantité globale des sels contenus dans « la solutions du sol » (Imalet, 1979). 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 (Schulze *et al.*, 2005; Khales et Baaziz, 2006). 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).

II. 3. Principaux sels solubles

Les principaux sels solubles qui participent dans la formation des sols salés sont :

- a) **Les carbonates** : les plus rencontrés sont le carbonate de sodium (Na_2CO_3), bicarbonate de sodium (Na HCO_3), carbonate de calcium (CaCO_3) et le carbonate de magnésium (mgCO_3).
- b) **Les sulfates** : ce sont les sels de l'acide sulfurique et les plus fréquents sont: le sulfate de magnésium (MgSO_4), sulfate de sodium (NaSO_4) et le sulfate de calcium (Ca SO_4).
- c) **Les chlorures** : principalement : le chlorure de sodium (NaCl), plus soluble et forte toxicité. La présence de sels solubles en quantité importante ou d'un horizon sodique à structure dégradée, caractères qui ont une influence néfaste sur le développement de la végétation ou des cultures (**Aubert, 1982**).

II. 4. Répartition des sols salés dans le monde et en Algérie

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 (**Durand, 1983**). L'Afrique présente de vastes régions affectées par les sels (notamment les zones arides et à proximité des 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.

II. 5. Causes et origines de la salinisation des sols

Bien que l'altération des roches et les minéraux primaires soient la principale source de tous les sels, les sols salés sont rarement formés par accumulation de sels in situ. Plusieurs causes sont à l'origine de ce phénomène (**Maillard, 2001**)

- La salinité primaire résulte de l'accumulation des sels dans le sol à travers un long processus naturel de dégradation des roches salines et des apports éoliens des sels des mers et océans (**Munns et al., 2006**).
- La salinité secondaire est d'origine anthropique, résultant des activités humaines, notamment l'irrigation avec des eaux chargées de sels (**Munns et al., 2006**).

II. 6. Salinisation des sols dans les régions arides et semi-arides

En zone aride, la salinité des sols est quasiment tout le temps liée à l'irrigation des terres cultivables. La salinisation peut s'expliquer entre autre par le fait que bien souvent en zone aride, les lieux d'implantation des périmètres irrigués se trouvent sur des zones où l'eau utilisée n'est pas de très bonne qualité (plus ou moins chargée en sels). De plus, la mise en valeur de ces terres (en particulier par des investisseurs privés ou lorsqu'il s'agit de micro hydraulique) ne s'accompagne bien souvent pas des mesures et études nécessaires à la prévention des risques de salinisation (**Maillard, 2001**). Deux causes seront plus particulièrement responsables de la salinisation des sols dans la région aride et semi-aride: l'utilisation d'eau chargée en sels pour l'irrigation et les remontés de nappe par déversement excessif d'eau sur les terres à irriguer (**Munns et al., 2006**).

II. 7. Les plantes et le stress salin

Le terme de stress salin s'applique surtout à un excès d'ions mais pas exclusivement aux ions Na^+ et Cl^- (**William, 2003**) (**Figure 03**). 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" (**Tremblin, 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 (**Levigneron et al., 1995**). Le stress salin, comme beaucoup d'autres stress abiotiques, inhibe la croissance des plantes. Les concentrations élevées de sels cause un déséquilibre des ions (**Zhu, 2001**).

L'étude des plantes placées dans ces conditions, appelée physiologie des stress, est un aspect important de l'écophysiologie végétale pour trois raisons. D'abord, les plantes répondent souvent aux stress en modifiant leur physiologie et leurs métabolismes normaux; ensuite, l'étude de la physiologie des stress contribue à la compréhension des facteurs qui limitent la répartition des végétaux; enfin, en agriculture, la capacité des cultures à résister aux stress est un facteur important de la détermination du rendement. (**Nebors, 2008**).

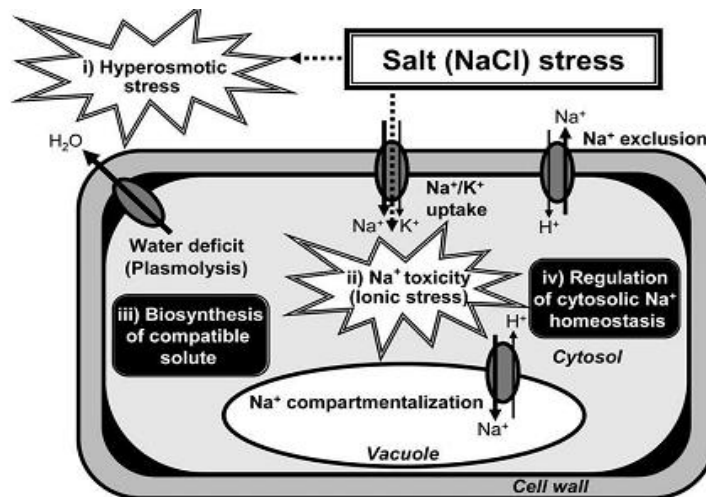


Figure 03 : Effets toxiques du NaCl sur la plante (Jabnoune, 2008)

a) Stress osmotique

L'entrée de l'eau dans les tissus du cortex racinaire est assurée par capillarité et osmose. Elle est donc d'autant plus aisée que la solution du sol est à une pression osmotique plus faible. Au fur et à mesure que la salinité du sol augmente, son potentiel osmotique diminue ce qui réduit la disponibilité de l'eau pour la plante (Mangel et Kirkby, 1982)

b) Stress ionique

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).

c) 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. Des concentrations salines trop fortes dans le milieu provoquent une altération de la nutrition minérale des plantes (Haouala *et al.*, 2007) L'accumulation des ions Na^+ dans la plante limite l'absorption des cations indispensables tels que K^+ et Ca^{2+} . Il y aurait une compétition entre Na^+ et Ca^{2+} pour les mêmes sites de fixation apoplasmique (Haouala *et al.*, 2007).

d) Stress oxydatif

Un stress oxydatif peut être induit par le stress biotiques (Grataoet *al.*, 2005) ou par des stress abiotique (cas d'un stress salin ou d'un stress hydrique) (Deng *et al.*, 2012). Il résulte d'un déséquilibre entre la production d'espèces réactives de l'oxygène (ROS) et les défenses antioxydantes. A faible concentration, les ROS interviennent comme des promoteurs de la croissance et de développement de la plante. A forte dose, ils causent la sénescence et la mort cellulaire (Joseph et Jini, 2011; Deng *et al.*, 2012). L'intensité du stress est déterminée par le taux des ROS se trouvant au niveau cellulaire (efficacité du système antioxydant). Il a été démontré que les balances entre la production et la détoxification des radicaux libres oxygénés dépendent du degré de tolérance des génotypes au stress abiotique (Liu et Zhang, 2004) (Figure 04).

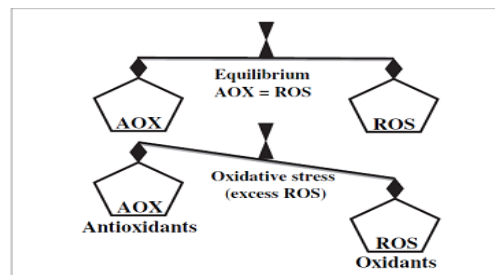


Figure (04) : Equilibre entre les ROS et le système antioxydant (Gill et Tuteja, 2010)

III. Le silicium (silice) Moyen de lutte contre le stress oxydatif

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 rendements pour l'industrie agroalimentaire. Afin de lutter contre les divers ennemis des cultures, l'homme a développé une panoplie de moyens de lutte chimique qui, bien que si efficaces, représentent un risque incontestable pour l'environnement et la santé humaine. Ainsi, il devient essentiel de développer des méthodes de lutte alternatives moins dommageables (Alayat, 2015).

A cet effet, le silicium (ou silice) pourrait s'avérer une avenue intéressante. 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 (Epstein, 1994 ; Epstein, 1999).

III. 1. Le silicium dans le sol

Le silicium (Si) est un métalloïde (élément minéral) très abondant dans l'environnement, le sol et les océans. Tout comme l'azote, le phosphore ou le potassium. Il est le second élément le plus abondant dans la croûte terrestre avec 27,5% du poids, le premier étant l'oxygène (Epstein, 1999; Řezanka et Sigler, 2008; Bouzoubaâ *et al.*, 2009; Broadley *et al.*, 2011).

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 Si 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 $Si(OH)_4$, très peu présent dans le sol. C'est l'élément peu ou pas connu par les agriculteurs, et très peu utilisé (Bouzoubaâ *et al.*, 2009). Le silicium sous sa forme la plus accessible qu'est ortho-silicique; la plus assimilable et donc la plus efficace chez les plantes (Bouzoubaâ *et al.*, 2004).

III. 2. Teneurs du silicium chez les plantes

Les plantes supérieures contiennent généralement entre 0,1 et 10 % de leur matière sèche sous forme de silice. Ces valeurs s'apparentent grandement à celles retrouvées pour plusieurs éléments essentiels tels que le calcium (0,1 à 0,6 %) et le soufre (0,1 à 1,5%) (**Epstein 1994; Epstein 1999**). Chez certaines espèces présentant les plus fortes teneurs en silice, les concentrations rencontrées dépassent même de beaucoup celles des macroéléments. Même aux plus faibles concentrations, soit environ 0,1 %, la teneur en silice dans les tissus végétaux est similaire aux plus faibles concentrations parfois observées pour des éléments aussi essentiels que le phosphore et le magnésium (**Epstein 1994; Epstein 1999**). La teneur en silice des tissus végétaux varie énormément d'une espèce à l'autre comparativement à celle des autres éléments. La variation peut également être importante entre les cultivars au sein d'une même espèce. Cette variation s'explique en partie par la plante elle-même, en raison de sa capacité intrinsèque à absorber la silice, mais également par l'environnement et la nature du sol dans lequel elle pousse (**Ma et al., 2001**).

III. 3. Rôles de silicium (Atténuation et réduction des stress)

Le silicium semble profiter à certaines plantes lorsqu'elles sont stressées. Il a été démontré que la présence du silicium est une nécessité biologique (**figure 05**) (**Epstein, 1994 ; Rizwanet al., 2015**). En effet, en absence de silicium les plantes ont généralement une structure plus faible que les plantes riches en silicium, appelées plantes bio-accumulatrices de silicium, mais aussi des anomalies en termes de croissance, de développement, de viabilité, de reproduction et sont plus sujettes au stress biotique et abiotique (**Epstein, 1999**).

L'alimentation en Si génère de nombreux effets bénéfiques sur la croissance des plantes, et permet une meilleure tolérance à plusieurs stress environnementaux. Dans tous les cas, il s'agit d'un effet prophylactique, c'est-à-dire que la plante doit avoir absorbé le Si avant d'être exposée au stress pour observer un effet bénéfique (**Bélanger et al., 1995**).

Malgré les effets positifs du silicium, cet élément n'est pas considéré par les physiologistes comme essentiel au cycle vital des plantes supérieures (**Epstein, 1999**).

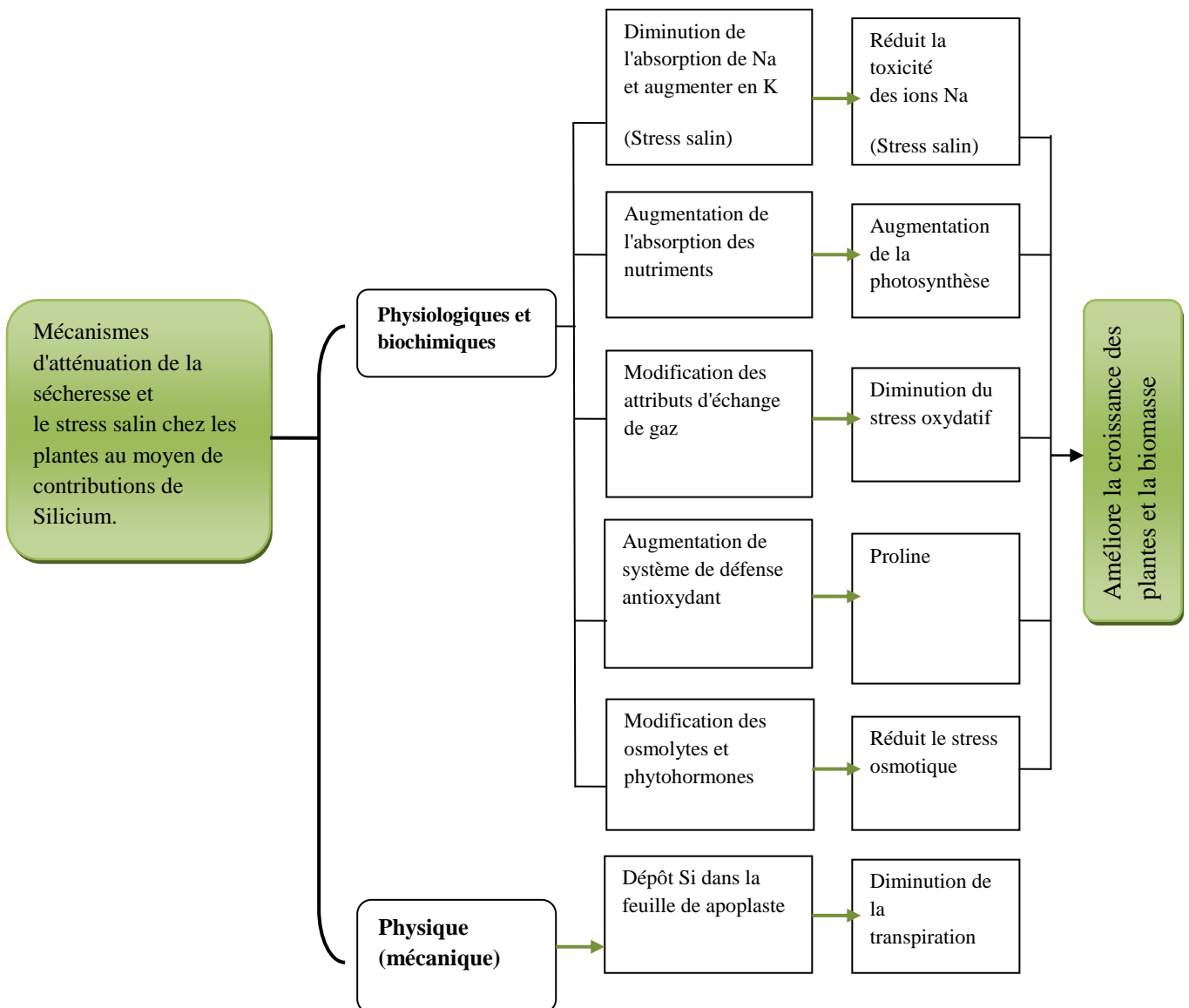


Figure 05 : Schéma des Mécanismes d'atténuation de la sécheresse et le stress salin chez les plantes au moyen de contributions de silicium (Rizwan et al., 2015).

Objectifs

En Algérie le blé dur constitue un aliment fondamental, culturellement et nutritionnellement. Toutefois, la culture du blé Algérien reste peu productive et très irrégulière du fait des contraintes qui affectent la quasi-totalité de l'agriculture. La salinité des sols par les sels figure parmi les contraintes que subit la culture du blé.

La présence de concentrations anormalement excessives de sels solubles dans les sols, tels que le chlorure de sodium (NaCl) est devenue un obstacle majeur pour la croissance et le développement des végétaux au cours de ces dernières années, en raison de leur réduction de la production végétale et agricole à l'échelle mondiale.

En effet, l'étude du stress salin et les moyens d'y remédier présente un intérêt majeur dans le contexte actuel de réduction la productivité agricole. Le stress salin affecte le développement et le rendement des cultures, et un des moyens d'y remédier est le silicium. Ce dernier est un élément minéral très abondant dans le sol et reconnu pour ses effets bénéfiques sur la croissance, le développement et la protection des plantes et des cultures contre les stress biotiques et abiotiques.

Dans ce contexte, la base de notre étude est d'évaluer l'impact de sel (chlorure de sodium) à générer un stress oxydatif chez les plantes de blé (Blé dur); et comment y remédier. C'est pourquoi l'objectif de notre étude s'est développé sur deux volets:

➤ Détermination de la toxicité du chlorure de sodium sur les plantes de blé (Blé dur). Ainsi, nous avons évalué les réponses et les mécanismes de résistance et de tolérance de blé soumises au stress salin. Pour cela, nous avons procédé à la mesure et au suivi des principaux bio-marqueurs de toxicité et de stress (peroxydation lipidique, et analyses de quelques espèces réactives de l'oxygène).

➤ Evaluation d'un moyen de lutte et d'atténuation du stress oxydatif causé par la présence du chlorure de sodium chez les plantes du blé. Pour réaliser cet objectif, nous nous sommes consacrés à la détermination de principaux mécanismes d'atténuation du stress salin par l'application du silicium aux cultures des plantes du blé.

I. 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 VITRON, ainsi que l'effet d'atténuation de la toxicité de la salinité par le silicium.

I. 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 VITRON (**Figure 06**).

Cette variété est une variété locale et plus répandue dans la wilaya de Tébessa. Elle a été fournie gracieusement par l'Office Algérien Interprofessionnel Des Céréales (OAIC) de Tébessa. 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 06 : blé dur; variété VITRON

Les principales caractéristiques de cette variété utilisée sont mentionnées dans le (**Tableau 01**). La collection du modèle biologique utilisé, intègre des variétés issues de sélection locales, réputées par leur haut rendement et résistance à divers contraintes.

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	<i>Triticum</i>
Espèce	<i>durum</i> Desf.



Tableau 01 : Caractéristiques agronomiques de la variété du blé dur «VITRON» (Kheddam, 2015).

Variété	VITRON
Origine	Variété de blé dur d'origine : Espagne
Demandeur	Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC)
Année d'inscription	1998
Caractéristiques agronomiques et culturales	Rendement élevé
Caractéristiques technologiques	- Poids de mille grains (PMG) : élevé - Qualité semoulière : Bonne - Mitadinage : Résistante - Teneur en protéines : 13.50%.
Résistance aux maladies	- Oïdium sur feuille : Résistante - Oïdium sur épi : Résistante - Rouille brune : sensible - Charbon : * - Fusariose : * - Septoriose : Moyennement sensible.
Type de développement	Hiver

* : Pas d'information

I. 1.1. Conduite de l'essai et traitements

Les essais ont été menés au cours de l'année universitaire 2016/ 2017 au niveau du laboratoire de Toxicologie Appliquée du département de Biologie Appliquée, de l'Université LARBI TEBESSI- TEBESSA.

Les graines de blé dur de la variété VITRON 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 ou sur du papier buvard. 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, 03 répétitions sont réalisées (**Figure 07**). Les plantes sont récoltées après 21 jours de traitement.

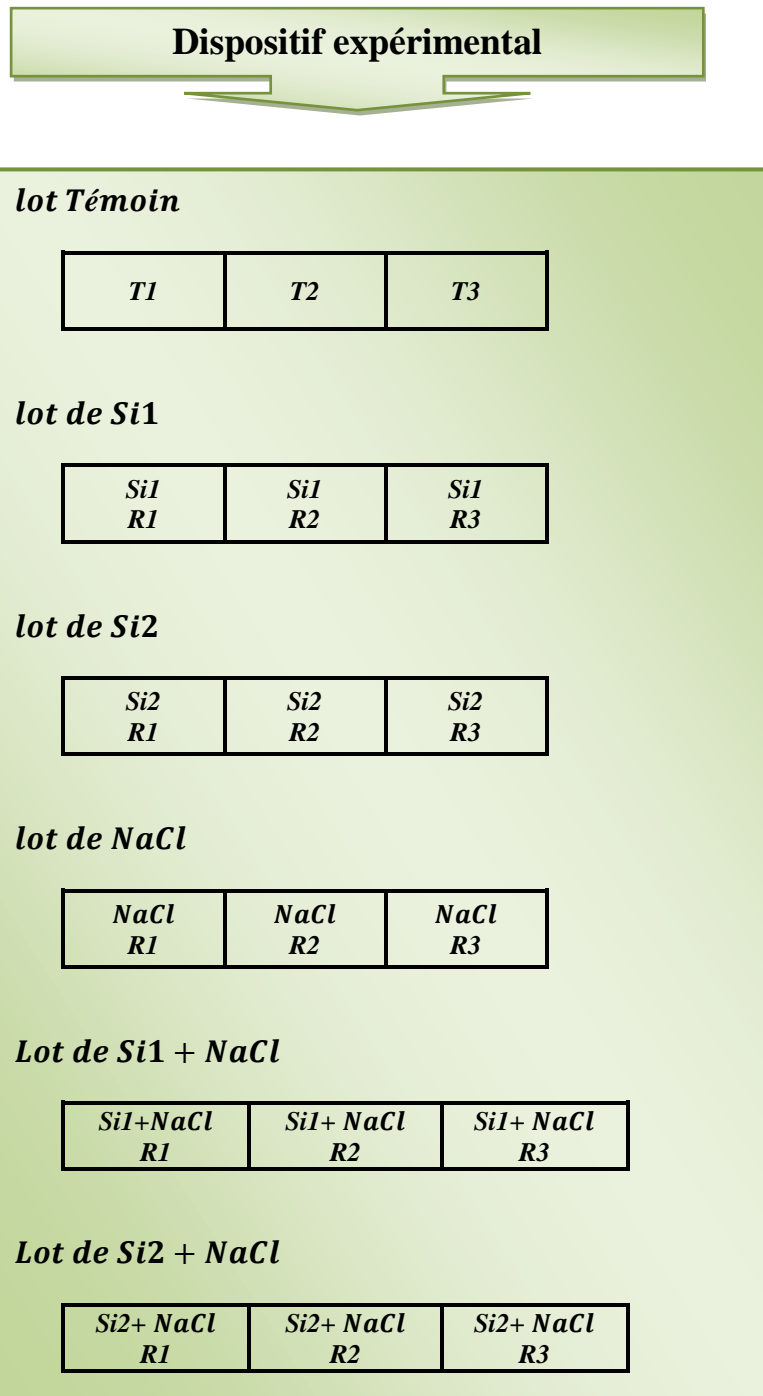


Figure 07 : Schéma du dispositif expérimental de l'essai

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

II. Méthodes

II. 1. Méthodes de l'essai et de traitement

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

➤ **Préparation des grains :** Avant de réaliser la germination des grains de blé dur «VITRON» 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 choisis avant leur utilisation (pas de cassures, ni de signes apparents de maladies).

➤ **Préparation des différentes solutions et traitements (Tableau 02 et 03)**

➤ **Arrosage des graines**

L'arrosage des échantillons par les différents traitements a été effectué normalement un jour sur deux pendant une durée de 21 jours. L'arrosage est effectué à raison de 10 ml de la solution appropriée pour chaque échantillon.

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 (**Tableau 03**) (**Ali et al., 2011**).

Tableau02: Composition des traitements

Traitements	composition
Témoin	Solution nutritive
1 mM Si	Solution nutritive + 1 mM Si
2 mM Si	Solution nutritive + 2 mM Si
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 03 : 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

II. 1. 1. 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 08**).



Figure 08: Dispositif expérimental de l'essai (germination).

II. 2. Méthodes d'analyses et paramètres mesurés :

Il est difficile de suivre le comportement d'une plante à partir d'un seul paramètre, En effet, le suivi du comportement des plantes vis-à-vis du stress salin a été basé sur plusieurs paramètres morphologiques et physiologiques.

Les méthodes énoncées dans cet essai sont :

II. 2. 1. Paramètres de croissance (morpho-métriques)

II. 2. 1. 1. Taux de germination

La germination est notée par comptage effectué toutes les 24 heures, jusqu'au 10^{ème} 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 radicule est égale ou supérieure à 2 mm est considérée comme normale (ISTA, 2003).

II. 2. 1. 2. Nombre moyen des racines (NMR)

Le nombre moyen des racines pour chaque dose est déterminé après 21 jours de traitement. Ce paramètre est obtenu en comptabilisant le nombre total de racines pour chaque traitement et en le divisant par le nombre total de grains (germés ou pas) (Harrière, 2004).

II. 2. 1. 3. 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 racines pour mesurer ensuite sa longueur en cm.

II. 2. 1. 4. 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.

II. 2. 2. Analyse de la perméabilité membranaire

II. 2. 2. 1. 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**) :

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

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).

II. 2. 2. 2. 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:

$$\text{Electrolyte leakage (\%)} = \frac{(EC1-EC0)}{(EC2-EC0)} \times 100$$

II. 2. 2. 3. 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 10000 x g pendant 10min. 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, (**Figure 09**). La densité optique est corrigée par une lecture à 600 nm. La concentration de MDA est calculée en utilisant son coefficient d'extinction molaire ($\epsilon = 155 \text{Mm}^{-1} \text{cm}^{-1}$).



Figure 09 : Spectrophotomètre (UV mini 1240).

II. 2. 2. 4. Détermination des concentrations du peroxyde d'hydrogène (H_2O_2)

Les concentrations du peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) dans les feuilles sont mesurées selon la méthode de **Velikova et al., (2000)**. L'absorbance est lue à une longueur d'onde de 390 nm.

II. 2.3. 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).

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

La figure (10) montre l'effet du silicium sur le taux de germination des graines de blé dur soumises ou non au stress du chlorure de sodium (stress salin). Au niveau germinatif, et d'après ces variations, nous remarquons selon nos résultats que le traitement des graines de blé dur par la concentration 50 mM du chlorure de sodium ajoutée dans la solution nutritive a engendré une fluctuation (légère perturbation) du taux de germination, ce qui a mené à une augmentation inappréciable non significative du taux de germination des graines de blé dur traitées par rapport aux graines témoins. Toutefois, nous constatons que l'addition des deux concentrations de silicium (1 et 2 mM) induit une légère augmentation inestimable du taux de germination.

L'analyse statistique indique que la différence des variations du taux de germination des graines de blé dur est non significative ($p > 0,05$).

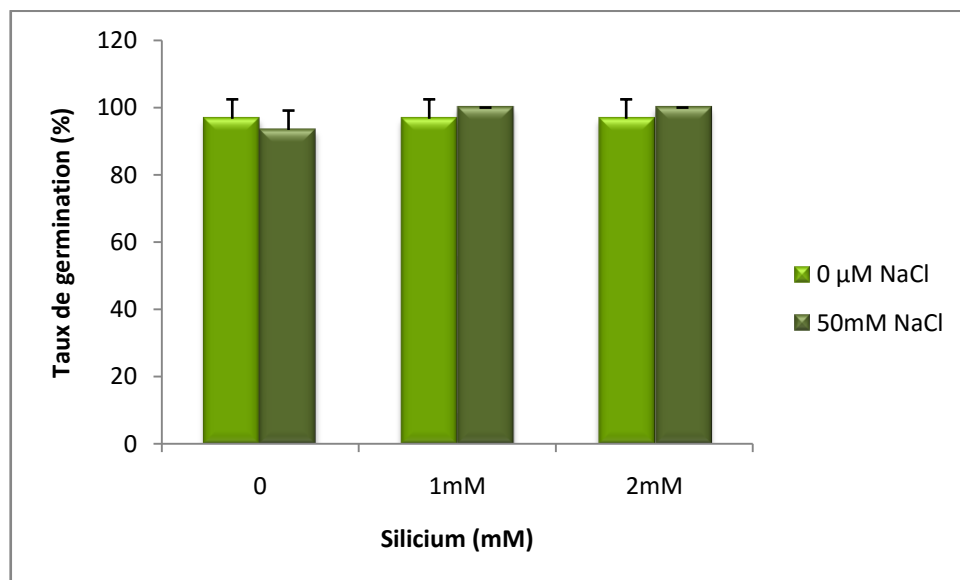


Figure (10) : Effet du silicium sur le taux de germination des graines de blé dur soumises ou non au stress du chlorure de sodium.

III. 1. 2. Influence du silicium sur le nombre moyen de racines des plantes de blé dur soumises ou non au stress du chlorure de sodium

La figure (11) représente l'effet du silicium sur le nombre moyen de racines des plantes de blé dur soumises ou non au stress du chlorure de sodium.

Au niveau racinaire, nos résultats révèlent également que l'exposition des plantes de blé dur au traitement par le chlorure de sodium par la concentration 50 mM, a entraîné également une légère perturbation de nombre moyen de racines, ce qui a conduit à une diminution inappréciable non significative des racines par rapport à celle du témoin. Ainsi, l'application des deux concentrations de silicium (1 et 2 mM) a augmenté modiquement le nombre moyen de racines des plantes traitées.

L'analyse statistique révèle que la différence des variations du nombre moyen de racines de blé dur est non significative ($p > 0,05$).

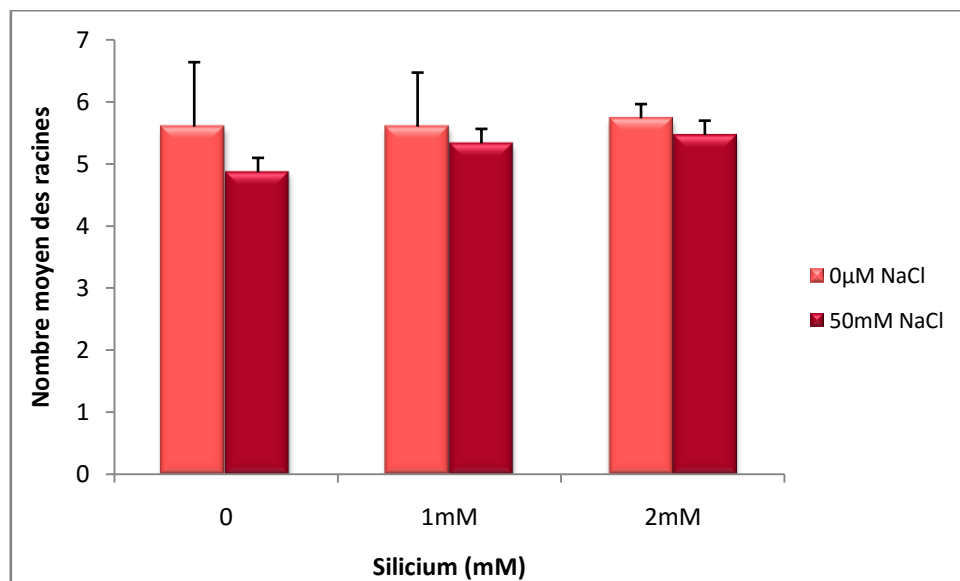


Figure (11) : Effet du silicium sur le nombre moyen des racines des plantes de blé dur soumises ou non au stress du chlorure de sodium.

III. 1. 3. Influence du silicium sur l'élongation racinaire des plantes de blé dur soumises ou non au stress du chlorure de sodium

La figure (12) met en évidence l'effet du silicium sur l'élongation racinaire des plantes de blé dur soumises ou non au stress salin. Nous remarquons que les traitements par la concentration 50 mM du chlorure de sodium provoquent une diminution significative des longueurs moyennes des racines des plantes de blé dur par rapport à celle du témoin.

Toutefois, nous observons par rapport au témoin, en absence de chlorure de sodium, l'addition du silicium dans la solution nutritive induit une augmentation des longueurs moyennes des racines des plantes de blé dur.

En outre, nos résultats ont également montré que l'interaction du silicium avec le chlorure de sodium a un effet positif significatif en atténuant l'impact du stress salin appliqué sur l'élongation racinaire des plantes de blé dur. L'application des deux concentrations du silicium (1 et 2 mM) a favorisé l'élongation racinaire des plantes de blé dur, ce qui a conduit à l'augmentation des longueurs moyennes des racines des lots traités par le chlorure de sodium.

Ainsi, l'analyse statistique indique que la différence des variations de l'élongation racinaire de tous les lots des plantes de blé dur est très hautement significative ($p \leq 0.001$).

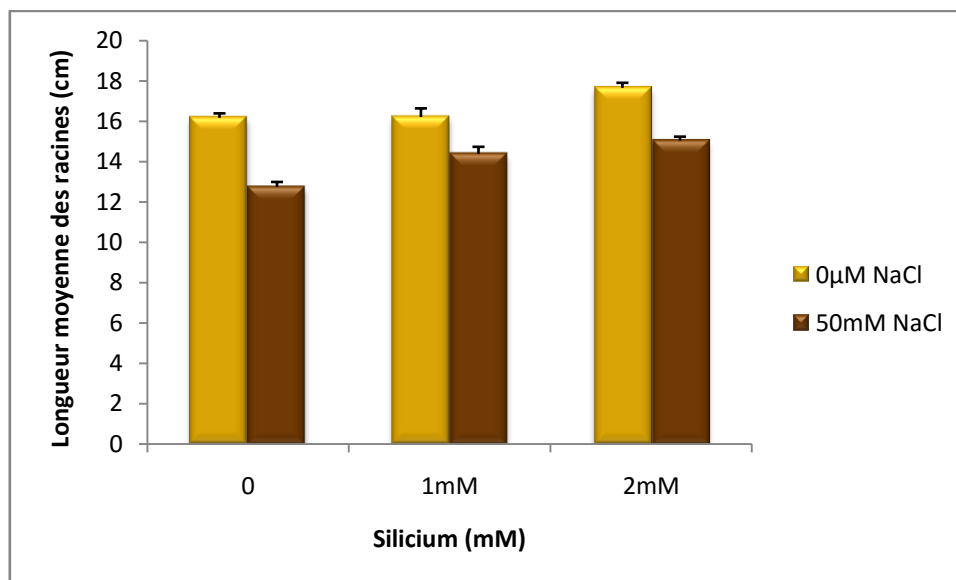


Figure (12) : Effet du silicium sur l'élongation racinaire des plantes de blé dur soumises ou non au stress du chlorure de sodium.

III. 1. 4. Influence du silicium sur l'élongation foliaire des plantes de blé dur soumises ou non au stress du chlorure de sodium

La figure (13) illustre l'effet du silicium sur l'élongation foliaire des plantes de blé dur soumises ou non au stress du chlorure de sodium. Nos résultats montrent qu'en absence de chlorure de sodium, l'ajout du silicium dans la solution nutritive fait augmenter les longueurs moyennes des feuilles des plantes de blé dur par rapport à celles du témoin.

Selon nos résultats, nous constatons également d'une part que la longueur moyenne des feuilles des plantes de blé dur est affectée négativement par le traitement du chlorure de sodium (50 mM), en diminuant significativement les longueurs moyennes des feuilles.

D'autre part, nous remarquons que l'application des deux concentrations du silicium améliore l'élongation foliaire des lots traités par le chlorure de sodium. Le prétraitement par les deux concentrations (1 et 2 mM) de silicium fait augmenter les longueurs moyennes des feuilles par rapport aux plantes traitées au stress salin. Alors on note que le silicium atténue l'inhibition de l'élongation foliaire des plantes de blé dur.

Ainsi, l'analyse statistique indique que la différence des variations de l'élongation foliaire de tous les lots des plantes de blé dur est très hautement significative ($p \leq 0.001$).

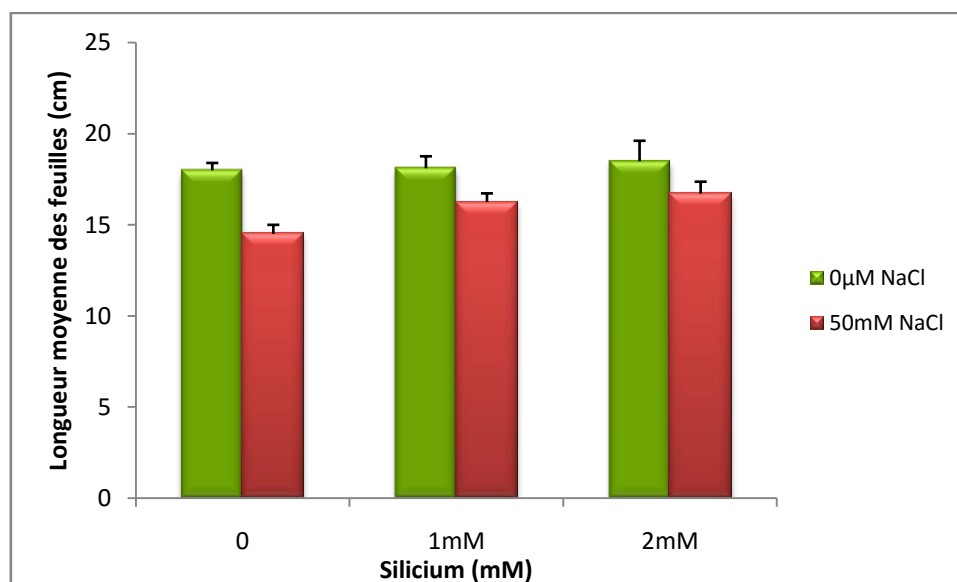


Figure (13) : Effet du silicium sur l'élongation foliaire des plantes de blé dur soumises ou non au stress du chlorure de sodium.

III. 1. 5. 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 est illustré par la figure (14) 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 ($p \leq 0.01$).

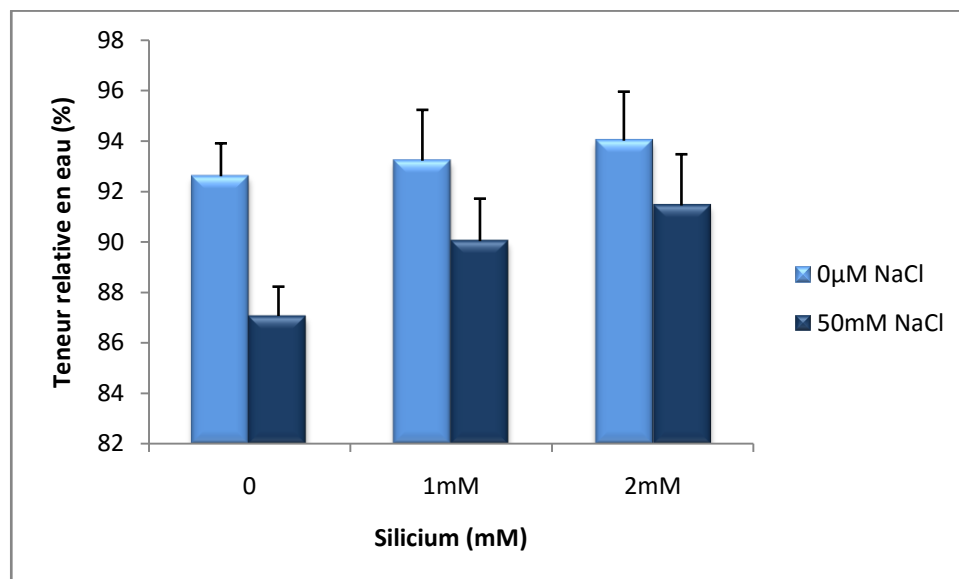


Figure (14) : Effet du silicium sur la teneur relative en eau des plantes de blé dur soumises ou non au stress du chlorure de sodium.

III. 1. 6. 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

L'effet du silicium sur le taux de fuite des électrolytes dans les feuilles des plantes de blé dur soumises ou non au stress du chlorure de sodium est montré dans la figure (15).

Nous constatons selon nos résultats une augmentation très hautement significative du taux de la fuite des électrolytes dans les feuilles des plantes traitées par rapport à celui des témoins. En effet cette augmentation est de l'ordre de 123 % chez les lots traités par la concentration 50 mM par rapport aux lots témoins.

Cependant, l'addition des deux concentrations du silicium a réduit le taux de fuite des électrolytes chez les lots traités par chlorure de sodium au niveau des feuilles des plantes de blé dur. L'effet positif du silicium a été plus prononcé au niveau des feuilles des plantes de blé dur traitées par le chlorure de sodium. En effet, nous estimons que la diminution des concentrations du taux de fuite des électrolytes atteint les 99% dans les feuilles des plantes traitées au chlorure de sodium en présence du silicium (2 mM).

De ce fait, l'analyse statistique indique que la différence des variations de la synthèse du taux de fuite des électrolytes dans les feuilles des plantes de blé dur est très hautement significative ($p \leq 0.001$).

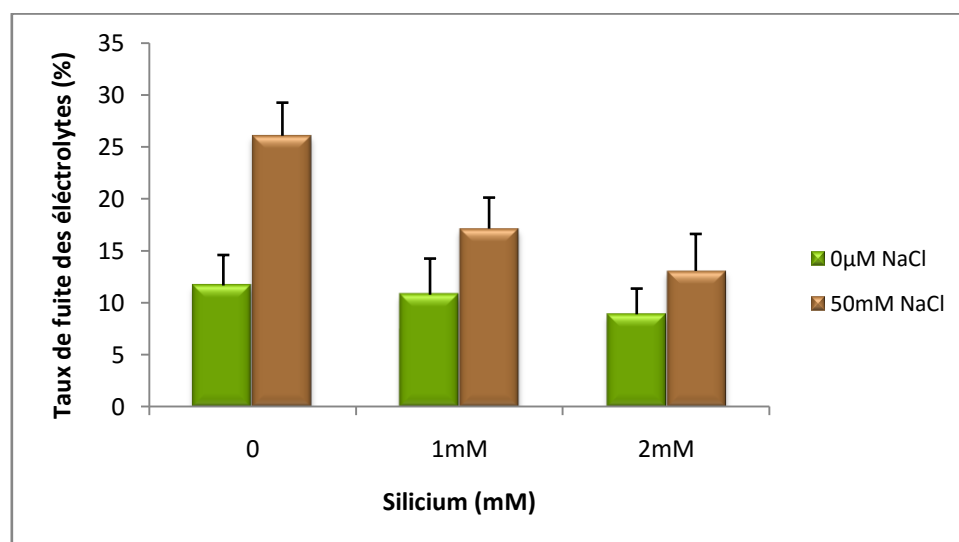


Figure (15) : Effet du silicium sur le taux de fuite des électrolytes au niveau des feuilles des plantes de blé dur soumises ou non au stress du chlorure de sodium.

III. 1. 7. 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 (16) montre l'effet 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.

D'après les résultats obtenus, nous remarquons que les traitements par la concentration 50 mM du chlorure de sodium provoquent une augmentation significative des concentrations du MDA dans les feuilles des plantes de blé dur par rapport à celles du témoin.

En revanche, l'ajout du silicium dans la solution nutritive en présence du chlorure de sodium induit une diminution des concentrations du MDA dans les feuilles des plantes de blé dur traitées. Ainsi, l'effet le plus marqué de l'atténuation du stress salin par le silicium a été observée dans les feuilles des plantes prétraitées avec la concentration 2 mM de silicium.

L'analyse statistique affiche que la différence des variations de la synthèse du MDA dans les feuilles des plantes de blé dur est très hautement significative ($p \leq 0.001$).

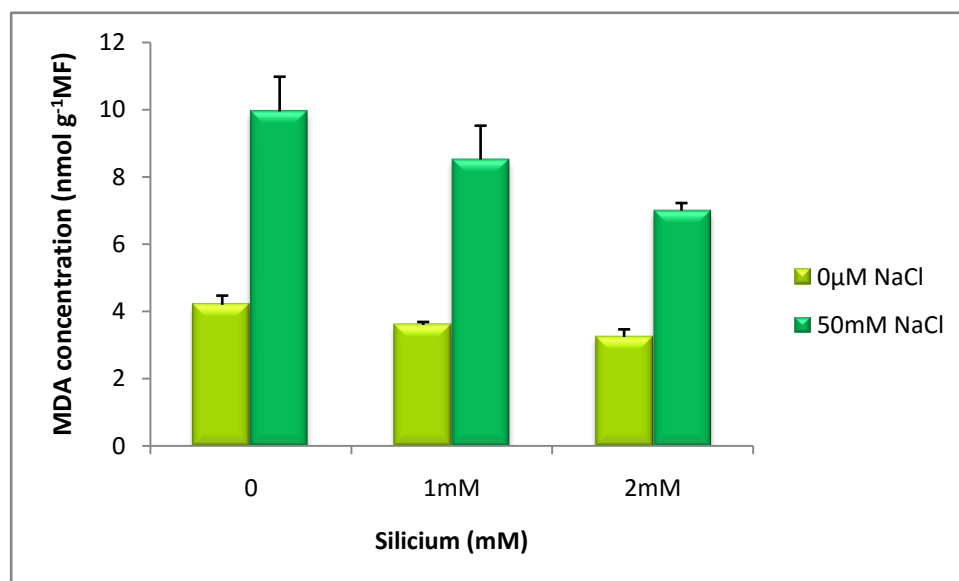


Figure (16) : Effet du silicium sur les concentrations du Malondialdéhyde (MDA) dans les feuilles des plantes de blé dur soumises ou non au stress du chlorure de sodium.

III. 1. 8. Influence du silicium sur la production du peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) dans les feuilles des plantes de blé dur soumises ou non au stress du chlorure de sodium

La figure (17) représente l'effet du silicium sur la production du peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) 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 50 mM du chlorure de sodium induit une accroissement significative de la synthèse du peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) 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 (H_2O_2) dans les feuilles des plantes traitées par le chlorure de sodium.

Nous notons, selon nos résultats, que l'atténuation de la surproduction du peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) par le silicium a été plus importante au niveau des lots traités par le chlorure de sodium. Ainsi, les concentrations du silicium ont fait diminuer la synthèse du H_2O_2 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 H_2O_2 dans les feuilles des plantes de blé dur est significative ($p \leq 0.05$).

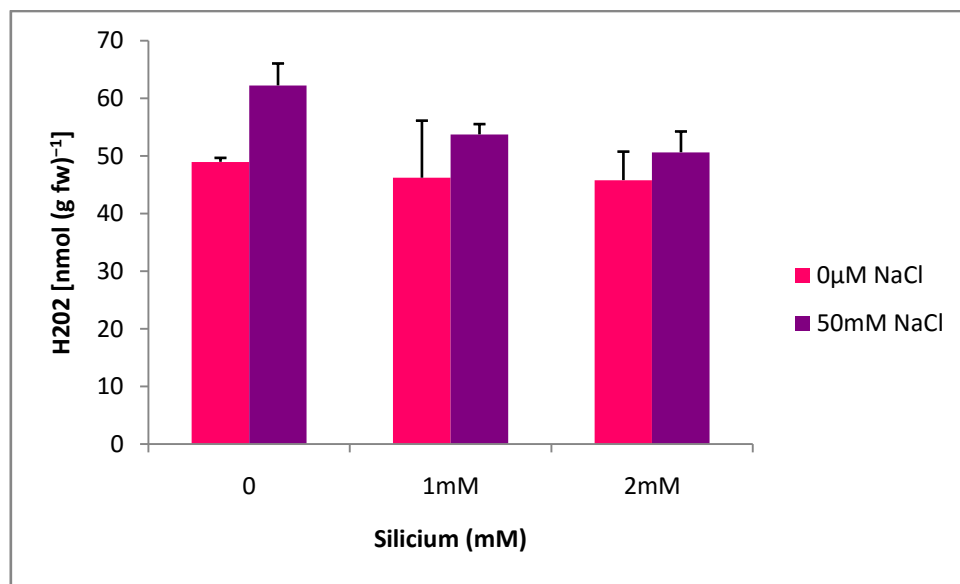


Figure (17) : Effet du silicium sur les concentrations du peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) dans les feuilles des plantes de blé dur soumises ou non au stress du chlorure de sodium.

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 (Munns, 2002).

Dans notre travail, nous avons constaté que l'exposition des plantes au stress salin a entraîné une perturbation du processus de germination. Ainsi, le chlorure de sodium provoque une fluctuation non significative du taux de germination des graines de blé dur. D'une même façon le chlorure de sodium engendre une légère perturbation sur le nombre moyen de racines des plantes de blé dur. Une diminution des graines germées a été enregistrée sous stress salin, dès les premières 24 heures. La plupart des plantes sont considérées plus sensibles à la salinité durant leurs phases de germination et de levée (Maillard, 2001). Les dommages causés aux graines pourraient être en liaison directe avec la concentration appliquée en sel (Chandrashekhar *et al.*, 1986). Parmi les causes de l'inhibition de la germination en présence de sel, la variation de l'équilibre hormonal a été évoquée (Kabar, 1986 ; Debez *et al.*, 2001). En outre, la diminution du taux de germination final correspond soit à une augmentation de la pression osmotique externe ce qui affecte l'absorption de l'eau par les graines ; soit à une accumulation des ions Na^+ et Cl^- dans l'embryon (Groome *et al.*, 1991).

Toutefois, nous avons constaté lors de nos résultats que le taux de germination et le nombre moyen des racines 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.) et de nombreuses céréales (Epstein, 2000 ; Datnoff *et al.*, 2001; Ma et Takahashi, 2002 ; Alayat, 2015).

Nos résultats ont également mis en évidence que le chlorure de sodium a réduit l'élongation des racines et des feuilles des plantes de blé dur. 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; Jabnune, 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. Le problème de la salinité a été étudié sur le plan agronomique (Zekri, 1993 ; Ruiz *et al.*, 1997), biochimique (Cerezo *et al.*, 1997) et moléculaire (Gueta-Dahan *et al.*, 1997). La conséquence générale de la présence de sels dans les sols est une limitation de la croissance qui provoque une baisse de rendement (Greenway et Munns, 1980; Amtmann et Sandres, 1999).

Cette inhibition de croissance observée dans nos résultats a été réduite lors du prétraitement au silicium qui a atténué la réduction de l'élongation racinaire et foliaire des plantes du blé dur stressées. Plusieurs travaux similaires ont été rapportés (Liang *et al.*, 2005 ; Zenget *et al.*, 2011 ; Ahsan Farooq *et al.*, 2013 ; Bharwana *et al.*, 2013 ; Alayat, 2015). Ainsi, il a été trouvé que le silicium peut servir comme un élément bénéfique pour la croissance et le développement des plantes (Epstein, 2000). 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 observé 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 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**).

La teneur relative en eau (TRE) des feuilles des plantes renseigne sur la turgescence relative des tissus et figure parmi les critères d'évaluation de la tolérance au stress. Nos résultats montrent que la teneur relative en eau des plantes de blé dur diminue de façon hautement significative en fonction des traitements de chlorure de sodium, par rapport aux plantes témoins. Pour examiner l'effet osmotique du stress abiotique dans les tissus végétaux traités, la teneur relative en eau est souvent mesurée (**Kim *et al.*, 2005**). 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**).

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 ; AhsanFarooq *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 nos résultats, nous avons également constaté lors de la mesure du taux de fuite des électrolytes chez les plantes soumises ou non au stress salin que l'application du silicium aux plantes a fait baisser ce taux. Nos résultats sont en accord avec ceux de **Liang *et al.*, 1996** et **Levent Tuna (2007)** où il a été observé que le silicium a réduit le taux de fuite des électrolytes chez des plantes soumises au stress salin ; ce qui suggère que le silicium pourrait restaurer la perméabilité membranaire et maintenir l'intégrité membranaire (**Zhu *et al.*, 2004**).

Les premières cibles des ROS sont les lipides, notamment ceux 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 de 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) (**Ferratetal., 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).

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 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 H_2O_2 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 (Foyer *et al.*, 1994). 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; Maksymiec, 2007). Le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) peut fonctionner comme un messager 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; Chanson *et al.*, 2011; Li *et al.*, 2012; Tripathi *et al.*, 2012; Liu *et al.*, 2013 ; Malcovska *et al.*, 2014 ; Chalmardi *et al.*, 2014).

Conclusion et Perspectives

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.

Dans cette optique l'objectif de notre travail a été d'évaluer l'effet du silicium comme un moyen d'atténuation des dommages oxydatifs engendrés par les stress salin chez les plantes de blé dur.

Pour réaliser cet objectif, nous nous sommes consacrés à l'étude de l'effet du silicium sur la croissance des plantes de blé et sur quelques marqueurs du stress oxydant. Ainsi d'après nos résultats, le stress causé par la salinité, engendre des désordres dans la croissance des plantes de *Triticum durum*. Ces altérations se manifestent, à l'échelle de la plante entière, par une réduction de l'élongation racinaire et foliaire et une réduction des biomasses fraîche et sèche. Toutefois, le prétraitement des plantes avec le silicium favorise 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 H_2O_2 . 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.

Abdelly C., Öztürk M., Ashraf M. et Grignon C, 2008. Biosaline Agriculture and High Salinity Tolerance. (Eds) Birkhäuser Verlag /L Swizerland, 367 p. 102 illus.

Abdelly, C, 2006. Caractérisation des halophytes pour le dessalement des sols salins et le traitement des eaux salines. Rapport d'activités 2007. Centre de biotechnologie à la technopole de Borj-Cedria, Tunisie, pp. 28- 31.

Ahsan-Farooq M., Shafaqat A., Amjad H., Wajid I., Khalid M and Zafar I, 2013. Alleviation of cadmium toxicity by silicon related to elevated photosynthesis, antioxidant enzymes ; suppressed cadmium uptake and oxidative stress in cotton. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 96, 242–249.

Ait Kaki Y, 1993. Contribution à l'étude des mécanismes morpho physiologiques de tolérance au stress hydrique sur 05 variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.). Mémoire de Magistère. Université d'Annaba, 130 p.

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, pp 67.

Ali S., Bai P., Zeng F., Cai S., Shamsi IH., Qiu B., Wu F and 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.

Allen, G. J., Muir, S. R. and Sanders. D. 1995, Release of Ca²⁺ from individual plant vacuoles by both InsP₃ and cyclic ADP-ribose. *Science* 268(5211): 735-737.

Aoumeur H, 2012. L'effet stressant du plomb sur la croissance du radis « *Raphanus sativus* L. » : Réponses physiologiques, biochimiques et efficacité potentielle de phyto remediation. 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-

Aubert G, 1982. les sols sodiques en Afrique du nord .Cahier O.R.S.T.O.M .Service Pédologie : 194

Bajji M, 1999. Étude des mécanismes de résistance au stress hydrique chez le blé dur :caractérisation de cultivars différant par leurs niveaux de résistance à la sécheresse et de variants somaclonaux sélectionnés In vitro. Thèse de doctorat. Univ . Louvain.

Bartels D. et Nelson D, 1994. Approaches to improve stress tolerance using molecular genetics. *Plant Cell Envir.* **17**: 659-667.

Bélangier RR, Bowen PA, Ehret DL, Menzies JG. 1995. Soluble silicon, its role in crops and disease management of greenhouse crops. *Plant Dis.* **79**: 329-336.

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.

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.

Bouzoubaâ Z., Ait Lhaj A et 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.

Bouzoubaâ. Z; Alaoui. A; Mimouni.A; Laamim. M; et Ait Lhaj A, 2004. Etude sur le rôle du silicium en agriculture : Effet sur la production et la qualité des fruits, légumes et grandes cultures, Institut National de la Recherche Agronomique Maroc - Centre Régional de la Recherche Agronomique Agadir, p 29, Etude réalisée dans le cadre d'une convention INRA/Agro-solutions. Rapport préliminaire 2003-2004.

Boyer J.S, 1982. Plant productivity and environment. *Science* **218**: 443-448.

Bozzini A, 1988. Origin, distribution, and production of durumwheat in the world. Pages 1-16 in : Durum Wheat : Chemistry & Technology. G. Fabriani and C. Lintas, eds. Am. Assoc. Cereal Chem. : St. Paul, MN.

Broadley, M., Brown, P., Cakmak, I., Feng, M.J., Zed, R. et Zhao F, 2011. Beneficial Elements. In P. Marschner, ed. Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants. Elsevier Ltd, pp. 249–270.

Buege JA., Aust SD, 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.

Cerezo, M., García-Agustín, P., Serna, M. D. and Primo-Millo E, 1997. Kinetics of nitrate uptake by Citrus seedlings and inhibitory effects of salinity. Plant Science 126(1): 105-112.

Chalmardi ZK., Abdolzadeh A and Sadeghipour HR, 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.

Chellali B, 2007. Marché mondial des céréales : L'Algérie assure sa sécurité alimentaire. <http://www.lemaghreb.dz.com/admin/folder01/une.pdf>.

Clarke J. et Norvell F, 2002. Concentration of cadmium and other éléments in the grain of nearisogenic durum lines. Can. J. Plant Sci/ revue canadienne de phytotechnie. 82p.

Dat JF., Lopez-Delgado H., Foyer CH and Scott IM, 2000. Effects of salicylic acid on oxidative stress and thermotolerance in tobacco. Journal of Plant Physiology, 156, 659-665.

Datnoff L.E., Alvarez J, 2001. The economies of silicon for integrated management and sustainable production of rice and sugarcane. Dans : Silicon in agriculture, (eds L.E. Datnoff, G.H. Snyder, & G.H. Korndörfer) Elsevier. Amsterdam, pp 221-239.

Daud M.K, Quiling H, Lei M, Ali B. et 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. Cahiers d'Etudes et de Recherches Francophones/Agricultures, Vol. 10, No. 2 : 135- 138.

Ding H.D., Wan Y.H., Qi N.M., Zhu W.M., Yang X.F and 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 and Shyam R, 2001. Differential oxidative responses to cadmium in roots and leaves of pea (*Pisum sativum* cv. Azad). J. Exp. Bot, 52 : 1101-1109.

Durand J.H, 1958. Les sols irrigables. Etude pédologique -ED. Imbert, Alger, 190p.

Epstein E, 1994. The anomaly of silicon in plant biology. Proc. Natl. Acad. Sci, 91, 11-17.

Epstein E, 1999. Silicon. Annu. Rev. Plant Molecular Biology, 50, 641-644.

Epstein E, 2001. Silicon in plants : Facts vs. Concepts. Silicon in agriculture. Amsterdam. Elsevier Science B.V, 1-15.

Epstein, E., Norlyn, J. D., Rush, D. W., Kingsbury, R. W., Kelley, D. B., Cunningham, G. A. and Wrona A. F, 1980. Saline culture of crops: a genetic approach. Science 210 (4468): 399-404.

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, 308 p.

Feillet P, 2000. Le grain de blé : composition et utilisation, Ed ; Institut National de la Recherche Agronomique, Paris, 308 p.

Ferrat L., Pergent-Martini C and 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.

Fritas Saïd, 2012. Etude bioécologique du complexe des insectes liés aux cultures céréalières dans la région de Batna (Algérie). thèse de Magister en Ecologie et biologie des populations. Université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen, 115 pages.

Gill, S. S. and Tuteja N, 2010. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiology and Biochemistry* 48(12): 909-930.

Godon B, 1985. Protéines végétales. Ed. Lavoisier. 162- 235.

Gomes-Junior RA., Moldes CA., Delite FS., Pompeu GB., Gratão PL., Mazzafera P., Lea PJ and Azevedo RA, 2006. Antioxidant metabolism of coffee cell suspension cultures in response to cadmium. *Chemosphere*, 65, 1330-1337.

Gómez-Cadenas, A., Tadeo, F. R., Talon, M. and 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.

Gómez-Cadenas, A., Tadeo, F., Primo-Millo, E. and Talon M, 1998. Involvement of abscisic acid and ethylene in the responses of citrus seedlings to salt shock. *Physiologia Plantarum* 103(4): 475-484.

- Gong JM., Lee DA and Schroeder JI, 2003.** Long-distance root-to-shoot transport of phytochelatins and cadmium in Arabidopsis. Proc Natl Acad Sci USA, 100, 10118-10123.
- Greenway, H., Munns. R, 1980.** Mechanisms of salt tolerance in non-halophytes. Ann. Rev. Plant Physiol. 31, 149–190.
- Groome M.C., Axler S. & Gfford D.J, 1991.** Hydrolysis of lipid and protein reserves in lobolly pine seeds in relation to protein electrophoretic patterns following imbibition. Physiol. Plant, 83, 99-106.
- Gueta-Dahan, Y., Yaniv, Z., Zilinskas, B. A. and Ben-Hayyim. G, 1997.** Salt and oxidative stress: similar and specific responses and their relation to salt tolerance in citrus. Planta 203(4): 460-469.
- Gunes A., Inal A., Bagci EG., Coban S and Sahin O, 2007.** Silicon increases boron tolerance and reduces oxidative damage of wheat grown in soil with excess boron. Biol. Plant., 51, 571– 574.
- Hamdia. M., Shaddad. M.a.k., Doaa M.M, 2004.** Mechanisms of salt tolerance and interactive effects of azospirilum brasilence inoculation on maize cultivars grown under salt stress conditions. Plant Growth Regulation. V 44, n°02, p 165-174. (10).
- Haouala F, 2007.** Effet de la salinité sur la répartition des cations (Na⁺, K⁺ et Ca²⁺) 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.
- Harrièreche, 2004.** Etude des effets du cadmium et de combinaisons cadmium- calcium sur la germination et le métabolisme respiratoire du blé dur (Triticum durum Desf). Mémoire de magistère. Université D'Annaba, 63P.
- Hodges DM., DeLong JM., Forney CF and Prange RK, 1999.** Improving the thiobarbituric acid-reactive-substances assay for estimating lipidperoxidation in plant tissues containinganthocyanin and other interfering compounds. Planta, 207, 604–611.
- Hopkins, 2003.** Physiologie végétale. Ed. Révision scientifique de Charles. Marie Evard . 23-453.

Imalet R, 1979. Influence de différentes concentrations de sels (NaCl, Na₂SO₄, MgSO₄) des eaux d'irrigation de l'agriculture sur le rendement du haricot. Thèse Ing, INA, EL Harrach ,43p.

Issaad G, 2013. Statut nutritionnel et plasticité de réponses aux stress chez un modèle végétal : *Triticum durum* Desf.. Thèse de Doctorat, Université d'Annaba, 140 p.

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.

Joseph, B. and Jini D, 2011. Development of salt stress-tolerant plants by gene manipulation of antioxidant enzymes. Asian journal of agricultural research 5(1): 17-27.

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.

Khales A et 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.

Kheddam M, 2015. Bulletin des Variétés de Céréales Autogames Ed ; Centre National de Contrôle et de Certification des semences et plants, Alger, pp 100 – 101.

Kim SY., Lim JH., Park MR., Kim YJ., Park T., Seo YW., Choi KG and Yun SJ, 2005. Enhanced antioxidant enzymes are associated with reduced hydrogen peroxide in barley root under saline stress. J. Biochem. Mol. Biol, 38, 218–224.

Larcher W, 2001. Physiologie plant ecologie. 4 the edition .Ed. Based on the translation of the third edition. 350.

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 L., Zheng C., Fu Y., Wu D., Yang X and Shen H, 2012. Silicate-mediated alleviation of Pb toxicity in banana grown in Pb-contaminated soil. Biol. Trace Elem. Res., 145, 101–108.

Liang YC., Wong JWC and Wei L, 2005. Silicon-mediated enhancement of cadmium tolerance in maize (*Zea mays* L.) grown in cadmium contaminated soil. Chemosphere, 58, 475- 483.

Liang, Y.C., Shen, Q.R., Shen, Z.G., Ma, T.S., 1996. Effects of silicon on salinity tolerance of two barley cultivars. J. Plant Nutr. 19, 173–183.

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., Tamai, K., Ichii, M., Wu, G.F., 2002. A rice mutant defective in Si uptake. Plant Physiol. 30, 2111–2117.

Liu J., Zhang H., Zhang Y and Chai T, 2013. Silicon attenuates cadmium toxicity in *Solanum nigrum* L. by reducing cadmium uptake and oxidative stress. Plant Physiol. Biochem., 68, 1–7.

Liu, Y. and Zhang. S, 2004. Phosphorylation of 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid synthase by MPK6, a stress-responsive mitogen-activated protein kinase, induces ethylene biosynthesis in Arabidopsis. The Plant Cell Online 16(12): 3386-3399.

Loureiro J., Rodriguez E., Dolez'el J and 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.

Ma JF, Miyake Y, Takahashi E, 2001. Silicon as a beneficial element for crop plants. In Datnoff LE, Snyder GH, Korndorfer GH (eds) Silicon in agriculture. The Netherlands. Elsevier, pp 17-39.

Ma JF, Takahashi E, 2002. Soil, fertilizer, and plant silicon research in Japan. The Netherlands: Elsevier

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.

Malčovská SM., Dučaiová Z., Maslaňáková I and 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.

Meksem L, 2007. Etude des effets de deux fongicides : Le Flammenco SC et le Tilt 250 EC sur la physiologie, la croissance et le métabolisme énergétique des racines isolées de *Triticum durum* Desf.. Thèse de Doctorat, Université d'Annaba, 162 p.

Mishra S., Srivastava S., Tripathi RD., Govindarajan R., Kuriakose SV and Prasad MNV, 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 sur. UER de génétique et amélioration des plantes, ENSA - INRA Montpellier.36p.

Munns R, 2002. Comparative physiology of salt and water stress. *Plant, cell & environment*25(2):239-250.

Munns, R., James, R. A., Lauchli A, 2006. Approaches to increasing the salt tolerance of wheat and other cereals. *J. Exp. Bot*, 27: 1025-1043.

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.

Nadjem Kamel, 2012. contribution a l'étude des effets du semis direct sur l'efficience d'utilisation de l'eau et le comportement variétal de la culture de blé en région semi-aride. thèse de Magister en Production Végétale et Agriculture de Conservation. Université Ferhat Abbas Sétif, 131 pages.

Neill S., Desikan R and 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

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.

Reynolds, M., MUJEEB-KAZI, A. and Sawkins M, 2005. Prospects for utilising plant-adaptive mechanisms to improve wheat and other crops in drought-and salinity-prone environments. *Annals of Applied Biology* 146(2): 239-259.

Řezanka, T. et Sigler K, 2008. Biologically active compounds of semi-metals. *Phytochemistry*, 69, 585–606.

Rizwan, M., Ali S., Ibrahim M., Farid M., Adress M., Bharwana S. A., et al., 2015. Mécanisms of silicon- mediated alleviation of drought and salt stress in plplants a review. *Environ. Sci- pollut. Res. Int.* 2215416-15431. [10. 1007/ s11356- 015-5305-x].

Rubio F., Gassmann W. et Schröder J.I, 1995. Sodium driven potassium uptake by the plant potassium transporter HKT1 and mutations conferring salt tolerance. *Science* **270**: 1660-1663.

Ruiz, D., Martínez, V. and Cerdá A, 1997. Citrus response to salinity: growth and nutrient uptake. *Tree physiology* 17(3): 141-150.

Schulze E.D et al., 2005 :Plant ecology. Edition Springer Berlin, Heidelberg,p692.

Shen B., Jensen RG and Bohnert HJ, 1997. Mannitol protects against oxidation by hydroxyl radicals. *Plant Physiology*, 115, 527-532.

Soltner D, 1998. Les grandes productions végétales : céréales, plantes sarclées, prairies. Sainte- Gemme-sur-Loire, Sciences et Techniques Agricoles.

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, 2007. Salt Modulates Gravity Signaling Pathway to Regulate Growth Direction of Primary Roots in Arabidopsis. *Plant Physiol.* pp178-188.

Surget A., et Barron C., 2005. Histologie du grain de blé, *Industrie des céréales* 145, 4-7.

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 and 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.

Torres M, 2000. Low fatty acid unsaturation: a mechanism for lowered lipoperoxidative modification of tissue proteins in mammalian species with long life spans. *J. Gerontol. A Biol. Sci. Med. Sci.* 55, 286–291

Tripathi DK., Singh VP., Kumar D and Chauhan DK, 2012b. 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 RD., Singh RP., Dwivedi S., Goutam D., Shri M and 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 and Edreva A, 2000.** Oxidative stress and some antioxidant systems in acidrain-treated bean plants-protective role of exogenous polyamines. *Plant. Sci*, 151, 59-66.
- Vincent R, 2006.** Recherche et étude de marqueurs moléculaires de la réponse au stress chez l'algue brune *Laminaria digitata*. Thèse de doctorat. Biologie. Université de Rennes 1.
- Wahsha M., Al-Jassabi S., Azirun M and 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.
- William G.H, 2003.** Physiologie végétale. In : de Boeck (eds), pp. 451- 475.
- Yadav SK, 2010.** Cold stress tolerance mechanisms in plants. *Agron. Sustain. Dev.* 30, 515– 527. doi:10.1051/agro/2009050.
- Yves H., et Buyer J, 2000.** L'origine des blés. Pour les sciences hors série n° 26. Pp 60 - 62.
- Zekri M, 1993.** Seedling emergence, growth, and mineral concentration of three citrus rootstocks under salt stress. *Journal of plant nutrition* 16(8): 1555-1568.
- 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, J-K, 2002.** Salt and drought stress signal transduction in plants. *An. Rev. of Plant Biol.* 53: 247- 73
- 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.
- Zilli, C. G., Balestrasse, K. B., Yannarelli, G. G., Polizio, A. H., Santa-Cruz, D. M. and Tomaro, M. L, 2008.** Heme oxygenase up-regulation under salt stress protects nitrogen metabolism in nodules of soybean plants. *Environmental and Experimental Botany* 64(1): 83-89.