

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE DE SAAD DAHLEB BLIDA 1

Faculté des sciences de la nature et de la vie

Département des biotechnologies

Projet de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme en Master académique  
en Sciences de la Nature et de la Vie

Option : Biotechnologies végétales

Thème

**Action combinée Salinité-Acide salicylique sur la germination et la  
croissance du blé dur (*Triticum durum*) et de l'orge (*Hordeum vulgare*)  
dans des conditions contrôlées.**

Réalisée par :

**SELLAMI HIBAT-EELAH**

**CHAOU KHADIDJA**

Devant le jury composé de :

Mr. SNOUSSI S.A.	Professeur	U. Blida 1	Président
Mr. ABBAD M.	MCA	U. Blida 1	Promoteur
Mme. BENZARHA .S.	MCB	U. Blida 1	Examinatrice

2020/2021

## *Remerciements*

*Louange à « Allah » qui nous a guidées et inspirées les bons pas et les justes réflexes. Sans sa miséricorde, ce travail n'aurait jamais abouti.*

Tous nos remerciements vont à notre promoteur Monsieur ABBAD.M. Qui a accepté de diriger et surtout de corriger avec patience cette thèse. Il avait suivi sans faille tout au long de la réalisation de ce travail. Sa rigueur, son application, ses qualités humaines et scientifiques nous ont fascinées.

Monsieur SNOUSSI.S.A. Qu'il reçoive toute l'expression de notre gratitude pour avoir accepté de faire partie et présider ce jury et pour l'intérêt porté à ce travail. Nous tenons à lui exprimer nos sincères remerciements.

MADAME BENZAHRA.S. D'avoir accepté de juger ce travail en qualité d'examinatrice de jury. C'est avec sincérité que nous exprimons notre gratitude et notre profond respect.

A toute l'équipe de laboratoire de la recherche des biotechnologies et particulièrement Monsieur BENMALAM A. pour son accueil et sa gentillesse, pour son aide précieuse.

Nous sommes extrêmement reconnaissantes particulièrement envers nos parentes pour toute l'aide morale que nous avons reçue pendant notre travail. Un immense merci pour tout le bien qu'ils nous ont entouré.

# *Dédicaces*

Pour mon cher père, à qui je dois tout et en qui j'ai l'inspiration. Un papa pas possible !  
il est toujours là quand j'en ai besoin et il se met en quatre s'il le faut. Son amour, sa patience,  
sa compréhension, conseils et son soutien permanent m'ont beaucoup aidé. Il a été toujours  
un modèle pour moi.

Ce travail est le fruit de tes énormes sacrifices cher père.

Pour ma mère, la personne qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi. Ses  
conseils et sa bénédiction m'ont été un support pour mener à bien mes études. Aucune

dédicace ne serait assez éloquente pour exprimer ce qu'elle mérite.

Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour cher mère.

A mes sœurs Imane et afaf. A et mes frères islam et Chakib, pour leur soutien et toute la complicité qui nous  
unit depuis des années

partageant ma vie. Je les remercie de leurs encouragements, compréhension et tout

simplement... leur amour.

A mon binôme et Hadjer, en souvenir de tout ce qu'on a vécu ensemble,  
en prévision de tout ce qu'il nous reste à partager si on s'en donne la peine. Merci pour tout  
ce que tu m'as apporté.

*\*Hiba\**

## *Dédicaces*

C'est grâce à ALLAH que j'ai eu le courage et la force d'accomplir ce travail. Je dédie ce travail en  
premier lieu,

A ma mère Doudja et mon père karim qui me sont très chers en témoignage pour leur soutien  
pendant toute ma vie car aucun mot ne pourra exprimer mon énorme gratitude et profonde  
affection pour eux.

A la mémoire de mon cher oncle Fettah Chaou

A ma sœur Rihab , à mes frères Imad Eddine et Aymen,

A mes tantes maternelles

A toute ma famille

A ma binôme de travail Sellami Hibat-Ellah

Et à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce travail.

*\*khadidja\**

## Résumé

La salinité est l'une des principales contraintes environnementales limitant la production agricole. De ce fait, l'apport exogène de certaines phytohormones pourrait améliorer la germination des graines lorsqu'elles sont soumises au stress salin.

Cette étude a pour objectif d'évaluer l'action exogène de l'acide salicylique (AS) sur la germination et la croissance des graines du l'orge (*Hordeum vulgare.*) et le blé (*Triticum durum*) soumises à une contrainte saline pendant 15 jours de culture dans des conditions contrôlées. Les graines sont mises à germer dans des solutions de NaCl à 50 et 100 mM, des combinaisons NaCl/ AS (concentration de 0.25mMet 0.50mM) aussi testées pour déceler des solutions à notre attente. L'application du traitement à l'AS a atténué l'effet retardateur du NaCl sur la germination des graines des deux cultures testées. De plus l'AS a agit de façon positive sur la longueur des tiges et des racines pour la culture de blé dur comparativement à la culture d'orge. L'apport hormonal à l'AS n'a pas pu être efficace dans l'induction de la tolérance à la salinité, ainsi l'AS apporté à la solution a contrecarré l'effet dépressif de l'AS sur la germination des graines du l'orge et blé dur.

**Mots clés :** *Hordeum vulgare* ; *Triticum durum* ; Acide salicylique (AS) ; germination, NaCl, phytohormones, salinité.

## Abstract

Salinity is one of the main environmental constraints limiting agricultural production. As a result, the exogenous supply of certain phytohormones could improve the germination of seeds when they are subjected to salt stress.

The objective of this study was to evaluate the exogenous action of salicylic acid (SA) on the germination and growth of seeds of barley (*Hordeum vulgare*.) And wheat (*Triticum durum*) subjected to a salt constraint during 15 days of culture under controlled conditions. The seeds are germinated in 50 and 100 mM NaCl solutions, NaCl / AS combinations (concentration of 0.25mM and 0.50mM) also tested to detect solutions we expect. Application of the AS treatment attenuated the retarding effect of NaCl on seed germination of the two crops tested. In addition, AS acted positively on the length of stems and roots for growing durum wheat compared to growing barley. Hormonal supply to AS could not be effective in inducing salinity tolerance, so the AS supplied to the solution counteracted the depressive effect of AS on seed germination of the seed. barley and durum wheat.

**Keywords :** *Hordeum vulgare* ; *Triticum durum* ; Salicylic acid (AS) ; germination, NaCl, phytohormones, salinity.

## المخلص

تعتبر الملوحة من أهم المعوقات البيئية التي تحد من الإنتاج الزراعي. نتيجة لذلك، يمكن أن يؤدي الإمداد الخارجي لبعض الهرمونات النباتية إلى تحسين إنبات البذور عندما تتعرض لضغط الملح. كان الهدف من هذه الدراسة هو تقييم التأثير الخارجي لحمض الساليسيليك (AS) على إنبات ونمو بذور الشعير (*Hordeum vulgare*) والقمح (*Triticum durum*) المعرض لقيود الملح خلال 15 يوماً من الاستزراع تحت ظروف خاضعة للرقابة. تنبت البذور في 50 و100 ملم من محلول كلوريد الصوديوم، كما تم اختبار تركيبات كلوريد الصوديوم / AS (تركيز 0.25 ملم و0.50 ملم) للكشف عن الحلول التي نتوقعها. خفف تطبيق معالجة AS من تأثير التثبيط لكلوريد الصوديوم على إنبات البذور للمحصولين اللذين تم اختبارهما. بالإضافة إلى ذلك، كان لـ AS تأثير إيجابي على طول السيقان والجذور لزراعة القمح القاسي مقارنة بزراعة الشعير. لا يمكن أن يكون الإمداد بالهرمونات لـ AS فعالاً في إحداث تحمل الملوحة، لذا فإن AS المزود بالمحلول يقاوم التأثير الاكتنابي لـ AS على إنبات بذور الشعير والقمح الصلب.

حمض الساليسيليك (ع)؛ الإنبات، كلوريد الصوديوم، *Hordeum vulgare*؛ *Triticum durum*: الكلمات المفتاحية  
الهرمونات النباتية، الملوحة.



## Liste des abréviations

FAO : Organisation internationale de l'alimentation et de l'agriculture.

% : pourcentage.

ABA : acide abscissique

C° : degré Celsius.

g : gramme.

Mt : million de tonne.

T : Traitement.

P : Répétitions.

So. : Solution.

g/l : Gramme par litre.

M : Molarité.

mg/l : Milli gramme par litre.

mM : Milli molaire.

OAIC : L'Office National Interprofessionnel des Céréales.

qx/ha : Quintaux par hectare.

SAR : Résistance systématique acquise.

PH : Potentiel hydrique.

CIC : centre international de culture.

APX : L'ascorbate peroxydase.

SOD : Les super oxydes dismutases.

CK : Cytokinines.

GA3 : Gibbérelline.

AIA : Auxine.

ET : Ethylène.

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique.

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1</b> : Composition biochimique du grain d'orge .....	06
<b>Tableau 2</b> : Différents stades de développement de l'orge ( <i>Hordeum vulgare</i> L.).....	07
<b>Tableau 3</b> : Production mondiale d'orge en millions de tonne de 2011 à 2016 (Mt).....	11
<b>Tableau 4</b> : Production des céréales et d'orge an Algérie de 1900 à 2016.....	12
<b>Tableau5</b> : Productions de blé dur estimées à l'échelle mondiale (Mt).....	26
<b>Tableau 6</b> : structure d'acide salicylique.....	46
<b>Tableau 7</b> : Propriétés physiques d'AS.....	46

## Liste des figures

<b>Figure 1</b> : Distinction entre l'orge à deux rangs et l'escourgeon ( <b>Simon et al, 1989</b> ).....	03
<b>Figure 2</b> : Coupe longitudinale d'un grain d'orge ( <b>Société Malteurop, 2000</b> ).....	04
<b>Figure 3</b> : Coupe transversale des enveloppes, de la couche à aleurone et de l'endosperme amylicé d'un grain d'orge ( <b>Palmer, 1989</b> ).....	04
<b>Figure 4</b> : Différents stades de développement de l'orge ( <b>Soltner, 2005</b> ).....	10
<b>Figure 5</b> : Tache provoquée par <i>Rhynchosporiose socialis</i> ( <b>Bafs, 2008</b> ).....	14
<b>Figure 6</b> : Tache provoquée par <i>Pyrenophra graminea</i> ( <b>Bouakaz et Oussaid, 2013</b> ).....	14
<b>Figure 7</b> : Taches provoquées par <i>Ramularia collocygni</i> ( <b>INRA, 2014</b> ).....	14
<b>Figure 8</b> : Charbon couvert provoqué par <i>U. hordei</i> sur épi d'orge ( <b>Zillinsky, 1983</b> ).....	15
<b>Figure 9</b> : taches provoquées par <i>Fusarium graminearum</i> ( <b>Lauzon et al., 2007</b> ).....	15
<b>Figure 10</b> : La jaunisse nanisante de l'orge de l'orge ( <b>Dehimat et al., 2011</b> ).....	16
<b>figure 11</b> : Phylogénies des blés ( <b>Liao et al., 2008</b> ).....	17
<b>Figure12</b> : Epi et Epillet de blé ( <b>Michèle et al., 2006</b> ).....	19
<b>Figure 13</b> : Organe reproducteur de la fleur du blé ( <b>Michèle et al., 2006</b> ).....	19
<b>Figure 14</b> : Coupe longitudinale présentant les constituants du grain de blé dur ( <b>Paul, 2007</b> ).....	20
<b>Figure 15</b> : Structure histologique du grain de blé à maturité ( <b>SURGET et BARRON, 2005</b> ).....	20
<b>Figure 16</b> : Germination de grain du blé ( <b>Clerget, 2011</b> ).....	21
<b>Figure 17</b> : différents stades de développement du blé ( <b>Cycle de SOLTNER ,2005</b> ).....	23
<b>Figure 18</b> : Production de céréales en Algérie pendant la période 1961-2017.....	25
<b>Figure 19</b> : Cycle d'Asada ( <b>Asada, 1992</b> ).....	36
<b>Figure 20</b> : Structure chimique de quelques phytohormones intervient dans les mécanismes de défense chez la plante ( <b>Santener et al., 2009</b> ).....	43
<b>Figure 21</b> : Différentes voies de synthèse de l'AS ( <b>Wildermuth et al., 2001</b> ).....	45
<b>Figure 22</b> : Activation du métabolisme de la plante par application de stimulateurs de défense.....	47
<b>Figure 23</b> : Localisation du lieu de l'expérimentation.....	52
<b>Figure 24</b> : Protocole expérimentale.....	54
<b>Figure 25</b> : Présentation du dispositif expérimental.....	55
<b>Figure 26</b> : Mesures de la partie racinaire des graines de blé durant la phase.....	56

<b>Figure 27</b> : Aspect général du Balance de précision utilisée pour mesurer les biomasses (Source personnelle, 2021).....	57
<b>Figure 28</b> : Effet de la combinaison salinité (50 et 100 mM de NaCl)- Acide salicylique (0,25 et 0,50 mM) sur le taux de germination finale des graines de blé dur et de l'orge pendant 8 jours de culture dans des conditions contrôlées.....	58
<b>Figure 29</b> : Effet de la combinaison salinité (50 et 100 mM de NaCl)- Acide salicylique (0,25 et 0,50 mM) sur le nombre de feuilles de deux espèces testées.....	59
<b>Figure 30</b> : Effet de la combinaison salinité (50 et 100 mM de NaCl)- Acide salicylique (0,25 et 0,50 mM) sur la longueur des tiges de deux espèces testées.....	60
<b>Figure 31</b> : Effet de la combinaison salinité (50 et 100 mM de NaCl)- Acide salicylique (0,25 et 0,50 mM) sur la biomasse fraîche de la partie aérienne de deux espèces testées.....	61



## Introduction

Les céréales et leurs dérivées constituent l'alimentation de base dans beaucoup de pays en développement, particulièrement dans les pays maghrébins. La filière céréalière constitue une des principales filières de la production agricole en Algérie (**Djermoun, 2009**). La culture des céréales est fort ancienne en Algérie ; le blé et l'orge tiennent une place de premier ordre parmi les plantes cultivées (**Chouaki, 2006**). La culture de l'orge domine la production céréalière nationale. Elle occupe plus de 40% de superficie emblavée en céréales, et assure environ 45% de la production de céréales, soit plus de 2 millions de tonnes annuellement (**Belaid, 2016**). L'orge, largement connu comme " céréale à grain" riche en fibres, en vitamines et en minéraux essentiels, est l'une des cultures céréalières à grain les plus tolérantes au sel. Elle a de multiples utilisations nutritives et peut également être converti en malt ou utilisée pour le fourrage (**Masmoudi, 2015**).

La salinisation constitue une grave menace, en particulier pour les pays à climats arides et semis arides. Plus de 1,5 million d'hectares de terres agricoles sont perdus chaque année en raison de la salinité et on estime que jusqu'à 20% des terres arables de la planète sont affectées par la salinité (**Masmoudi, 2015**). En Algérie, 3,2 millions d'hectares de terres agricoles sont menacés par la salinité (**Djerah et Oudjehih, 2015**).

La salinité est définie par la quantité totale des éléments dissous dans l'eau. Le chlorure de sodium (NaCl) est souvent le sel majoritaire parmi ceux qui constituent la salinité mais il n'est jamais le seul (**Jean-Nicolas et al 2011**). La salinité est une contrainte majeure qui affecte la croissance et le développement des plantes. Chez les céréales, l'effet dépressif du sel se manifeste à partir d'un seuil critique de concentration caractéristique de l'espèce ou de la variété (**Bouaouina et al, 2000**). La tolérance au sel d'une culture varie en fonction de plusieurs facteurs dont principalement : le stade de développement, l'aridité du climat, la fertilisation, le mode d'irrigation, l'espèce et la variété (**Slama, 2004**).

L'acide salicylique est un produit naturel chez de nombreuses plantes, intervenant dans le contrôle de plusieurs processus physiologiques. Sa capacité à augmenter la résistance du Tabac aux infections virales. Cette propriété se rencontre chez de nombreuses espèces (Mono-Dicotylédones) et vis-à-vis aussi bien de virus que de champignons ou de bactéries pathogènes (**Heller et al, 2000**). L'acide salicylique induit la SAR (résistance systémique acquise). Le niveau endogène de l'acide salicylique (SA) augmente localement et d'une manière systématique lors de l'immunisation. SA est un signal endogène essentiel pour l'immunisation des plantes (**Mazliak, 1998**). Afin de limiter les effets néfastes de la salinité, et de renforcer les

mécanismes de tolérance au stress, l'acide salicylique joue un rôle important dans la défense des plantes contre le stress biotique et abiotique (**Vazirimehr et Rigi, 2014**). Son application exogène sous différents stress a été étudiée par plusieurs chercheurs, et son rôle dans l'activation de la germination, la croissance sous stress salin a été signalée chez le blé (**Arfan et al, 2007**), l'orge (**El-Tayeb, 2005**) et le maïs (**Gunes et al, 2007**).

Dans le cadre de cette approche, notre étude a pour objectifs d'étudier l'effet dépressif e la salinité exercée par deux concentration de NaCl à savoir 50et 100mM combinée a un phytohormone exogène qui est l'acide salicylique et ce dans le but de déterminer la concentration qui exerce plus l'effet stimulateur sur les deux culture testées a savoir l le blé dur (*Triticum durum*) et l'orge (*Hordeum vulgare*).

<b>Résumé</b> .....	
<b>Liste des abréviations</b> .....	
<b>Liste des tableaux</b> .....	
<b>Liste des figures</b> .....	
<b>Introduction</b> .....	

## **Chapitre I : Généralités sur la culture d'orge**

I- Introduction .....	01
I.1-Caractères taxonomiques et morphologiques .....	01
I.1.1- Caractères taxonomiques .....	01
I.1.2- Caractères morphologiques .....	03
I.2. Histologie .....	04
I.2.1. Embryon .....	04
I.2.2. Endosperme.....	05
I.2.3. Couche à aleurones.....	05
I.2.4. Péricarpe- testa.....	05
I.2.5. Glumelles.....	05
I.2.6. Paroi externe.....	05
I.3. Composition biochimique du grain d'orge .....	06
I.4. Développement et reproduction .....	06
I. 5. Cycle de développement.....	08
I.5.1. Période végétative .....	08
1.5.1.1. Germination .....	08
A. Paramètres de la germination.....	08
A.1. Influence de l'humidité du grain .....	08
A.2. Influence de la température de l'air .....	08
A.3. Aération .....	09
B. Durée de la germination .....	09
I.5.1.2. Levée.....	09
I.5.1.3. Tallage.....	09
I.5.2. Période reproductive.....	09
I.5.2.1 Montaison.....	09
I.5.2.2. Epiaison.....	09
I.5.2.3. Floraison .....	09
I.5.2.4. Maturité complète .....	10
I.6. Production de 'orge .....	10

I.6.1. Production dans le monde .....	11
I.6.2. Production nationale .....	11
I.7. Utilisations de l'orge .....	12
I.8. Pathologie de l'orge .....	13
I.8.1. Cycle de développement des maladies .....	13
A.1. Contamination.....	13
A.2. Période d'incubation .....	13
I.8.2. Maladies fongiques de l'orge.....	13
I.8.3. Maladies bactérienne.....	16

## **Chapitre II : Généralités sur la culture de blé dur**

II. Introduction.....	17
II.1. origine géographique .....	17
II.2. Classification botanique .....	18
II.3 Morphologie de blé dur.....	18
II.3.1. Appareil végétatif.....	18
II.3.1.1. Système racinaire.....	18
II.3.1.2. Tige et feuille.....	18
II.3.2. L'appareil reproducteur.....	18
II.3.3. Le grain.....	19
II.4. Cycle de développement du blé .....	21
II.4.1 Phase végétatif.....	21
II.4.1.1 Germination-levée.....	21
II.4.1.2. Levé - Tallage .....	21
II.4.2. Phase reproductrice.....	22
II.4.2.1. Montaison – gonflement .....	22
II.4.2.2. Epiaison-floraison.....	22
II.4.2.3 Remplissage du grain.....	22
II.5. Exigences de la culture du blé.....	23
II.6. Importance du blé dur.....	23
II.6.1. Dans le monde.....	23
II.6.1.1. Répartition géographique.....	23
II.6.1.a production mondiale.....	23
II.6.2 Production en Algérie .....	24
II.6.2.1. Répartition géographique .....	25

## **Chapitre III : Généralité sur le phénomène de la salinité**

III.1. Introduction .....	26
II.2. Salinité des sols .....	26
II.3. Origines et cause de la salinité .....	27
II.3.1. Origine primaire .....	27
III.3.2. Origine secondaire.....	27
III.4. Plantes face au stress.....	28
III.4.1. Stress osmotique .....	29
III.4.2. Stress ionique .....	29
III.4.3. Stress nutritionnel .....	29
III.5. Impacts de la salinité sur la plante.....	30
III.5.1. Impacts de la salinité sur la croissance et le développement .....	31
III.5.2. Toxicité minérale.....	32
III.5.3. Statut hydrique.....	33
III.5.4. Photosynthèse .....	34
III.5.5. Stress oxydatif.....	35
III.5.6. La modification du statut hormonal.....	37
III.6. Mécanismes de tolérance à la salinité.....	38
III.6.1. Exclusion des ions toxiques .....	38
III.6.2. Compartimentation des ions.....	38
III.7. Ajustement osmotique.....	39
III.7.1. Ajustement osmotique par accumulation d'ions.....	39
III.7.2. Ajustement osmotique par accumulation de solutés organiques.....	39
III.7.3. Fonctionnement cellulaire.....	39
III.7.3.1. Rôle du calcium.....	40

## **Chapitre IV : Généralité sur l'acide salicylique**

IV. Introduction.....	41
IV.1 Définition de phytohormone.....	41
IV.1.1 Différents types des hormones végétales.....	41
IV.1.2 Historique de l'acide salicylique .....	43
IV.2 Définition de l'acide salicylique.....	44
IV.2.1 Structure de l'acide salicylique.....	44
IV.2.2. Caractères physico-chimique.....	44
IV.2.3. Biosynthèse de l'acide salicylique.....	44
IV.2.4. Interactions acide salicylique-autres hormones.....	46

IV.2.5. Application de l'acide salicylique .....	46
IV.2.6. Rôle de l'acide salicylique.....	46
IV.2.7.Effets de l'acide salicylique sur la plante .....	47
IV.2.7.1.Effets sur la croissance.....	47
IV.2.7.2. Effets sur la photosynthèse.....	47
IV.2.7.3. Effet sur la Floraison.....	48
IV.2.7.4.Effet sur La biosynthèse de l'éthylène.....	49

### **Chapitre V : Matériel et méthodes**

V.1. objectif de l'étude.....	50
V.2.Matériel végétal utilisé.....	50
V.3. Conditions expérimentales.....	50
V.3.1.Lieu de l'expérimentation.....	50
V.3.2.Substrat.....	50
V.3.3.Conteneurs.....	51
V.4.Préparation de solutions d'irrigation.....	51
V.5.Préparation des graines.....	52
V.5.1.Mise en germination définitive dans l'étuve.....	52
V.5.2.Repiquage.....	52
V.6.Dispositif expérimentales.....	53
V.7.Opération d'entretien de la culture.....	53
V.7.1.Irrigation.....	53
V.8.Paramètres étudiés.....	53
V.8.1.Paramètres de germination.....	54
V.8.1.1.Taux de germination.....	54
V.8.1.2.Taux d'inhibition.....	54
V.8.1.3.Longueur de radicule et des coléoptiles (cm).....	54
V.8.2.Paramètres de croissance.....	55
V.8.1.1Longueur des tiges (cm).....	55
V.8.2. Biomasse fraîche produite (g).....	55
V.9.Analyse statistique des données.....	55

## **Chapitre VI : Résultats et discussion**

VI.1.Effet de la salinité et de l'acide salicylique sur les paramètres de germination chez la culture d'orge et de blé dur.....	56
VI.1.1.Effet sur le taux de germination.....	56
VI.2.Effet de la salinité et de l'acide salicylique sur les paramètres de croissances chez la culture d'orge et de blé dur.....	57
VI.2.1.Effet sur le nombre de feuilles.....	57
VI.2.2.Effet sur la longueur des tiges (cm).....	57
VI.2.3.Effet sur la biomasse fraîche de la partie aérienne (cm).....	58
VI.2.4.Effet sur la biomasse fraîche de la partie racinaire (cm).....	59
Conclusion .....	60
Références bibliographiques.	

## Chapitre I : Généralités sur la culture d'orge

### I- Introduction

L'orge occupe le quatrième rang dans la production céréalière mondiale avec 136 millions de tonnes en 2007, après le blé, le maïs et le riz (**Anonyme b, 2008**). C'est une espèce adaptée aux systèmes de culture pratiqués en zones arides où elle constitue avec l'élevage ovin l'essentiel de l'activité agricole (**Menad, 2009**). Selon **Belaid (1996)**, l'orge est une espèce très rustique et peut donc être cultivée dans les zones marginales à sols plus ou moins pauvres, là où le blé ne peut donner des résultats satisfaisants. En outre, cette espèce est assez intéressante compte tenu de sa tolérance au sel et à la sécheresse. La période entre la moitié de novembre jusqu'à la moitié de décembre est considérée comme la période idéale pour sa culture. L'orge est souvent considérée comme une céréale secondaire, alors qu'elle a des potentialités voisines de celle du blé (**Mossab, 2007**). Toutefois, l'importance et les multiples usages de cette céréale lui confèrent une valeur stratégique dans l'alimentation animale comme plante fourragère et céréalière et lui permettent, en outre de jouer un rôle déterminant dans le comportement des marchés de l'ensemble des aliments du bétail (**Mossab, 2007**).

### I.1-Caractères taxonomiques et morphologiques

#### I.1.1- Caractères taxonomiques

D'après **Belarbi (2016)**, l'orge cultivée est appartenue à la classification suivante :

<b>Règne</b>	<i>Plantae</i>
<b>Classe</b>	<i>Liliopsida</i>
<b>Ordre</b>	<i>Poales</i>
<b>Famille</b>	<i>Poaceae</i>
<b>Genre</b>	<i>Hordeum</i>
<b>Espèce</b>	<i>Hordeum vulgare</i> L.

L'orge est une monocotylédone appartenant à l'ordre des *Poales*, à la famille des *Poacées* (*Graminées*) et au genre *Hordeum* (**Linné, 1753**). Sa classification est basée sur la fertilité des épillets latéraux, la densité de l'épi et la présence ou l'absence des barbes (**Linné, 1753**). Le genre *Hordeum* comprend 32 espèces. Les hybrides issus de croisements de *Hordeum vulgare* avec d'autres espèces de *Hordeum* sont stériles ou présentent des anomalies (**Von Bothmer et a.l., 1995**). L'orge cultivée (*H. vulgare*), est généralement une plante

diploïde ( $2n=14$ ) et nettement autogame (**Jestin, 1996**). Des formes tétraploïdes ( $2n=28$ ) peuvent apparaître spontanément, ou par traitement au laboratoire, mais elles n'ont aucun intérêt agronomique. La variabilité de l'orge cultivée est immense, avec des milliers de variétés-populations et des centaines de cultivars. Ces derniers se différencient selon le nombre de rangs de grains (2 ou 6), l'aspect des épis (lâche ou compact), ou la présence ou l'absence d'arêtes sur les lemmes. Tous les types sauvages possèdent des épis à deux rangs, ce qui signifie que sur les 3 épillets situés à chaque nœud, les deux latéraux sont stériles et seul celui du milieu forme une graine. La domestication a donné naissance à des types à 6 rangs où chacun des 3 épillets produit des grains (**Ceccarelli et Grando, 1996**).

Les variétés d'orge sont regroupées d'après les caractéristiques de leurs épis en deux grandes espèces (Figure 1) :

- Orge à deux rangs qui comporte un épi aplati composé de deux rangées d'épillets ; il n'existe en général dans cette espèce que des variétés de printemps.
- Orge à six rangs ou escourgeon qui possède trois épillets sur chaque axe de la tige et dont les grains sont plus petits. Cette espèce ne comporte pratiquement que des variétés d'hiver.

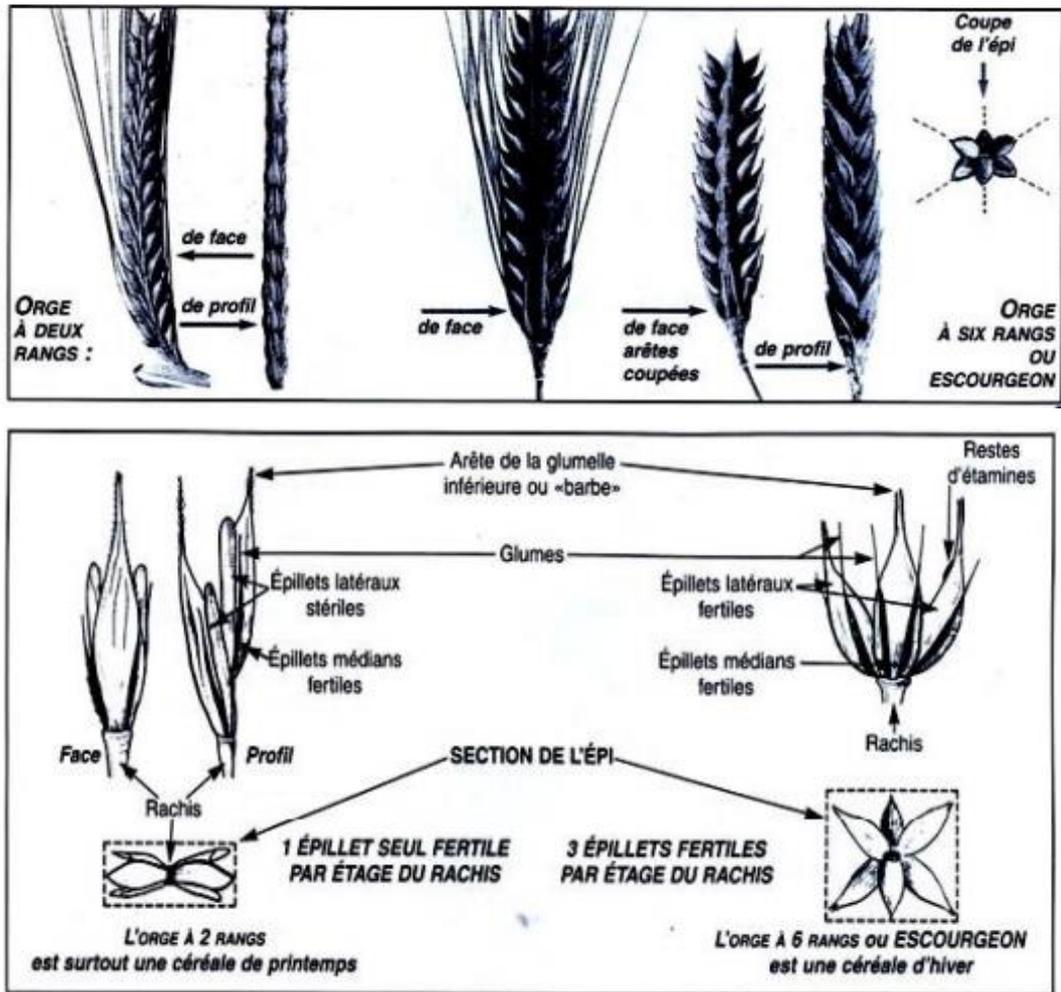


Figure 1 : Distinction entre l'orge à deux rangs et l'escourgeon (Simon et al, 1989)

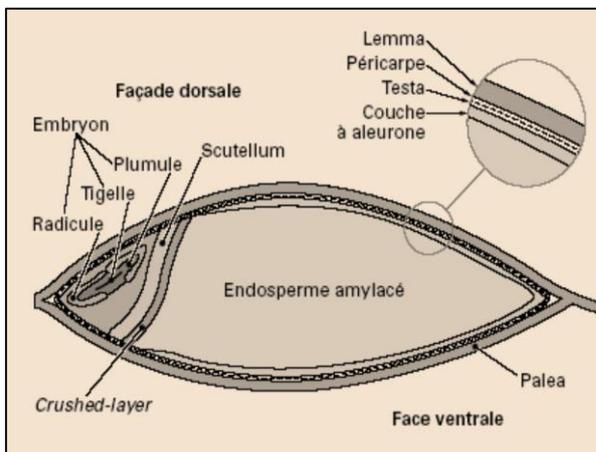
### I.1.2- Caractères morphologiques

L'orge (*Hordeum vulgare* L.) est une plante annuelle, autofécondée. Au stade herbacé, elle se distingue principalement des autres céréales par un feuillage vert clair, la présence d'une ligule très développée, des oreillettes glabres, et un fort tallage herbacé (Boulal et al., 2007). L'appareil racinaire fasciculé est peu développé. Deux systèmes se forment au cours du développement : un système primaire et un système secondaire, le premier ou système de racines séminales fonctionne de la germination à la ramification de la plantule (tallage). Les racines séminales ne restent pas longtemps fonctionnelles et sont remplacées par un système de racines adventives qui assureront la nutrition et le développement de la plante (Simon et al., 1989). La plante a une tige cylindrique et creuse, entrecoupée de nœuds là où se forment les feuilles (Gomez- Macpherson, 2001). Ces dernières sont à nervures parallèles et formées de deux parties : la partie inférieure entourant la jeune pousse ou la tige

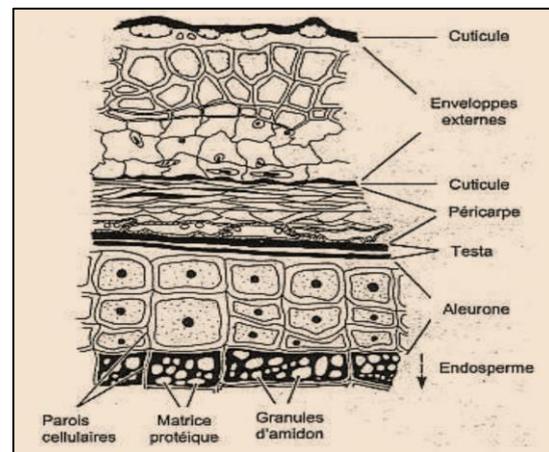
(la gaine), la partie supérieure en forme de lame (le limbe) (Belaid, 1986). L'appareil reproducteur formé de fleurs groupées en inflorescences, constitue un ensemble d'unités appelées épillets. Chez l'orge, l'épi est constitué d'un axe (rachis) sur lequel sont fixés les épillets (Gomez-Macpherson, 2001). Le grain est un caryopse à glumelles adhérentes chez les variétés cultivées. Une coupe transversale du grain, montre les mêmes assises de cellules que chez le blé, cependant l'assise à aleurone comportent trois couches de cellules au lieu d'une seule (Clement-Grandcourt et Prats, 1971).

## I.2. Histologie

L'orge est une graine vêtue ; les glumelles adhèrent au grain et ne s'en séparent pas au battage. Les figures 2 et 3 présentent des coupes longitudinale et transversale d'un grain d'orge



**Figure 2 :** Coupe longitudinale d'un grain d'orge (Société Malteurop, 2000)



**Figure 3 :** Coupe transversale des enveloppes, de la couche à aleurone et de l'endosperme amylicé d'un grain d'orge (Palmer, 1989).

Les principales parties constituant un grain d'orge sont, de l'intérieur vers l'extérieur :

- l'embryon (plantule complète) ;
- l'endosperme (réserve de matières nutritives) ;
- la couche à aleurone, périphérique (réservoir enzymatique) ;
- le péricarpe - testa (membrane semi-perméable) ;
- et la paroi externe.

### **I.2.1. Embryon**

Il est formé principalement par une radicule, une tigelle et une plumule. Situé principalement sur la face dorsale du grain, il est séparé de l'endosperme par le scutellum qui a une fonction de sécrétion et permet la diffusion des enzymes hydrolytiques de l'embryon vers endosperme. Les principaux sucres de l'embryon sont le saccharose et le raffinose. Ils représentent 25% du poids sec de l'embryon.

### **I.2.2. Endosperme**

L'albumen (endosperme) représente l'organe de réserve de l'orge. Il est constitué de cellules mortes remplies de granules d'amidon entourés de protéines.

### **I.2.3. Couche à aleurones**

Elle se renferme, dans sa partie la plus externe, de l'amidon et des protéines, et dans sa partie interne, des lipides (30%), des protéines (20%), de l'acide phytique, des vitamines du groupe B, de la cellulose, des pentosanes, des B-glucanes dans les parois cellulaires, mais pas d'amidon.

### **I.2.4. Péricarpe- testa**

Le péricarpe est séparé de l'enveloppe par une couche cireuse et est soudé à la testa par une couche de cellules à parois lignifiées. Le péricarpe est composé majoritairement de cellulose (20%) mais contient également 6% de protéines, 2% de cendres, 0,5% de lipides et de pentosanes.

### **I.2.5. Glumelles**

La glumelle dorsale ou lemma possède une paroi épaisse, alors que la glumelle ventrale ou palea a une paroi plus fine. Les glumelles protègent la plumule qui va se développer au cours de la germination et constituent donc un avantage pour l'orge par rapport à d'autres graines qui n'ont pas d'enveloppes. Les glumelle sont très riches en celluloses et hémicelluloses, et représentent 10 à 20% du poids sec de la graine.

### **I.2.6. Paroi externe**

Elle entoure complètement le grain sauf aux deux extrémités. Elle doit être intacte pour permettre une absorption d'eau homogène lors du trempage, pour protéger l'embryon des infections pendant la germination (**Guiga, 2006**).

### **I.3. Composition biochimique du grain d'orge**

Cette composition est mentionnée dans le tableau suivant :

**Tableau 1 :** Composition biochimique du grain d'orge

Constituants biochimiques	Orge (Teneur en % du poids sec)
Glucides	78-85
Amidon	63-65
Saccharose	1-2
Sucres réducteurs	0,1 - 0,2
Polysaccharides solubles dans l'eau (gommes)	1-1,5
Polysaccharides solubles dans les solvants organiques (hémicelluloses)	8-10
Cellulose	4-5
Autres	1
Lipides	2-3
Protéines	8-11
Albumine	0,5
Globuline	3
Hordéine	3-4
Glutéline	3-4
Acides aminés et peptides	0,5
Acides nucléiques	0,2-0,3
Sels minéraux	2
Autres dont lignine...	5-6

(Allosio-Ouarnier, 1999).

### **I.4. Développement et reproduction**

Sur le tableau 2, les différents stades de développement de l'orge sont indiqués. Selon **Jestin (1992)**, les caractéristiques de végétation et de reproduction de l'orge les plus marquées concernent :

- Une propension plus forte au tallage, avec une paille souvent plus fragile ;

- Un cycle semi maturité souvent plus court ;
- Une capacité de survie au froid est faible.

Soltner (1988), ajoute d'autres différences, comme :

- Les exigences en eau sont élevées au début de la végétation puis devient moins modérée à la fin de cycle ;
- C'est une culture qui préfère un sol léger et calcaire.

**Tableau 2 :** Différents stades de développement de l'orge (*Hordeum vulgare* L.)

Stade		Echelle de Feeks	Caractéristiques
	Levée	1	1 <sup>ère</sup> feuille perce le coléoptile 3 feuilles
	Début tallage	2	Formation de la 1 <sup>ère</sup> talle
	Plein tallage	3	2 à 3 talles
	Fin tallage	4	
	Epi à 1 cm	5	Sommet de l'épi distant de 1 cm du plateau de tallage
	1 à 2 nœuds	6	01 nœud elongation de la tige
		7	2 nœuds
	Gonflement	8	Apparition de la feuille
	L'épi gonfle	9	Ligule juste visible
	La gaine de la dernière feuille	10	Gaine de la dernière feuille sortie
	Epiaison	10 - 1	Sortie des barbes
		10 - 2	¼ épiaison
		10 - 3	½ épiaison
		10 - 4	¾ épiaison
		10 - 5	Tous les épis sortis
	Formation du grain	11 - 1	Grain laiteux
		11 - 2	Grain pâteux
		11 - 3	Grain dur
		11 - 4	Grain mûr

(Aït-Rachid, 1991)

## **I. 5. Cycle de développement**

Selon (Moule, 1971), le cycle de développement comprend trois grandes périodes :

- Une période végétative qui va de la germination aux premières manifestations de l'allongement de la tige principale, c'est-à-dire au début de la montée.
- La période reproductrice allant du début de la montée à la fécondation.

La période de maturation allant de la fécondation à la maturité complète du grain

### **I.5.1. Période végétative**

#### **1.5.1.1. Germination**

C'est le premier stade de croissance qui représente une période transitoire au cours de laquelle la graine qu'était à l'état de vie latente, manifeste une reprise des phénomènes de multiplication et d'allongement cellulaire (Benbada, 2013). Pendant la germination, la plantule utilise pour la couverture de ces besoins énergétiques les réserves de la graine, qui sont transformés, sous l'action d'enzymes appropriées, en substances directement utilisables pour la croissance (glucose, maltose et acides aminés).

#### **A. Paramètres de la germination**

Les deux processus fondamentaux intervenant lors de la germination (hydrolyses enzymatiques dans l'amande et synthèses dans le germe) sont fortement influencés par la température, l'aération, la durée et l'humidité régnant au cours de cette étape.

##### **A.1. Influence de l'humidité du grain**

Pour que l'embryon puisse continuer sa croissance pendant la germination, il récupère une partie de l'eau présente dans l'endosperme entraînant ainsi un dessèchement progressif du grain (environ 0,5 % d'humidité est perdue par jour de germination, (Narziss, 1970). Il est nécessaire de maintenir l'humidité du grain autour de 45%. Pour cela, des arrosages peuvent être pratiqués et l'humidité ambiante est maintenue à environ 100%.

##### **A.2. Influence de la température de l'air**

La température de la germination est un paramètre difficile à optimiser. En effet des températures basses permettent de bonnes activités enzymatiques alors que les températures élevées permettent d'accélérer la germination et la production d'enzymes au début de cette étape. Cependant, ces dernières sont dénaturées par la suite. Il est donc nécessaire de trouver un optimum entre 16 et 20°C.

##### **A.3. Aération**

Elle agit sur la respiration et donc sur les biosynthèses. Il faut par conséquent la limiter si on veut limiter les freintes. La consommation d'oxygène est de 2 à 3 fois plus rapide en germination qu'en trempe (**Dalshstrom et al., 1963**). Le quotient respiratoire du grain augmente rapidement après la trempe pendant 8 heures, pour se stabiliser 20 heures avant de ré-augmenter jusqu'au cinquième jour de germination (**Waller, 1967**).

### **B. Durée de la germination**

Elle dépend de la variété d'orge du type d'installation utilisé et dure entre 4 à 6 jours. Un allongement de la durée de germination favorise la désagrégation du grain et augmente l'activité enzymatique (**Narziss, 1969**).

#### **I.5.1.2. Levée**

Selon **Soltner (2007)**, cette étape vient après la germination, avec la croissance de la racine, de l'axe hypocotyle (Dicotylédones) ou de la coléoptile (Monocotylédones) et de la gemme, ou de la première feuille.

#### **I.5.1.3. Tallage**

Dès que la première feuille a percé l'extrémité de la coléoptile, celui-ci s'arrête de croître et peu à peu se dessèche. Cette première feuille fonctionnelle s'allonge, puis apparaît une deuxième, puis une troisième, puis une quatrième feuille. Chacune d'elles est imbriquée dans la précédente, partant toutes d'une zone proche de la surface du sol et constituée de l'empilement d'un certain nombre d'entre-nœuds : le plateau de tallage (**Moule, 1971**).

### **I.5.2. Période reproductive**

#### **I.5.2.1 Montaison**

Ce stade est repérable une fois l'ébauche l'épi prend sa forme définitive à l'intérieur de la gaine de la feuille étandard qui gonfle (stade gonflement) (**Zibouche et Grimes, 2016**).

#### **I.5.2.2. Epiaison**

C'est la période allant de l'apparition des premiers épis jusqu'à la sortie complète de tous les épis hors de la gaine de la dernière feuille (**Giban et al., 2003**).

#### **I.5.2.3. Floraison**

C'est la sortie des premières étamines hors des épillets au milieu de l'épi sur 50% des épis la formation du grain se fait quand les grains du tiers moyen de l'épi parviennent à la moitié de leur développement. Ils se développent en deux stades :

- Le stade laiteux où le grain vert clair, d'un contenu laiteux atteint cette dimension définitive ; (le grain contient 50% d'humidité et le stockage des protéines touche à sa fin).

- Le stade pâteux où le grain, d'un vert jaune, s'écrase facilement ; (le grain a perdu son humidité et l'amidon a été constitué).

#### I.5.2.4. Maturité complète

La teneur en humidité atteint environ 20% ; le grain est mûr et prêt à être récolté, c'est alors la période des moissons (Zibouche et Grimes, 2016).

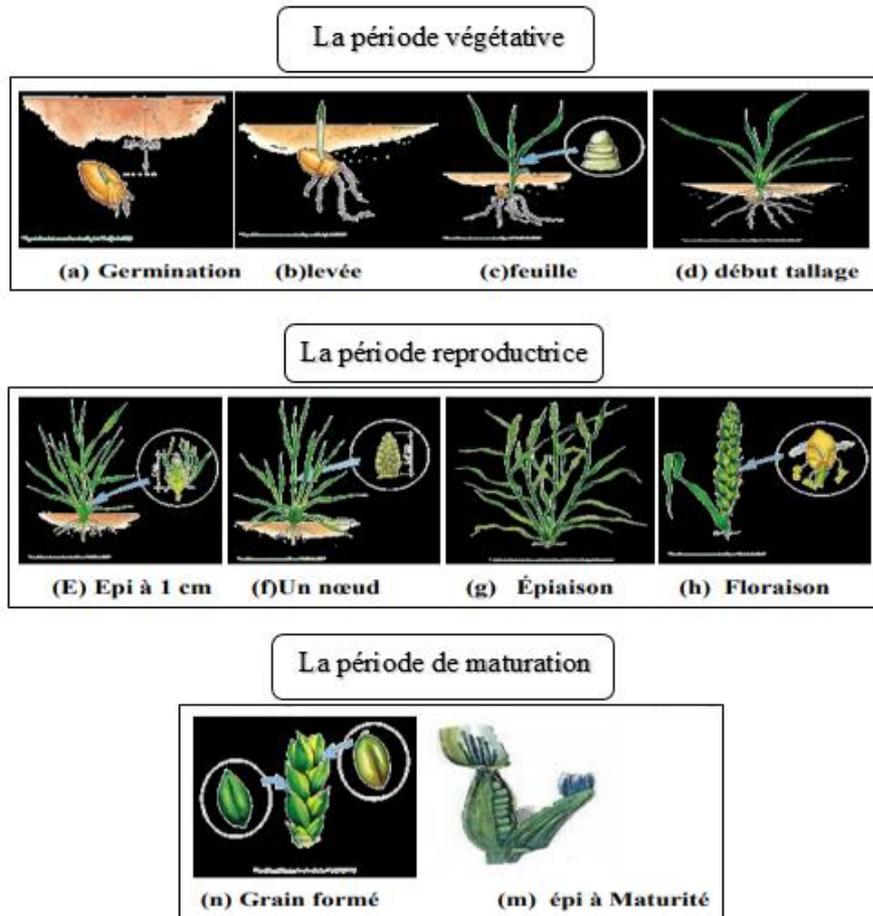


Figure 4 : Différents stades de développement de l'orge (Soltner, 2005).

### I.6. Production de l'orge

#### I.6.1. Production dans le monde

L'orge constitue la quatrième céréale cultivée au niveau mondial après le maïs, le blé et le riz (Schulte et al., 2009). Sur une moyenne des 50 dernières années, le Canada en est le 3<sup>ème</sup> producteur mondial, derrière la Russie et l'Allemagne (FAO, 2017). Pour la campagne 2015-2016, la production mondiale d'orge est estimée à 148.30 millions de tonnes, La production est en recul par rapport aux campagnes précédentes. Cette diminution

est due en partie à la réduction de la superficie emblavée (-10%), mais aussi à une baisse de rendement due aux aléas climatiques dans certaines régions (Tableau 3). L'Union européenne est de loin le principal producteur d'orge, avec près de 90 millions de tonnes ou 72.70% du total. Les plus gros exportateurs d'orge sont l'Union européenne, l'Australie et le Canada. Les plus grands importateurs sont l'Arabie saoudite, la Chine et le Japon.

**Tableau 3** : Production mondiale d'orge en millions de tonne de 2011 à 2016 (Mt)

<b>Pays</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>
Fédération de Russie	16.90	14.00	15.40	20.40	17.50	18.00
Allemagne	8.70	10.40	10.30	11.60	11.60	10.70
Canada	7.90	8.00	10.20	7.10	8.20	8.70
France	8.80	11.30	10.30	11.70	13.10	10.30
Ukraine	9.10	6.90	7.60	9.00	8.30	9.40
Turquie	7.60	7.10	7.90	6.30	8.00	6.70
Australie	8.00	8.20	7.50	9.20	8.60	9.00
Autre	65.20	66.30	74.20	69.10	72.80	68.40
Production totale	132.20	132.20	143.40	144.50	148.30	141.30

(FAO, 2017)

### **1.6.2. Production nationale**

En Algérie, La culture de l'orge est pratiquée essentiellement sur les Hauts plateaux (**Kadi, 2012**). Près de (35%) de la superficie céréalière est consacrée à la culture de l'orge qui est concentrée entre les isohyètes 250 et 450 mm (**Menad et al., 2011**). Confrontée à des contraintes d'ordre climatiques et techniques, la production algérienne d'orge est faible et surtout variable dans l'espace et le temps (**Bouzerzour et Benmahammed, 1993**). L'orge est la deuxième céréale cultivée après le blé dur, sur les 115 années (1901-2016), la moyenne de rendement de l'orge stagne à une valeur de 9.54 qx/ha. Elle varie en fonction des années de 1.3 qx/ha (en 1945) et 17.61qx /ha (en 2009). Le suivi de l'évolution de la production met en évidence l'importance des fluctuations inter annuelles. La production se caractérise par une grande variabilité allant de 1.9 millions de quintaux en 1966 à 22,3 millions quintaux et 9,2 millions quintaux en 2009 et en 2016 respectivement (Tableau 4). Cependant, ces dernières années, la production nationale de l'orge a progressivement augmentée car plusieurs programmes et projets ont été mis en place pour l'amélioration de la production de l'orge. Depuis 2009, l'Algérie est devenue auto-suffisante en production d'orge. L'Office

National Interprofessionnel des Céréales (OAIC) a été autorisé par le Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural à exporter une partie de la production record d'orge de 2009. C'est la première fois, depuis 1970, que l'Algérie se positionne sur le marché international pour écouler sa production (**Anonyme, 2010**). En revanche, la récolte céréalière de 2014 et 2016 (Tableau 4) a été affectée par une baisse importante de la production d'orge. Cette réduction de production est due à nombreux facteurs : l'abandon de la culture de l'orge par les agriculteurs au profit du blé, l'insuffisance et l'irrégularité de la pluviométrie, le faible potentiel des variétés cultivées et surtout les maladies parasitaires qui provoquent chaque année des pertes considérables du rendement.

**Tableau 4** : Production des céréales et d'orge en Algérie de 1900 à 2016

<b>Années</b>	<b>Production 10<sup>6</sup> qx</b>	<b>Superficie 10<sup>6</sup> ha</b>	<b>Rendement qx/ ha</b>
1901-1910	9,2	1,4	6,6
1920	7,9	1,3	6.1
1930	7	1,1	6.4
1940	6,9	1,2	5.7
1950	5,6	1	5.6
1960	7,8	1,3	6
1970	4,42	0,7	5.88
1980	4,96	0,8	6.00
1990	7,20	1,0	7.02
2000	7,80	0,8	8.76
2010	10,98	0,8	13.43
2011	12,58	0,9	14.76
2012	15,92	1,0	15.45
2013	14,99	0,9	16.69
2014	9,39	0,8	11.83
2015	10,31	0,8	12.84
2016	9,20	0,7	13.02
Moyenne	8,95	0,97	9.54

**(FAO, 2017)**

### **I.7. Utilisations de l'orge**

L'orge est une céréale adaptée à l'alimentation des chevaux, de volailles, bovines et ovines car il contient plus de phosphocalcique, de protéines et aussi sa meilleure rentabilité économique. Cette culture est aussi cultivée pour l'industrie. La farine d'orge utilisée pour la fabrication du pain. Ainsi, pour la préparation des soupes, des crèmes et des décoctions, mais aussi ce qui est le plus surprenant pour du café sans caféine. L'orge peut être également consommée par les nourrissons puisqu'elle a de nombreuses vertus en contenant du

phosphore, du calcium, du fer, du potassium, du magnésium, des glucides complexes, des minéraux et de nombreuses vitamines (B1, B2, PP) et de la provitamine A. Cette céréale réduit le risque d'hypotension, de déminéralisation, d'affections pulmonaires, d'atonie gastrique, d'hépatisme, d'entérites, de diarrhées, d'inflammation des voies urinaires, d'états fébriles (Pierre, 2001).

## **I.8. Pathologie de l'orge**

### **I.8.1. Cycle de développement des maladies**

#### **A.1. Contamination**

Les maladies cryptogamiques sont transportées par le vent, la pluie ou par contact, les spores des champignons qui se disséminent et se déposent sur les plantes. Pour les maladies virales, elles sont transportées par les insectes, les nématodes et des champignons. En ce qui concerne, les maladies bactériennes elles sont disséminées par les insectes, le vent et l'eau. L'agent causal passe par les orifices naturels (stomates, lenticelles) ou pénètre par des blessures (notamment celles provoquées par des insectes), ou encore il est capable de traverser la cuticule (Brouillard, 2013).

#### **A.2. Période d'incubation**

L'agent causal se ramifie et envahit les cellules des tissus ou les espaces intercellulaires. Cette période prend de 24h à 72h selon le niveau de la sensibilité de l'hôte et des conditions climatiques (Ezzahiri, 2011). Après une période d'incubation, ils se développent et les premiers symptômes apparaissent (Brouillard, 2013). Accompagnée de la fructification du champignon, la plante attaquée peut dépérir (nécrose des tissus, détournement de la sève obstruction des vaisseaux).

### **I.8.2. Maladies fongiques de l'orge**

Comme toutes les autres plantes cultivées par l'homme, l'orge à paille peut être attaquée par grand nombre d'organismes parasites macroscopiques et microscopiques.

#### **I.8.2.1. Rhynchosporiose (*Rhynchosporium secalis*)**

C'est la maladie majeure de l'orge (figure 5). Elle est favorisée par le temps frais (12 à 14 degrés) et humide. Elle se développe sur les feuilles qui restent mouillées pendant de longues périodes de temps. Le degré d'infection est habituellement le plus élevé tout juste avant et durant l'épiaison (Lacroix, 2008).



**Figure 5 :** Tache provoquée par *Rhynchosporiose socialis* (Bafs, 2008).

#### **I.8.2.2. Strie foliaire (*Pyrenophora graminea*)**

*Pyrenophora graminea* est transmis par les semences. Des stries longitudinales de couleur jaunâtres puis brunes se développent à partir de la base de la feuille (figure 6) (Bouakaz et Oussaid, 2013). L'épiaison est médiocre et les grains sont mal remplis. Elle attaque les cultures d'hiver et de printemps (Difallah et al., 2009).



**Figure 6 :** Tache provoquée par *Pyrenophora graminea* (Bouakaz et Oussaid, 2013).

#### **I.8.2.3. Oïdium (*Erysiphe graminis*)**

*Erysiphe graminis* forme des plages de mycélium superficiel blanc puis gris sur les feuilles, les gains et les épis d'orge. Les feuilles restent vertes et actives pendant un certain temps après l'infection, puis les zones infectées meurent progressivement. Les conidies sont formées en grand nombre et se présentent sous forme de poudre blanche à la surface du mycélium (figure7) (Difallah et al., 2009).



**Figure 7 :** Taches provoquées par *Erysiphe graminis* (INRA, 2014).

#### I.8.2.4. Ramulariose (*Ramularia collocygni*)

Les tâches de la Ramulariose sont visibles sur les deux côtés de la feuille. Les tâches de la ramulariose se présentent comme de « mini-tâches » d'Helminthosporiose, mais elles sont plus claires, marrons, rectangulaires et suivent les nervures (figure8) (Difallah et al., 2009).



**Figure 8 :** Taches provoquées par *Ramularia collocygni* (INRA, 2014).

#### I.8.2.5. Charbon couvert (*Ustilago hordei*)

Le charbon couvert cause des pertes importantes à l'orge (Zillinsky, 1983). Les plantules sont contaminées de manière systémique par des spores portées à l'extérieur des semences ou persistantes dans le sol (figure 9). Les plantes malades sont rabougries et les grains sont remplis d'une masse de spores noires enveloppées par une membrane transparente jusqu'à la récolte (Difallah et al., 2009).



**Figure 9 :** Charbon couvert provoqué par *U. hordei* sur épi d'orge (Zillinsky, 1983).

#### I.8.2.6. Charbon nu (*Ustilago nuda*)

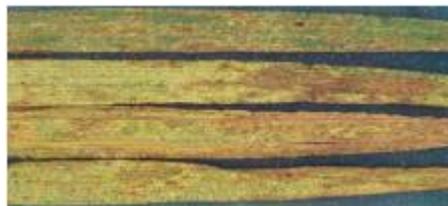
La maladie provoquée par cette espèce résulte de l'infection florale, et seuls l'orge et le blé sont sensibles. Après l'épiaison, Des spores noires sont libérées entre les glumes et les grains, et produisent une poussière noire libre (figure10) (Difallah et al., 2009).



**Figure 10 :** Un épi d'orge atteint de charbon nu déterminé par *U. nuda* (Zillinsky, 1983).

**I.8.2.7. Septoriose (*Septoria passerinii*) :**

La tache septorienne déterminée par *S. passerinii*, semble attaquer seulement l'orge cultivée et certaines espèces voisines sauvages (figure 11). La maladie est fréquente dans les régions septentrionales de l'Amérique du Nord, l'Europe et l'Asie, mais elle est la moins nocive des septorioses (Zillinsky, 1983).



**Figure 11 :** taches septorienne provoquées par *S. passerinii* (Zillinsky, 1983).

**I.8.2.8. Fusariose (*Fusarium graminearum*)**

La fusariose est l'une des maladies provoquée par *Fusarium graminearum* où les symptômes sont décelables peu après la floraison. Le champignon peut s'attaquer à la totalité ou à une partie de l'épi. Le blanchiment des épis où la fusariose apparaît de 3 à 5 jours après l'infection (figure 12) (Difallah et al., 2009).

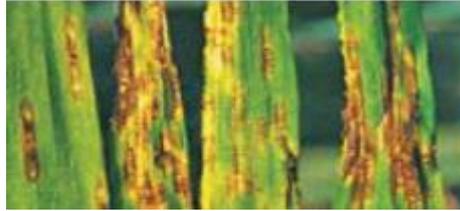


**Figure 12 :** taches provoquées par *Fusarium graminearum* (Lauzon et al., 2007).

**I.8.2.9. Rayures réticulées (*Pyrenophorateres*)**

La rayure réticulée est une maladie très fréquente chez l'orge. Les taches sont elliptiques d'un brun foncé, s'allongeant pour former des stries étroites et longues le long des nervures. De minuscules lignes horizontales plus foncées sont présentes formant un

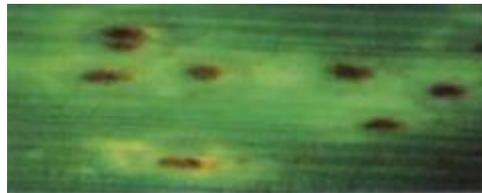
réseau ayant l'apparence d'un « quadrillé ». Un jaunissement peut se développer autour des stries (figure13) (Lacroix, 2008).



**Figure 13 :** tache provoquée par (*Pyrenophorateres*) (Bouakaz et Oussaid, 2013).

#### **I.8.2.10. Rouille naine (*puccinia simplex*)**

Pour les feuilles de l'orge (figure 14). Elle est très répandue dans plusieurs des régions du monde où on cultive l'orge, cependant les pertes sont en général légères. Le pathogène n'attaque que l'orge cultivée et les espèces voisines (Zillinsky, 1983).



**Figure 14 :** taches provoquées par (*puccinia simplex*) (Zillinsky, 1983).

#### **I.8.2.11. Helminthosporiose (*Helminthosporium gramineum*)**

Cette maladie qui n'affecte que l'orge est caractérisée par l'infection généralisée de l'hôte. La Présence de longues stries brunes sur les feuilles. Ces stries sont d'abord de couleur vert pâle, puis deviennent jaunes et enfin brun foncé (figure 15) (Zillinsky, 1983).



**Figure 15 :** taches provoquées par *Helminthosporium gramineum* (Augis et al., 2014).

### **I.8.3. Maladies virales**

Les maladies les plus importantes en incidence et en sévérité sur l'orge sont :

#### **I.8.3.1. La jaunisse nanisant de l'orge (JNO)**

C'est une maladie virale transmise par les pucerons bien connue des agriculteurs. En piquant la plante pour se nourrir, le puceron transmet le virus BYDV (Barley Yellow Dwarf Virus) aux plantes. Lorsque l'orge est agressée par la JNO, les dernières feuilles prennent

une couleur rouge lie de vin et les plantes sont rabougries par foyer (figure 16) (Amandine, 2003).



**Figure 16** : La jaunisse nanisante de l'orge de l'orge (Dehimat et al., 2011).

#### **I.8.3.2. Mosaiques**

Sont des maladies virales transmises par un vecteur, non pas par un ravageur aérien cette fois mais par le *Polymixa graminis*, une « plasmodiophorale », parasite des racines des céréales, très voisin des champignons de sol. Deux types de mosaïques s'attaquent à l'orge d'hiver. La mosaïque jaune, VMJO et la mosaïque modérée, VMMO (Amandine, 2003).

#### **I.8.4. Maladies bactériennes**

##### **I.8.4.1. Pseudomonas**

C'est un genre pathogène pour les céréales qui provoque des pourritures de la base des glumes est provoquée par cet agent pathogène.

##### **I.8.4.2. Xanthomonas**

Ce genre attaque les céréales en provoquant des rayures bactériennes par l'agent causal *xanthomonas campestris*pv. *Translucens* (Soltner, 1995).

**I.8.4.3. Clavibacter** : cause la mosaïque bactérienne du blé et de l'orge dont l'agent causal est *Clavibacter michiganensis* sub. espèce *sptesselerius* (Boukhris, 1992).

## Chapitre II : Généralités sur la culture de blé dur

### II. Introduction

Le blé (*Triticum sp.*) est une graminée annuelle aux racines fibreuses à tiges hautes et généralement creuses, portant des nœuds d'où partent des feuilles, des sommets de la tige portent une grappe des fleurs qui se transforme en grains (**Gate, 1995**). Les deux espèces les plus cultivées et les plus répandues dans le monde sont le blé dur, *Triticum turgidum var durum* L. et le blé tendre, *Triticum aestivum* L. Le blé dur se distingue de blé tendre par des caractères morphologiques, physiologiques, cytologiques et technologiques (**Hamadache, 2013**). Le blé dur est une espèce issue de croisement naturel entre *Triticum monococcum* (porteur de génome AA) et *Aegilops speltaoides* (porteur de génome BB) suivi d'un doublement chromosomique qu'a permis l'apparition d'un blé dur sauvage de type AABB, *Triticum turgidum ssp dicoccoïdes*, qui a ensuite évolué vers *Triticum turgidum ssp dicoccum* puis vers *Triticum durum* (blé dur cultivé) (**Liao et al., 2008**).

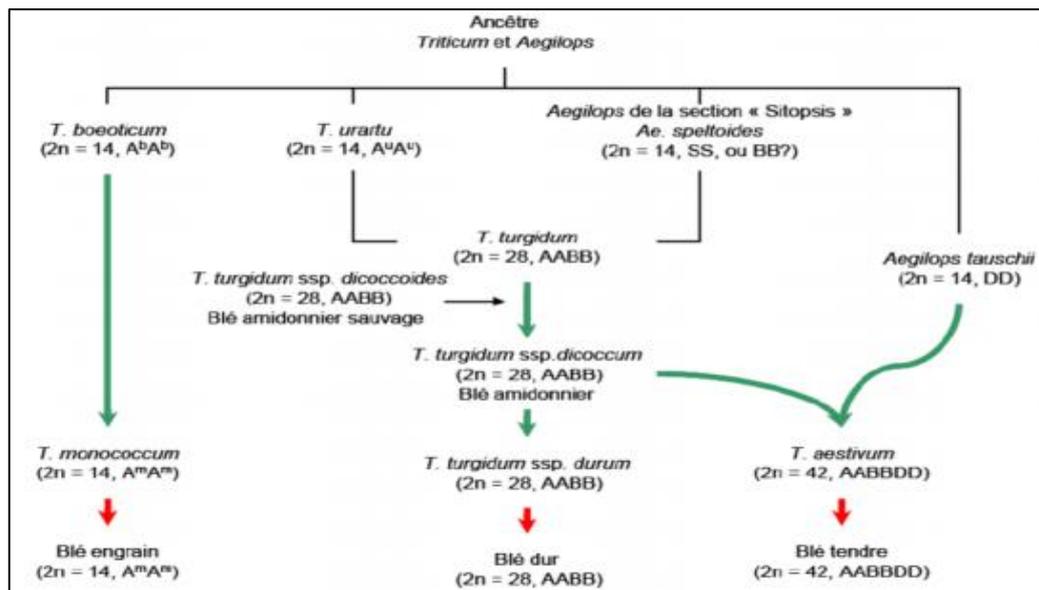


figure 17 : Phylogénies des blés (**Liao et al., 2008**).

#### II.1 origine géographique

Selon (**Vavilové, 2012**), le blé dur s'est différencié dans trois régions : le bassin occidental de la méditerranée, le sud de la Russie et le Proche Orient (Syrie et nord de la Palestine).

## II.2 Classification botanique

D'après (Feillet, 2000) Le blé dur est une plante herbacée, appartenant au groupe des céréales à paille, qui sont caractérisée par des critères morphologiques particuliers. Présentent dans le tableau suivant :

<b>Règne</b>	<i>Plantae</i>
<b>Classe</b>	<i>Monocotylédones</i>
<b>Ordre</b>	<i>Poales</i>
<b>Famille</b>	<i>Graminacée</i>
<b>Genre</b>	<i>Triticum</i>
<b>Espèce</b>	<i>Triticum durum Desf.</i>

## II.3 Morphologie de blé dur

### II.3.1. Appareil végétatif

Selon (Belaid, 1986), le blé dur se caractérise par deux systèmes de développement :

#### II.3.1.1. Système racinaire

On distingue deux sortes de racines : les racines primaires ou séminales issues de la semence qui se développent au moment de la germination, un système racinaire fasciculé assez développé, (racines adventifs ou coronaires) ; qui sont produites par le développement de nouvelles talles. Elles peuvent atteindre jusqu'à 1 m50 (Soltner, 1990)

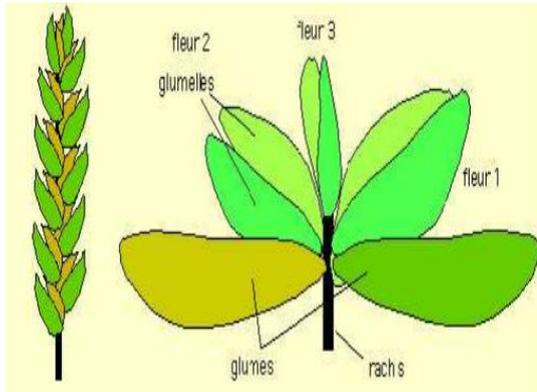
#### II.3.1.2. Tige et feuille

Le système aérien de la plante est formé d'un nombre de talles, partants d'une zone à la base de la plante appelée plateau de tallage, chaque talle, après développement complet de la plante est formée de tige et de feuilles. La tige du blé est une chaume creuse ou pleine de molle (Soltner, 1988), constituée d'entre-nœuds séparés par des nœuds ou zones méristématiques à partir desquelles s'allongent les entre-nœuds et servent comme point d'attache des feuilles (Hamadache, 2001). Les feuilles sont simples, allongées, alternées à nervures parallèles et comprennent deux parties : une portion inférieure enveloppant l'entre-nœud correspondant à la gaine, et une portion supérieure en forme de lame, c'est le limbe (Jouve et Daoudi, 2001). La structure d'une tige feuillée après la floraison d'une talle de blé (Moore et Moser, 1995).

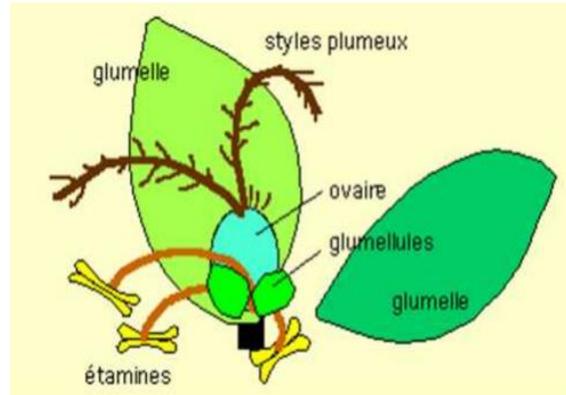
#### II.3.2. L'appareil reproducteur

Est une plante autogame ou à autofécondation, les fleurs sont groupées en inflorescence correspondant à l'épi. L'apex terminal, à partir d'un certain moment, cesse de

fabriquer les ébauches de feuilles pour initier des unités morphologiques de base (les épillets). L'épi de blé est formé de deux rangées d'épillets situées de part et d'autre d'un axe. Un épillet regroupe trois fleurs à l'intérieur de deux glumes, chaque fleur est entourée de deux glumelles (Figure 18) (Gate, 1995). Une fleur entourée de ses deux glumelles contient des pièces stériles, les glumelles, trois étamines et un ovaire surmonté de deux styles plumeux. L'ovaire, après fécondation de l'ovule, donnera le grain de blé (Figure 19) (Michèle et al., 2006).



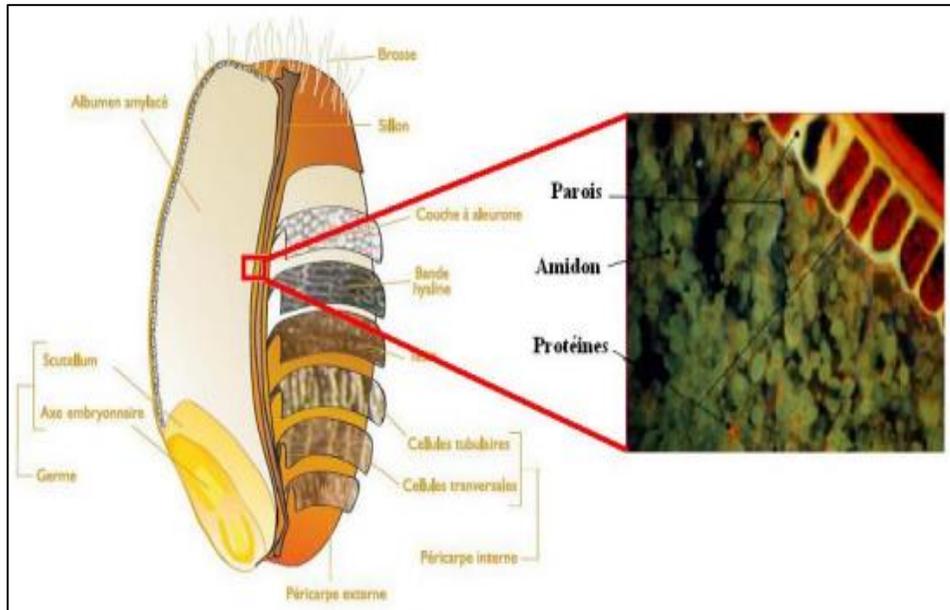
**Figure 18** : Epi et Epillet de blé (Michèle et al., 2006).



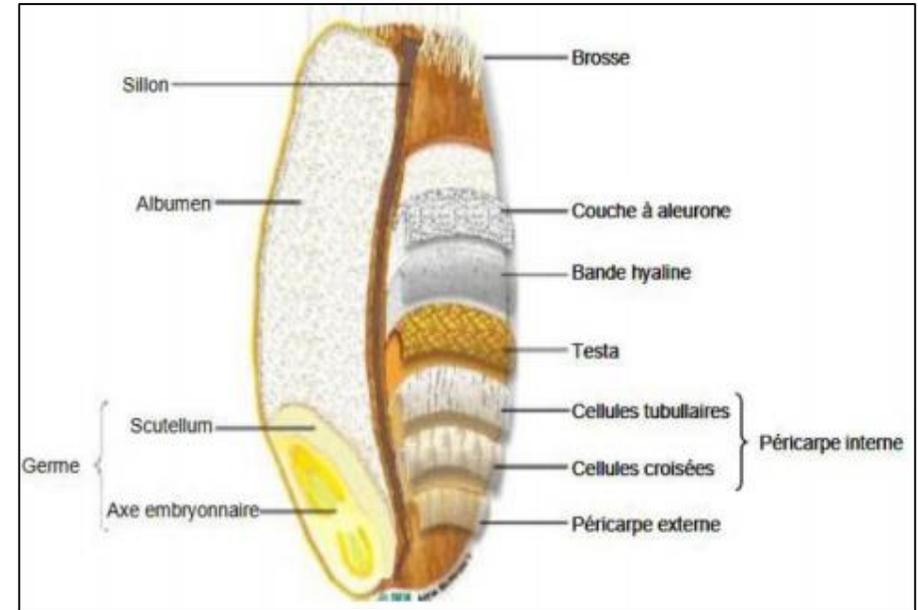
**figure 19** : Organe reproducteur de la fleur du blé (Michèle et al., 2006).

### II.3.3. Le grain

Est un fruit sec indéhiscent (caryopse) ovoïde, présente sur la face ventrale un sillon qui s'étend sur toute la longueur. Sa structure hétérogène est constituée d'une unique graine intimement soudée à l'enveloppe qui la contient. De la surface externe vers le centre du grain, on distingue l'enveloppe du fruit ou péricarpe, puis l'enveloppe de la graine, enfin à l'intérieur de la graine, l'albumen et le germe qui est surmonté par une brosse mesurant entre 5 et 7 mm de long, et entre 2,5 et 3,5 (Barron et al., 2012)



**Figure 20** : Coupe longitudinale présentant les constituants du grain de blé dur (Paul, 2007).



**Figure 21** : Structure histologique du grain de blé à maturité (SURGET et BARRON, 2005)

## II.4 Cycle de développement du blé

### II.4.1 Phase végétatif

#### II.4.1.1 Germination-levée

La germination se caractérise généralement par l'imbibition de la semence, la réactivation des enzymes et la dégradation des réserves assimilables par l'embryon. Le dégagement de la radicule des enveloppes séminales est suivi de la mise en place du nombre de plants par mètre carré. Ainsi, le sol est lors percé par un étui protecteur de la première feuille appelé la coléoptile. En ce qui concerne la levée, commence quand une première feuille paraît au sommet de la coléoptile. L'axe portant le bourgeon terminal se développe en un rhizome dont la croissance s'arrête à 2 cm en dessous de la surface du sol. Le rythme d'émission des feuilles est réglé par des facteurs externes comme la durée du jour et la température. La somme de température séparant l'apparition de deux feuilles successives est estimée à 100°C et varie entre 80°C pour le semis tardif et à 110°C pour le semis précoce. (Bebba, 2011).

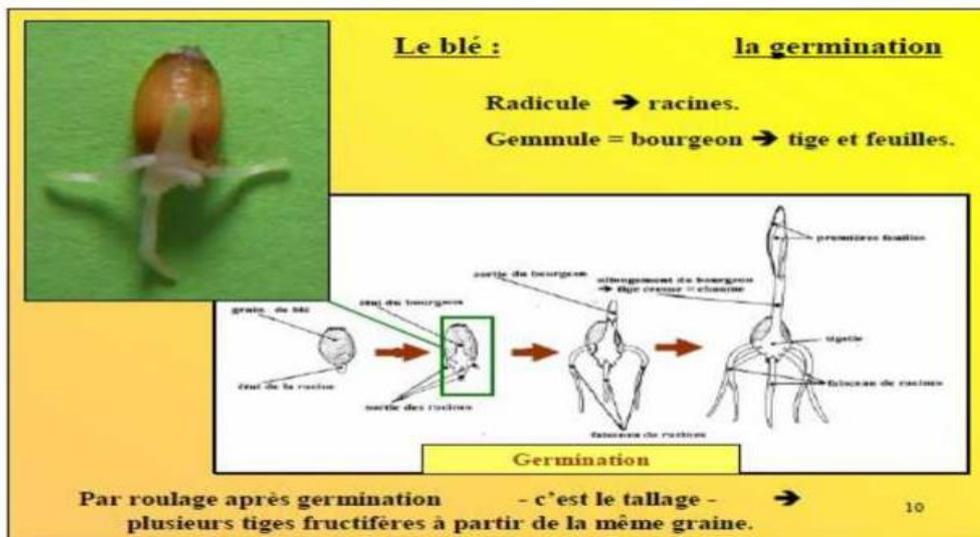


Figure 22 : Germination de grain du blé (Clerget, 2011).

#### II.4.1.2. Levé - Tallage

Cette phase s'amorce à partir de la quatrième feuille. Le début du tallage est marqué par l'apparition de l'extrémité de la première feuille de la talle latérale primaire puis d'autres talles naissent successivement à l'aisselle de la 2<sup>ème</sup> et la 3<sup>ème</sup> feuille de la tige centrale, l'ensemble restant court noué, formant un plateau de tallage situé juste au niveau du sol. Ces talles primaires peuvent ensuite émettre des talles secondaires, lesquelles à leur tour émettent

des talles tertiaires. Le fin tallage est celle de la fin de la période végétative, elle marque le début de la phase reproductive, conditionnée par la photopériode et la vernalisation qui autorisent l'élongation des entre-nœuds (**Oudjani, 2009**).

#### **II.4.2.Phase reproductrice**

##### **II.4.2.1.Montaison - gonflement**

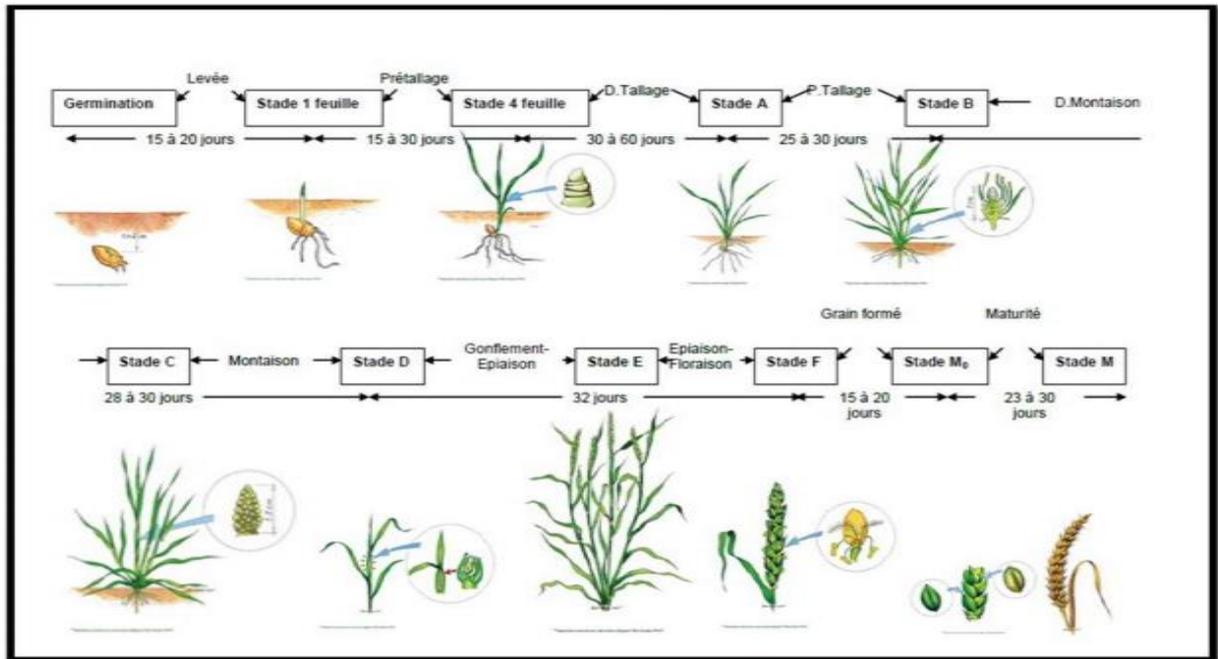
Est débuté à la fin de tallage. Elle est caractérisée par l'allongement des entrenœuds et la différenciation des pièces florales. A cette phase, un certain nombre de talle herbacée commence à régresser alors que d'autres se trouvent couronnées par des épis. Pendant cette phase de croissance active, les besoins en élément nutritifs notamment en azote sont accrus. La montaison s'achèvera la fin de l'émission de la dernière feuille et les manifestations du gonflement que provoquent les épis dans la graine (**Nadjem, 2012**).

##### **II.4.2.2.Epiaison-floraison**

Lorsque l'épi apparaît hors de la gaine de la dernière feuille, l'épiaison prend naissance. La floraison des épis dégainés se fait, généralement, entre 4 à 8 jours après l'épiaison (**Bahlouli et al., 2005**). Les basses températures au cours de ce stade réduisent fortement la fertilité des épis (**Abbassenne et al., 1998**).

##### **II.4.2.3 Remplissage du grain**

**Mazouz (2006)** précise que cette phase se compose de trois étapes successives La première étape correspond à une phase de multiplication des cellules du jeune grain encore vert. Les assimilés proviennent de la photosynthèse de la feuille étendard, et du transfert des hydrates de carbones non structuraux stockés dans le col de l'épi. La quantité d'eau contenue dans le grain tend à se stabiliser ; c'est le pallier hydrique. L'arrêt de la migration des réserves des feuilles et de la tige vers le grain est provoqué par les fortes températures au cours de cette période pouvant causer l'échaudage du grain. Puis vient la phase de dessèchement au cours de laquelle le grain perd de son humidité pour atteindre son poids sec final (**Wardlaw, 2002**).



**Figure 23** : différents stades de développement du blé (Cycle de SOLTNER ,2005).

### II.3 Exigences de la culture du blé

Les facteurs climatiques ont une action principale sur les différentes périodes de la vie du blé dur. Il est plus adapté aux régions à pluviométrie annuelle moyenne voire faible comme les régions arides et semi-arides. Les besoins en eau du blé dur sont de l'ordre de 250 mm d'eau. Ainsi, les sols qui conviennent le mieux à la production de blé dur doivent être bien aérés, bien drainés, profonds et comportent au moins 0,5% de matière organique avec un pH optimal de 5,5 à 7,5. Le blé dur est sensible à la salinité du sol (Brink et Belay, 2006).

### II.4.Importance du blé dur

#### II.4.1.Dans le monde

##### II.4.1.1. Répartition géographique

Les principaux pays producteur sont : La Chine, L'Inde, les Etats Unies, La Russie, Canada et France (Anonyme, 2010 in Ouanzar, 2012).

##### II.4.1.a production mondiale

La consommation totale du blé est stable et est maintenu à 688 millions de tonnes en 2014 du fait d'une consommation de 2% que connaît l'utilisation à des fins d'alimentation animale, à laquelle s'ajoute l'offre abondante de céréales secondaires affichant des prix plus

compétitifs, vient contre balancer la hausse de 1,4 % de l'utilisation à des fins d'alimentation humaine (FAO, 2007). Les stocks de blé sont de 180 millions de tonnes en 2014, soit une hausse de 14 pour cent (22 millions de tonnes) par rapport à l'année 2013. Le blé est la céréale la plus cultivée au monde (FAO, 2007). Confronté aux conséquences du risque lié au changement climatique associé à une population mondiale estimée à 9 milliards pour l'année 2050, le niveau de production actuel ne suffira pas pour répondre à la demande future (FAO, 2007).

Tableau5 : Productions de blé dur estimées à l'échelle mondiale (Mt)

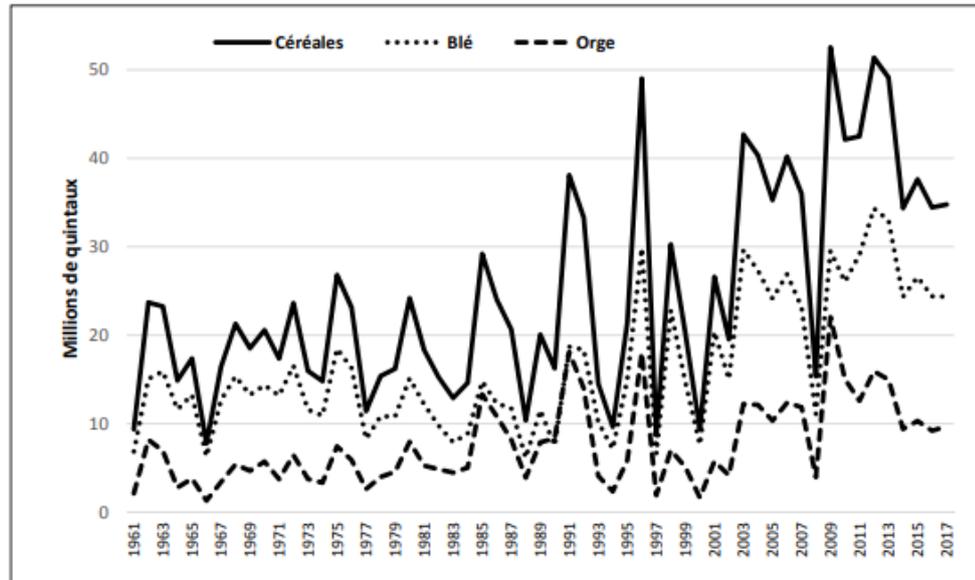
Années	2017/2018	2018/2019	2019/2020	2020/2021
Production (Mt)	761.6	732.0	774.8	785.8

(FAO 2021)

#### II.4.2 Production en Algérie

L'Algérie est la 5<sup>ème</sup> dans le classement mondial de consommation des céréales (Djermoun, 2009). La consommation alimentaire humaine des céréales occupe 60% de la ration alimentaire moyenne en Algérie elle est évaluée à 200 kg équivalent grain/ an/ hab. (Bencharif et al., 2009). La céréaliculture est la spéculation prédominante de l'agriculture algérienne. Elle s'étend sur environ trois millions d'hectares dans un système biennal dominant jachère-céréale (Laala et al. 2006). La production du blé engendre des déficits de 70 % relativement aux besoins et se distingue par des variations interannuelles marquées (FAO, 2014). En effet, pour combler le déficit de la production du blé et assurer les besoins de la population, l'Algérie importe de grandes quantités de blé. L'évolution moyenne de la production du blé, de l'importation et de la consommation au cours de ces onze dernières années est de l'ordre de 2,8 MT, 5,7 MT et de 8,3 MT respectivement (CIC, 2014).

L'évolution est illustrée en figure24. Pour répondre aux besoins d'une population en croissance, le pays importe de grandes quantités de blé et figure parmi les grands importateurs mondiaux du blé. Les importations représentent plus du double de la production nationale (Figure1). La faiblesse de la performance de la céréaliculture algérienne reste liée à diverses contraintes et le manque d'eau est le principal facteur pénalisant la production (Chennafi et al. 2006). Les contraintes de la production céréalière sont le non-respect de l'application de l'itinéraire technique associée à l'utilisation de variétés non performantes et à la mauvaise gestion des pratiques culturales (Belagrouz, 2013).



**Figure 24 :** Production de céréales en Algérie pendant la période 1961-2017

#### II.4.2.1. Répartition géographique

**Djaout (1995)**, note que les zones céréalières sont en général caractérisées par des précipitations de l'ordre de 350 à 600 mm. Dans cet intervalle on cite : Alger, Annaba Constantine, Guelma, Médéa, Mostaganem, Saida, Sétif et Tiaret ; la culture des céréales et plus particulièrement celle du blé dur, est l'activité principale de l'agriculture algérienne avec une surface agricole utile de 8423340 ha (**MADR, 2009**), le blé dur a occupé près de 18% de cette surface en 2008 et qui a augmenté en 2009 à 37.7%.

## Chapitre III :

### Généralité sur le phénomène de la salinité

#### III.1. Introduction

La salinité peut être définie comme étant la quantité globale des sels contenus dans la solution du sol (**Imalet, 1979**). C'est l'un des facteurs qui affectent en grande mesure la fertilité et la productivité des sols, en diminuant le rendement des cultures, en particulier dans les zones méditerranéennes ou bien dans celles où les cultures dépendent de l'irrigation (**Middleton et Thomoa, 1992**). Elle constitue un facteur limitatif majeur de la productivité agricole, ces charges en sels soumettent les plantes à un stress permanent (**Gupta et Abrol, 1990**). Elle constitue l'un des facteurs abiotiques les plus répandus au niveau de la planète et qui limite fortement les rendements agricoles, notamment dans les régions arides et de semi arides, où les précipitations sont limitées et ne sont pas suffisantes pour transporter les sels du profil racinaire des plantes (**Khales et Baaziz, 2006**). 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**). Le stress salin peut directement ou indirectement affecter le statut physiologique des plantes en changeant le métabolisme, la croissance et le développement des plantes (**GARG et al., 2002**).

#### III.2. Salinité des sols

La salinité affecte la production agricole et sa qualité dans les régions arides et semi arides, où les plantes (**SCHULZE et al., 2005**). En Afrique du nord, la salinisation affecte surtout les régions irriguées et les parties basses sujettes à des taux d'évaporation importants. Dans ces régions, il existe un risque important de salinisation des nappes (**CONACHER et al., 1998**). La salinité peut être définie comme étant un processus écologique suivant lequel le sol s'enrichit anormalement en sels solubles acquérant ainsi le caractère salin (**GREGORY, 2005**). Un sol salé est caractérisé par un surplus de sels est en particulier l'ion  $\text{Na}^+$  dans le profil (**SCHUT, 1996**). La formation d'un sol salin résulte généralement de l'accumulation de sels dans les horizons de surface (**ESSINGTON, 2004**). Ce processus dépend essentiellement du régime hydrique du sol et des sources de sel. Lorsque le climat est chaud et sec, entraînés par les eaux capillaires suivant le flux d'évaporation, les sels sont accumulés en surface. Les sels les plus communs présents dans la solution du sol correspondent aux cations  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ , et aux anions  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^-$ ,  $\text{CO}_3^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ .

D'autres sels moins courants et plus toxiques à faibles concentrations sont également à considérer. Ces éléments traces sont le bore, le sélénium, l'arsenic et le molybdène (GREGORY., 2005). Généralement la salinité d'un sol est mesurée par la conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée à 25°C (KENFAOUI, 1997) en effet, un sol est considéré salé quand sa conductivité électrique devient supérieure à 4millimhos.cm<sup>-1</sup> (HALITIM, 1986).

### **III.3. Origines et cause de la salinité**

#### **III.3.1. Origine primaire**

C'est un phénomène naturel. Les causes peuvent être développés suite aux processus géologiques, hydrologiques et pédologiques naturels, climatique où géochimique (SCHWARTZ, 2007). 80% des terres salinisées ont une origine naturelle. On parle donc de salinisation « primaire » due aux sels se formant lors de l'altération des roches où à des apports naturels externes (MASHALI *et al.*, 2005). Durant les périodes de sécheresse, l'eau et les électrolytes qu'elle contient remontent par capillarité. L'eau évaporant, les sels vont s'accumuler en surface pour être à nouveau lessivés par la pluie. Avec hétérogénéité spatiale et temporelle impliquée dans cette circulation de l'eau entre le sol et l'atmosphère, les concentrations en sels de surface montrent une grande variabilité qualitative et quantitative (GREGORY, 2005). La présence naturelle de sels tel que NaCl, NaSO<sub>4</sub>, CaCl<sub>2</sub> sur d'importantes surfaces du globe contribue de manière remarquable à la salinisation des sols arables et exerce un effet dépressif sur la croissance des plantes, à partir d'un certain seuil, qui varie d'une espèce à l'autre (LOPEZ., 1996).

#### **III.3.3. Origine secondaire**

L'utilisation des grandes quantités d'eau d'irrigation, causant ainsi une salinisation secondaire (PESSARAKLI, 1999). Cette salinisation est due à une mauvaise conduite de l'irrigation. En effet, les eaux peuvent être chargées en sels qui s'accumulent dans le sol. Une fertilisation chimique excessive contribue aussi à une accumulation des sels dans la rhizosphère (MASHALI *et al.*, 2005). La présence de fortes doses de sels dans le sol surtout avec un mauvais drainage constitue un immense danger pour l'agriculture car elle conduit généralement à une dégradation des sols, une baisse de leur fertilité et elle occasionne une toxicité aux végétaux ce qui réduit le nombre d'espèces dont la culture est possible sur ces terres (OMAMI., 2005).

### III.4. Plantes face au stress

On appelle stress toute pression exercée par un paramètre, perturbant le fonctionnement habituel de la plante. Certains physiologistes qui étudient les stress estiment que ce concept est trop restrictif, parce qu'il suscite des questions sur les mécanismes adaptatifs qui permettent la croissance de plantes dans des environnements qui pourraient être considérés comme stressants. La salinité du sol peut avoir des effets néfastes sur les végétaux qui ne possèdent pas de tolérance à ce facteur abiotique. Elle peut entraîner 3 types de stress (**Levigneron et al., 1995**) :

- **Stress hydrique** : une forte concentration en sels augmente l'osmolarité de la solution du sol et donc diminue la disponibilité en eau pour la plante.
- **Stress ionique** : l'accumulation de sels dans les tissus peut perturber l'activité métabolique des cellules et causer une toxicité ionique.
- **Stress nutritionnel** : des compétitions existent entre certains ions pour les mêmes transporteurs. Une concentration trop forte de la solution du sol en un ion particulier peut altérer le prélèvement d'autres nutriments par la plante. Le sodium peut dès lors entrer en compétition avec le calcium et le potassium tandis que les ions chlorures peuvent entraver l'absorption du nitrate, phosphate et sulfate.

Les espèces sensibles à la salinité sont dites « **glycophytes** » alors que les espèces résistantes sont qualifiées « **halophytes** ». Parmi les espèces cultivées, seuls le cotonnier et la betterave ont des ancêtres potentiellement halophytes. Toutes les autres espèces sont des plantes glycophytes domestiquées à une époque où la culture de sols salins ne se justifiait pas, compte tenu d'une très faible pression démographique. La salinisation, entraînant des baisses de rendements agricoles des plantes glycophytes, est une des plus sérieuses menaces environnementales pour le futur de l'agriculture et donc pour la sécurité alimentaire. En effet, la salinité d'un sol constitue un facteur limitant majeur à la productivité de toutes les cultures importantes comme le blé et le riz. Les rendements moyens de ces espèces sont d'ailleurs de seulement de 20 à 50% des rendements potentiels qui pourraient être atteints dans des conditions optimales. En plus d'affecter le rendement en termes de biomasse, les qualités organoleptiques et visuelles des produits souffrent également de la salinité. Pour la plupart, ces pertes sont dues soit à la sécheresse soit aux problèmes de salinité des terres, deux facteurs qui risquent d'empirer dans le futur en raison des changements climatiques (**Wouyou et al., 2017**).

#### III.4.1. Stress osmotique

La première conséquence de la salinisation tient à la modification du potentiel osmotique de la solution du sol, lorsque la teneur en sels croît. Selon **Song et al (2005)**, plus la solution du sol est salée, plus la pression osmotique est élevée et plus il est difficile pour les racines d'extraire l'eau de la réserve du sol. Il en résulte ainsi un ralentissement de leur croissance. D'après **Chinnusamy et al.,(2004)**, la concentration en sels dépend de la teneur en eau du sol et augmente avec le dessèchement ; c'est pourquoi l'excès de sels qui affecte les plantes est atteint beaucoup plus rapidement dans un sol sableux que dans un sol argileux qui piège les ions  $\text{Na}^+$  via les charges négatives de l'argile.

#### III.4.2. Stress ionique

Lié à la composition en éléments du sol (carences ou toxicité en certains ions) : un déficit en N, P, MO, Cu, Zn, Fe, B,... peut avoir des conséquences importantes sur le développement des plantes. Un excès de minéraux AL, Na, Cl,... peut avoir des effets toxiques (**Monneveux et This ,1997**). Par titre des concentrations excessives de  $\text{Cl}^-$  d'ions dans la solution du sol peuvent causer peuvent provoquer une brûlure des extrémités des feuilles et un jaunissement prématuré de celles-ci. Cependant, les symptômes de toxicités typiques aux ions sodium  $\text{Na}^{2+}$  sont des brûlures de feuilles, le dessèchement et la mort des tissus sur les bords externes des feuilles, contrairement aux symptômes causés par des ions chlorures qui apparaissent normalement à l'extrême pointe des feuilles (**Maillard, 2001**). Selon **Chinnusamy et al., (2004)**, l'accumulation des ions toxiques  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  au niveau du mésophylle des feuilles, affecte la croissance et le métabolisme de la plante où le sel endommage les structures lipidiques et protéiques des membranes plasmiques. Ainsi la présence de ces ions perturbent l'activité enzymatique cellulaire principalement dans les tissus photosynthétiques (**Hasegawa et al., 2000**). **Chinnusamy et al., (2004)** voient que la toxicités ionique peut être le résultat du remplacement de  $\text{K}^+$  par  $\text{Na}^+$  au niveau des sites actifs de protéines induisant aussi un changement des structure protéiques et enzymatiques.

#### III.4.3.Stress nutritionnel

Selon **Snoussi et Halitim (1998)**, certains sels peuvent affecter la balance nutritionnelle chez les plantes s'ils sont présents en concentration excessive ou en proportion anormale. La présence excessive d'ions sodique, chlorique et borique peut provoquer une augmentation du pH du sol, ce qui a un effet indirect sur l'impossibilité d'absorption des ions ferreux, phosphate, zinc et manganèse indispensable pour la croissance des plantes

(Maillard, 2001). Des concentrations salines trop fortes dans le milieu provoquent une altération de la nutrition minérale des plantes (Haouala et al., 2007). D'après Haouala et al., (2007), l'accumulation des ions  $\text{Na}^+$  dans la plante limite l'absorption des cations indispensables tels que  $\text{K}^+$  et  $\text{Ca}^{2+}$ . Il y aurait une compétition entre  $\text{Na}^+$  et  $\text{Ca}^{2+}$  pour les mêmes sites de fixation apo-plasmique. Ainsi ; l'augmentation de la concentration en  $\text{Na}^+$  s'accompagne d'une réduction de la concentration en Mg, K, N, P et Ca dans la plante. Ce déséquilibre nutritionnel est une cause possible des réductions de croissance en présence de sels lorsque des ions essentiels comme  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  ou  $\text{NO}_3^-$  deviennent limitant (Haouala et al., 2007). Selon Jabnourne, (2008), les effets osmotiques du stress salin peuvent également limiter la croissance des racines, ce qui limite les possibilités d'absorption des éléments nutritifs du sol.

### III.5. Impacts de la salinité sur la plante

Les effets de la salinité sur les plantes sont complexes et ses conséquences incluent la toxicité par les ions (PANG et al., 2007), le déficit hydrique (DESCLOS et al., 2008), la déficience et le déséquilibre nutritifs (CHEN et al., 2007). La grande majorité des stress salins est provoquée par des sels de sodium, particulièrement le NaCl. De ce fait, les termes halophytes et glycophytes font essentiellement référence aux stress provoqués par un excès de  $\text{Na}^+$  (GREGORY., 2005). La première difficulté d'une plante en milieu salin est d'assurer son apport en eau. Pour cela, il faut que la plante puisse ajuster la pression osmotique de ses tissus par rapport à la pression osmotique du sol. Ce phénomène nommé l'épictèse, permet donc à la plante d'assurer une hypertonie constante (HELLER., 2004). A l'échelle agronomique, les risques de salinisation varient de 4 à 16 mmhos/cm. A partir de 8 mmhos/cm, la plupart des plantes cultivées ont leurs rendements fortement abaissés par la salinité. Seuls les végétaux halophiles prospèrent dans des milieux à salinité supérieure à 16 mmhos/cm (KENFAOUI., 1997). La salinité est l'un des facteurs limitant pour la croissance des plantes. Les effets de la salinité sont : l'arrêt de la croissance, le dépérissement des tissus sous forme de nécroses marginales, suivi par une perte de turgescence, par une chute des feuilles et finalement par la mort de la plante (Zid, 1982). La salinité provoque le plus souvent un retard dans le développement (Boukachabia, 1993) et d'une manière générale la hauteur, le diamètre des tiges des différentes espèces, ainsi que la grosseur des fruits, (Khan et al., 1997).

### III.5.1. Impacts de la salinité sur la croissance et le développement

Une inhibition de croissance est très souvent le premier symptôme de la toxicité saline. Cette altération peut résulter d'un impact du stress salin sur les taux de divisions cellulaires et/ou sur les cinétiques d'élongation (**Rivero et al., 2014**). La littérature foisonne de données montrant que la croissance des parties aériennes est souvent plus affectée que celle des parties racinaires et une augmentation du « root/shoot » ratio est ainsi souvent rapportée (**Albacete et al., 2008**). La salinité peut également réduire le rythme d'apparition des feuilles, la surface foliaire totale et accélérer les processus d'abscission. A l'échelle de la feuille, certaines dicotylées halophytes mettent en place un efficace processus de succulence leur permettant d'assurer une dilution des minéraux toxiques accumulés (**Ruan et al., 2010**).

Dans une perspective agronomique, le maintien des taux de croissance en conditions saline est en effet un objectif recherché. Cependant, une réduction de croissance n'est pas nécessairement synonyme de dégâts. En effet, par exemple, l'abscission de feuilles chargées en  $\text{Na}^+$  par suite d'une compartimentation intra-individuelle est une stratégie de résistance. Une autre est la réduction de la surface transpirante qui peut permettre de limiter les pertes en eau. Certaines stratégies de résistance sont coûteuses en énergie et il peut être stratégiquement plus utile pour la plante d'investir l'énergie métabolique dans la mise en place de systèmes de protection, plutôt que de poursuivre la production d'organes non-protégés (**Munns et Tester, 2008**). Les plantes halophytes évoluant dans leur milieu naturel ne sont pas toujours des plantes présentant des taux de croissance relative importants. Elles sont capables de répondre à une dose modérée de sel par une stimulation de croissance qui peut aussi s'interpréter comme une tentative de dilution du sel absorbé. La sensibilité au sel n'est pas uniforme au cours du développement de la plante. La germination semble peu sensible au sel ; la graine possède ses réserves qu'elle est capable de mobiliser moyennant une certaine hydratation qu'elle peut obtenir du fait de son très faible potentiel hydrique (**Almansouri et al., 2001**). En revanche, le stade juvénile est sûrement plus sensible à la salinité. Dès qu'elle initie son activité transpiratoire, la jeune plante absorbera en quantités importantes des ions potentiellement toxiques. Si elle est pourvue d'un endoderme incomplètement subérisé, et donc peu fonctionnel, des quantités importantes de  $\text{Na}^+$  peuvent compromettre très rapidement la survie de la plantule (**Wasti et al., 2012**). L'action spécifique du sel sur la formation et le développement des organes reproducteurs est très mal connue. La floraison est également considérée comme un stade très sensible à la salinité.

Des malformations au niveau des organes floraux sont cependant rapportées, de même qu'une réduction de la viabilité pollinique (**Ghanem et al., 2009**).

### III.5.2. Toxicité minérale

Une très vaste gamme de données expérimentales est disponible pour l'accumulation de  $\text{Na}^+$  au niveau de plantes exposées à la salinité. Le sodium n'est pas un élément essentiel pour les plantes en C3, mais il intervient au niveau des plantes en C4 dans la régénération du phosphoénol-pyruvate par la PEP case. Même dans ce dernier cas, les quantités requises sont infimes et le  $\text{Na}^+$  s'accumule en concentration potentiellement toxiques au sein des plantes exposées à la salinité. Le  $\text{Na}^+$  pénètre dans la plante par des transporteurs de  $\text{K}^+$  peu spécifiques : il en résulte une compétition entre ces deux ions et l'accumulation de  $\text{Na}^+$  peut donc s'accompagner d'une réduction des teneurs en  $\text{K}^+$ . Souvent, c'est le rapport  $\text{K}^+/\text{Na}^+$  qui est pris en considération comme un indicateur du niveau de stress ionique rencontré par la plante (**Blumwald, 2000**). Les teneurs racinaires en  $\text{Na}^+$  sont souvent plus élevées que celles des parties aériennes, ce qui témoigne d'une tentative de la plante de limiter la translocation d'un ion toxique vers des organes photo synthétiquement actifs. A l'échelle des parties aériennes, il n'est pas rare qu'une accumulation préférentielle de  $\text{Na}^+$  se déroule d'ailleurs au niveau des feuilles les plus âgées, préservant de ce fait les feuilles dont le métabolisme est vital pour la survie de la plante (**Lutts et al., 1999**). Une compartimentation peut également se mettre en place à l'échelle cellulaire : il est souvent admis que l'activation de transporteurs spécifiques permet une séquestration vacuolaire de l'ion  $\text{Na}^+$ , ce qui lui permet de ne pas interférer avec les enzymes cytosoliques (**Blumwald, 2000**). Chez plusieurs espèces halophytes, l'exclusion du sel vers des trichomes ou des glandes salines peut constituer un mécanisme efficace de résistance à la salinité (**Acosta-Motos et al., 2017**). Les données relatives à l'ion  $\text{Cl}^-$  sont beaucoup moins nombreuses : peu d'études consacrées au stress salin quantifient cet élément. Les connaissances à ce sujet demeurent très largement fragmentaires et définir les impacts de la toxicité des ions  $\text{Cl}^-$  demeure un axe de recherche très important. L'ion chlorure est essentiel pour la plante, il y intervient notamment dans la photolyse de l'eau. Les organismes végétaux possèdent des transporteurs spécifiques pour cet élément, lesquels sont à ce jour peu étudiés. Le fait que la présence de  $\text{Cl}^-$  inhibe l'absorption de nitrates tend à suggérer que certains transporteurs d'anions peu spécifiques interviennent dans l'absorption de  $\text{Cl}^-$  (**Estañ et al., 2005**). Il convient par ailleurs de souligner que la majorité des études consacrées à la réponse à la salinité chez les plantes

concernent le NaCl. Pourtant, en conditions naturelles, la salinité se définit sur base d'une conductivité électrique qui dépend de la concentration en ions, et non de leur nature. Il n'est pas rare de rencontrer, sur terrain salin, des problèmes de salinité associés à un excès de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, ou à la présence de KCl. Cette problématique est très largement négligée ce qui nuit à la transférabilité des acquis de laboratoire à des situations de champs (**Irakoze et al., 2019**).

### III.5.3. Statut hydrique

Comme précisé ci-dessus, le stress hydrique induit par la salinité résulte d'une faible disponibilité en eau liée à une réduction du potentiel osmotique externe. La plante est donc confrontée à une situation de « sécheresse physiologique ». Cette composante hydrique du stress explique en grande partie la réduction de conductance stomatique observée chez les plantes exposées au sel (**Munns, 2002**). Cette limitation de l'absorption et du transport de l'eau peut s'interpréter légitimement comme une tentative de réduire les pertes transpiratoires : la conséquence est de réduire du même coup l'apport de Na<sup>+</sup>, mais aussi de réduire l'activité photosynthétique du fait d'une limitation de l'apport de CO<sub>2</sub>. En conséquence, l'efficacité de l'utilisation de l'eau est une composante essentielle de la résistance à la salinité (**Acosta-Motos et al., 2017**). Une réduction des teneurs en eau peut conduire à une perte de turgescence qui sera à l'origine d'une réduction de l'élongation cellulaire. Il importe toutefois de souligner que la cellule peut, dans une certaine mesure, modifier les propriétés rhéologiques de sa paroi afin de conserver une bonne élongation en dépit d'une réduction de la turgescence : une augmentation du coefficient d'extensibilité ou une réduction de la turgescence seuil peuvent résulter de la modification de la composition chimique de la paroi et ainsi assurer le maintien des taux d'élongation (**Munns et Tester, 2008**). Une stratégie communément utilisée est l'ajustement osmotique qui consiste, pour la plante, à accumuler des concentrations importantes de composés endogènes en vue de réduire son propre potentiel osmotique afin de maintenir un gradient de potentiel hydrique favorable à l'absorption d'eau (**Flowers, 2004**). Les plantes font souvent appel à des composés organiques qui doivent, pour assumer ce rôle, présenter un fort niveau de solubilité et ne pas être susceptibles d'interférer avec le métabolisme cellulaire (**Ruan et al., 2010**). La production de ces composés représente un coût énergétique non négligeable et l'évolution végétale a ainsi privilégié les composés peu coûteux à produire. Des composés comme la proline, les sucres solubles, des composés d'ammonium quaternaire (glycine bêtaïne, β-

alanine betaine), les polyols (sorbitol, mannitol) sont les plus fréquemment rencontrés dans le monde végétal (**Flowers, 2004**). Ces composés ont souvent une double fonction : non seulement ils contribuent à réduire le potentiel osmotique interne, mais ils interagissent avec certains constituants cellulaires (enzymes, membranes biologiques, ...) de façon à les protéger des conséquences néfastes de la présence d'ions toxiques ou d'une dessiccation partielle. On parle donc dans ce contexte de composés « osmoprotecteurs ». Ces composés sont rarement spécifiques au stress salin : leur accumulation est observée en conditions de sécheresse, mais aussi en réponse aux nombreux stress abiotiques qui induisent une perturbation des teneurs en eau de la plante (**Bohnert et Jensen, 1996**).

#### III.5.4. Photosynthèse

Une réduction de la photosynthèse en conditions de stress salin est une réponse classique dont les causes peuvent être multiples. Elles sont généralement réparties en « causes stomatiques » et en « causes non-stomatiques » : elles ne sont pas mutuellement exclusives et la réduction de photosynthèse induite par le sel est, le plus souvent, due à des causes multiples (**Munns et Tester, 2008**). L'inhibition stomatique se réfère bien entendu à la fermeture des stomates justifiée par la nécessité de limiter les pertes en eau. Il est souvent admis que seule la composante hydrique du stress salin intervient à ce niveau et que la réponse peut être comparée à celle induite par la sécheresse, en relation avec une surproduction d'ABA racinaire et sa translocation vers les stomates (**Chaves et al., 2003**).

Il peut toutefois être utile de rappeler que la régulation stomatique implique l'activation de nombreux transporteurs d'ions entre cellules de garde et cellules annexes et qu'une perturbation de l'alimentation minérale pourrait avoir un impact à cet égard. Des carences en  $K^+$  et/ou en  $Ca^{2+}$ , qui sont parfois rapportées chez des plantes exposées à la salinité, pourraient causer des problèmes de régulation stomatique. De même, des polyamines interagissant avec des transporteurs de  $K^+$  sont directement impliquées dans la réponse à la salinité chez un certain nombre d'espèces (**Liu et al., 2000**). Il est souvent admis qu'une fermeture limitée des stomates réduit plus la transpiration que la photosynthèse et que l'efficacité instantanée de l'utilisation de l'eau (que l'on peut définir comme le rapport de la photosynthèse nette sur la transpiration instantanée) a tendance à augmenter au niveau des plantes stressées (**Acosta-Motos et al., 2017**). Si la fermeture des stomates est la principale limitation à la diffusion du  $CO_2$ , la conductance du mésophylle a beaucoup moins retenu l'attention. Il est admis depuis quelques années que le sel peut modifier l'histologie

des feuilles en croissance et qu'il a un impact sur la conductance du mésophylle (**Roy et al., 2014**). Les causes « non stomatiques » les plus souvent avancées de réduction de la photosynthèse sont une réduction des teneurs en chlorophylles et une altération structurelle des photosystèmes II (**Albacete et al., 2008**). La réduction des teneurs en chlorophylles peut être reliée soit à une inhibition de la synthèse de ces pigments, soit à une augmentation de leur dégradation en relation avec l'induction de phénomènes de sénescence précoce. Les chlorophylles a et b n'ont, selon certains auteurs, pas la même sensibilité et le rapport Chl a/Chl b est donc souvent modifié chez les plantes exposées à la salinité (**Roy et al., 2014**).

Indépendamment des teneurs en chlorophylles, la structure des antennes collectrices du PSII peut être altérée en condition de stress salin. Une perturbation des structures des membranes thylakoïdes peut également conduire à une altération des cinétiques de transport des électrons. Une technique comme l'étude de la fluorescence de la chlorophylle est souvent utilisée pour étudier l'impact du NaCl sur la phase claire de la photosynthèse et fournit de précieuses informations sur l'intégrité des photosystèmes et l'efficacité du transfert d'électrons (**Wasti et al., 2012**). La salinité peut affecter le cycle de Calvin et avoir un impact sur les activités enzymatiques de la phase sombre. Un excès de Na<sup>+</sup> peut conduire à une réduction de la carbamylation de la RUBISCO, à une augmentation de la fixation des inhibiteurs sur cette enzyme et à une réduction de la régénération de l'accepteur de CO<sub>2</sub>. Un dysfonctionnement des systèmes ferrédoxine/thiorédoxine peut induire une perturbation dans l'activation par la lumière des enzymes cibles. De même, une perturbation de la structure du chloroplaste peut s'accompagner d'une altération dans le fonctionnement du translocateur phosphate (**Chaves et al., 2003**).

### III.5.6. Stress oxydatif

Le stress oxydatif est directement associé à la production de composés d'oxygène actif tels que le peroxyde d'hydrogène (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), le radical hydroxyle (OH.) ou l'anion super oxyde (O<sub>2</sub><sup>-</sup>). Ces composés hautement réactifs sont issus d'une perturbation du métabolisme et sont susceptibles d'induire une très large gamme de dégâts au niveau des structures cellulaires en réagissant avec les lipides membranaires, les protéines et les acides nucléiques (**Miller et al., 2010**). Pour faire face à ces ROS et au stress oxydatif qu'ils induisent, le monde végétal a sélectionné au cours de son évolution plusieurs stratégies qui revêtent une importance déterminante dans l'étude des mécanismes de résistance aux stress. La première possibilité consiste dans la production de composés antioxydants qui vont permettre de détoxifier les

composés ROS avant qu'ils n'induisent de dégâts : les plus connus chez les plantes sont le glutathion, l'ascorbate et l' $\alpha$ -tocophérol (Miller *et al.*, 2010). D'autres molécules ont une fonction de protection vis-à-vis du stress oxydatif comme certains polyphénols, les flavonoïdes, ou les anthocyanes. Par ailleurs, des composés osmoprotecteurs évoqués ci-dessus comme la proline auraient aussi une fonction antioxydante ce qui témoigne, finalement, de l'efficacité du monde végétal à sélectionner des composés protecteurs ayant de multiples fonctions de protection (Ashraf et Foolad, 2007).

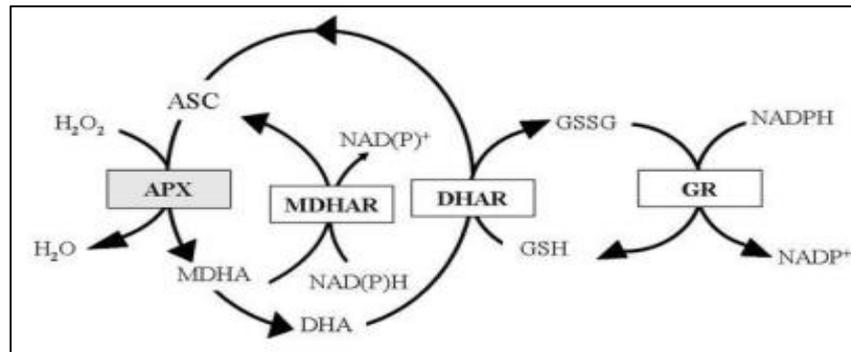


Figure 17 : Cycle d'Asada (Asada, 1992)

Lors du cycle d'Asada (Figure 17), l'ascorbate peroxydase (APX) catalyse la transformation de l' $H_2O_2$  en  $H_2O$ , ce qui induit la production de monodéhydro-ascorbate et de dihydro-ascorbate. Ces composés sont alors eux-mêmes transformés sous l'action d'une réductase pour redonner de l'ascorbate (MDHAR) ou pour oxyder le glutathion réduit (GSH) en glutathion oxydé (GSSG). Sous l'action de la glutathion réductase, le glutathion oxydé est ensuite réduit en GSH (Asada, 1992). Toutes les enzymes mentionnées sont présentes sous diverses formes qui varient selon leurs propriétés cinétiques et selon leur localisation. Les gènes qui codent pour ces enzymes appartiennent à une petite famille multigénique. Il a été démontré chez de nombreuses espèces, que l'action des stress abiotiques en général, et de la salinité en particulier, résultait d'une activation des gènes codant pour ces enzymes protectrices (Foyer et Noctor, 2013). Outre les enzymes impliquées dans le cycle d'Asada, la catalase joue un rôle déterminant au sein des peroxysomes pour assurer la réduction de l' $H_2O_2$  produite par la photorespiration dont l'intensité augmente généralement en conditions de stress. Les super oxydes dismutases (SOD) jouent un rôle fondamental dans la détoxification des anions super oxydes. Plusieurs SOD ont été identifiées dans le monde végétal : elles peuvent être associées au cuivre, au zinc ou au manganèse comme cofacteur. Certaines formes associées au fer ont également été identifiées, dans une moindre mesure,

au sein de certains organites. Le rôle de ces enzymes dans les stratégies de tolérance à la salinité chez les plantes a déjà été souligné à plusieurs reprises (**Yang et Guo, 2018**).

### **III.5.7. La modification du statut hormonal**

Les phytohormones jouent un rôle crucial dans l'adaptation des plantes à leur environnement. Elles sont impliquées dans la perception des composantes abiotiques et biotiques de cet environnement et assument des fonctions cruciales dans la mise en œuvre d'éventuelles stratégies d'adaptation. Deux hormones semblent systématiquement impliquées dans l'impact des stress abiotiques : l'acide abscissique (ABA) et l'éthylène sont traditionnellement considérés comme des hormones de stress dont la production est rapide.

L'ABA est impliqué à titre majeur dans la régulation stomatique mais il assume également de très nombreuses autres fonctions dans la plante. De nombreux travaux ont mis en évidence son rôle déterminant dans les voies de transduction conduisant à l'activation de plusieurs gènes jouant un rôle dans les stratégies de réponse au stress, particulièrement en conditions de stress hydrique et de stress salin (**Ton et al., 2009**). A l'inverse de l'ABA, la production d'éthylène est interprétée comme un symptôme de stress : l'éthylène est en effet impliqué à titre majeur dans les processus de sénescence et de stress qui conduisent à un vieillissement précoce caractérisé par une réduction des teneurs en chlorophylle, une désorganisation des membranes et une altération de la protéosynthèse (**Koyama, 2014**).

Cette distinction entre ABA à action « positive » et éthylène à action « négative » est peut-être trop simpliste : l'ABA peut aussi, dans certaines conditions, influencer la sénescence alors que l'éthylène, au même titre que l'ABA peut être impliquée dans l'activation de gènes de défense et jouer à ce titre un rôle déterminant chez certaines espèces halophytes (**Gharbi et al., 2017**).

A l'inverse de l'éthylène, les cytokinines ont la réputation d'avoir une action anti-sénescence : elles auraient une fonction protectrice et leur synthèse racinaire suivie de leur translocation vers les parties aériennes permettraient à ces dernières de réduire l'impact négatif de la contrainte saline sur les tissus photosynthétiques (**Albacete et al., 2008**). Sans être considérées comme des « hormones au sens stricte », les polyamines peuvent également jouer un rôle protecteur et de récents travaux ont mis en évidence leur impact sur les transporteurs membranaires impliqués dans le transport de cations monovalents (**Pottosin et al., 2014**).

### III.6. Mécanismes de tolérance à la salinité

Les plantes peuvent adopter certaines stratégies pour affronter les contraintes dues au stress salin. Elles peuvent soit exclure les ions toxiques des cellules ou établir un ajustement osmotique suite à la compartimentation de ces ions dans la vacuole (**Chinnusamy et al., 2005**).

#### III.6.1. Exclusion des ions toxiques

Au niveau racinaire, les ions toxiques  $\text{Na}^+$  peuvent être exclus vers le milieu extérieur afin de maintenir une concentration stable en  $\text{Na}^+$  dans les cellules. Grâce à un gradient électrochimique décroissant, l'influx de  $\text{Na}^+$  dans les racines serait passif (**Silveira et al., 2009**) des études récentes suggèrent toutefois que le  $\text{Na}^+$  est prélevé en même temps que le  $\text{K}^+$ , le transporteur  $\text{K}^+$  ayant une forte affinité pour le  $\text{Na}^+$  (**Haouala et al., 2007**). Un mécanisme actif d'exclusion existe également grâce à des anti porteurs  $\text{Na}^+/\text{H}^+$  et des ATPases de différents types localisés dans le plasmalemme et le tonoplaste (**Eric et al., 2005**). Pour réguler les teneurs en sel dans les feuilles, les halophytes utilisent le mécanisme d'exclusion des sels à partir des racines (**Silveira et al., 2009**). Un autre mécanisme souvent utilisé est la sécrétion du sel. Il se produit à partir du développement des structures cellulaires uniques appelées glandes foliaires. Celles-ci secrètent du sel (spécialement  $\text{NaCl}$ ) à partir des feuilles et maintiennent des concentrations ioniques internes à un niveau faible (**Flowers et al., 2010**).

#### III.6.2. Compartimentation des ions

La compartimentation des ions  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  dans la vacuole et l'accumulation des solutés compatibles dans le cytosol contribuent à l'adaptation du statut hydrique de la cellule en réponse au stress salin (**Ben Hassine et al., 2008**). Les plantes ne peuvent pas tolérer des quantités élevées de sel dans le cytoplasme, et par conséquent stockent en conditions salines l'excès du sel dans la vacuole ou compartimentation des ions dans différents organes pour faciliter leurs fonctions métaboliques (**Zhu, 2003**). En conditions de stress salin, les plantes peuvent maintenir des concentrations élevées en  $\text{K}^+$  et de faibles concentrations en  $\text{Na}^+$  dans le cytosol. Ce mécanisme est induit par une régulation de l'expression et de l'activité des transporteurs de  $\text{K}^+$  et  $\text{Na}^+$  et des pompes  $\text{H}^+$  qui génèrent la force motrice pour le transport (**Silveira et al., 2009**). La séquestration vacuolaire de  $\text{Na}^+$ , non seulement diminue les concentrations en  $\text{Na}^+$  dans le cytoplasme, mais aussi contribue à l'ajustement osmotique pour le maintien de l'absorption de l'eau à partir des solutions salines. Les mitochondries

peuvent aussi accumuler quelques ions de  $\text{Na}^+$  et ainsi contribuent en général à la compartimentation subcellulaire de  $\text{Na}^+$  (Zhu, 2003).

### III.7. Ajustement osmotique

C'est un mécanisme utilisé par les plantes pour maintenir la turgescence et ainsi réduire les effets néfastes dus au stress hydrique sur les tissus végétatifs et reproducteurs (Silveira *et al.*, 2009).

#### III.7.1. Ajustement osmotique par accumulation d'ions

Chez les halophytes,  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  sont des solutés les plus importants pour diminuer le potentiel hydrique dans la vacuole, réduisant ainsi la concentration en sels au sein du cytoplasme, site vital de métabolisme (Belkheiri et Mulas., 2013). Un ajustement osmotique par accumulation d'ions n'est pas l'apanage des seuls halophytes : chez certains glycophytes, les tissus s'ajustent osmotiquement au stress salin par l'accumulation de  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  (Munns, 2005). Les halophytes et les glycophytes tolérants qui accumulent du  $\text{Na}^+$  présentent une réduction de leur contenu en  $\text{K}^+$  avec l'augmentation croissante de sel dans le sol. Cette remise semble être liée au remplacement de  $\text{K}^+$  vacuolaire par  $\text{Na}^+$  (Di Martini *et al.*, 2003).

#### III.7.2. Ajustement osmotique par accumulation de solutés organiques

Les cellules des halophytes accumulent divers composés compatibles à des concentrations suffisantes pour réaliser un équilibre osmotique et ionique au sein de la cellule (Di Martino *et al.*, 2003). L'accumulation de solutés ou d'osmolytes aide à maintenir un équilibre osmotique au niveau cellulaire dans des conditions de déshydratation (Bray *et al.*, 2000). Les osmolytes incluent des sucres, les polyols, la proline et la glycine bêtaïne.

Plusieurs exemples montrent une modification d'expression des gènes impliqués dans les voies de biosynthèse d'osmolytes en réponse au stress salin (Majumder *et al.* 2010). Le mécanisme de la protection fourni par ces osmolytes n'est pas compris (Ramanjulu et Bartels 2002). Ils peuvent contribuer à l'ajustement osmotique, mais également être impliqués dans d'autres mécanismes (Huang *et al.*, 2000). Une observation commune dans le processus de déshydratation est l'accumulation de sucres solubles. Ces derniers jouent un rôle déterminant dans l'ajustement osmotique, et aussi au niveau de la stabilisation de certaines protéines (Martinez *et al.*, 2003).

#### III.7.4. Fonctionnement cellulaire

Le fonctionnement cellulaire est modifié pour servir la stratégie d'adaptation de la plante, à l'échelle de la cellule comme de la plante entière. Le niveau de salinité est perçu au

niveau des membranes en contact avec la solution saline (Xiong *et al.*, 2002) et dans tout l'organisme par la perte de turgescence. Des signaux de transduction sont alors émis. L'ensemble de ces signaux contrôle le rétablissement de l'équilibre ionique et hydrique des cellules, la réparation et la prévention des dommages et la croissance cellulaire (Zhu 2003).

Par exemple, en réponse à la réduction du potentiel osmotique externe, des signaux à base de  $\text{Ca}^{+2}$  vont activer des protéines kinases dont dépend la suite de la réponse en aval (Ma *et al.*, 2009). Cette information va éventuellement se transmettre via l'émission d'hormones de stress tel que l'ABA. Mentionnons que l'ABA est largement impliqué dans les relations hydriques et la tolérance au stress des végétaux. Cette hormone contrôle la fermeture stomatique, stimule l'absorption d'eau au niveau des racines et modifie la croissance (Osakabe *et al.*, 2014). Lors d'un stress salin, le dysfonctionnement cellulaire est essentiellement dû à la toxicité ionique croissante. Celle-ci est générée à la fois par l'augmentation des concentrations des solutés non compatibles dans le cytoplasme à cause de la perte d'eau et de l'absorption des ions en excès du milieu extérieur. Tout comme pour le  $\text{Na}^+$ , une concentration cytosolique élevée de  $\text{Cl}^-$  n'est pas compatible avec les processus métaboliques (Mansour et Salama 2004). L'effet spécifique de ces ions affecte l'intégrité membranaire, l'activité enzymatique, le fonctionnement nucléaire, l'absorption de nutriments ainsi que le fonctionnement de l'appareil photosynthétique (Kim *et al.*, 2010).

#### **III.7.4.1. Rôle du calcium**

Chez les végétaux, un ion semble avoir un rôle central dans la transduction des signaux environnementaux : le calcium. En effet, des modifications rapides et transitoires de la concentration cytosolique en calcium libre interviennent après l'application de stimuli divers chez des plantes (Laohavisit *et al.*, 2013). Le calcium est un modulateur du métabolisme et du développement et sert de second messager dans la traduction des stimuli environnementaux chez de nombreux organismes, notamment les plantes. Les parois des cellules végétales et la vacuole sont des sites de stockage du calcium et les membranes plasmiques et le tonoplaste possèdent des canaux calciques (Tzortzakis, 2010). Le calcium est un messager secondaire majeur de la signalisation du stress hydrique (Lefebvre, 2006).

## Chapitre IV

### Généralité sur l'acide salicylique

#### IV. Introduction

Les phytohormones sont considérées comme les substances endogènes les plus importantes pour déclencher les réponses physiologiques et moléculaires impliquées dans les mécanismes de tolérance ou de sensibilité des plantes aussi bien sous des conditions favorables que défavorables (**Fahad et al., 2015**). De ce fait, une des stratégies de défense des plantes face à une contrainte environnementale, telle que la salinité, est le changement des concentrations et des ratios des phytohormones endogènes (**Wang et al., 2001**).

Une modification du milieu extérieur correspond pour la plante un signal qui va influencer son développement. Ceci peut faire intervenir les hormones comme intermédiaires entre des récepteurs capables de percevoir ces signaux et de les transformer en informations utilisables par la plante, et des effecteurs traduisant ces informations en réponses spécifiques (**Munns et Tester, 2008**).

#### IV.1 Définition de phytohormone

Est une molécule endogène synthétisée par la plante et vectrice d'une information qu'elle apporte à une cellule cible, sélectivement sensible à son action. L'hormone est reconnue par un récepteur et cette interaction est à l'origine d'une cascade de réactions aboutissant à l'activation d'un mécanisme. Influencée par l'environnement auquel les plantes ne peuvent pas échapper, la régulation de ces messagers chimiques est fine et complexe (**Kaya et al., 2009**). Les phytohormones agissent sur des tissus ciblés en tant que régulateurs de la croissance et du développement.

#### IV.1.1 Différents types des hormones végétales

##### IV.1.1.1. Gibbérelline (GA3)

Elle contrôle la germination des graines, l'élongation de la tige, l'expansion des feuilles et la floraison, aussi, elle peut décaler les stades du développement chez les végétaux (**Colebrook et al., 2014**). Le traitement aux gibbérellines se substitue aux jours longs et provoque la floraison de plantes durant les jours courts de l'hiver. Elles induisent la masculinisation des fleurs et stimulent la croissance du fruit (**Yamaguchi et al., 2008**).

##### IV.1.1.1. Cytokinine (CK)

La majeure portion de cette hormone est synthétisée au niveau des zones méristématiques. En effet, plusieurs études ont montré les effets bénéfiques de

l'augmentation des teneurs en CKs sont associée à la conductance stomatique, la transpiration et la photosynthèse sous stress hydrique (**Pospíšilová et al., 2003**). Les processus régulés par les cytokinines incluent la sénescence, la dominance apicale, la ramification, la floraison et la germination des graines. Ces molécules régulent aussi les réponses aux divers stimuli tels que la disponibilité de l'eau et des nutriments, les conditions de lumière et l'infection (**Werner et Schmülling, 2009**).

#### **IV.1.1.3. Auxine (AIA)**

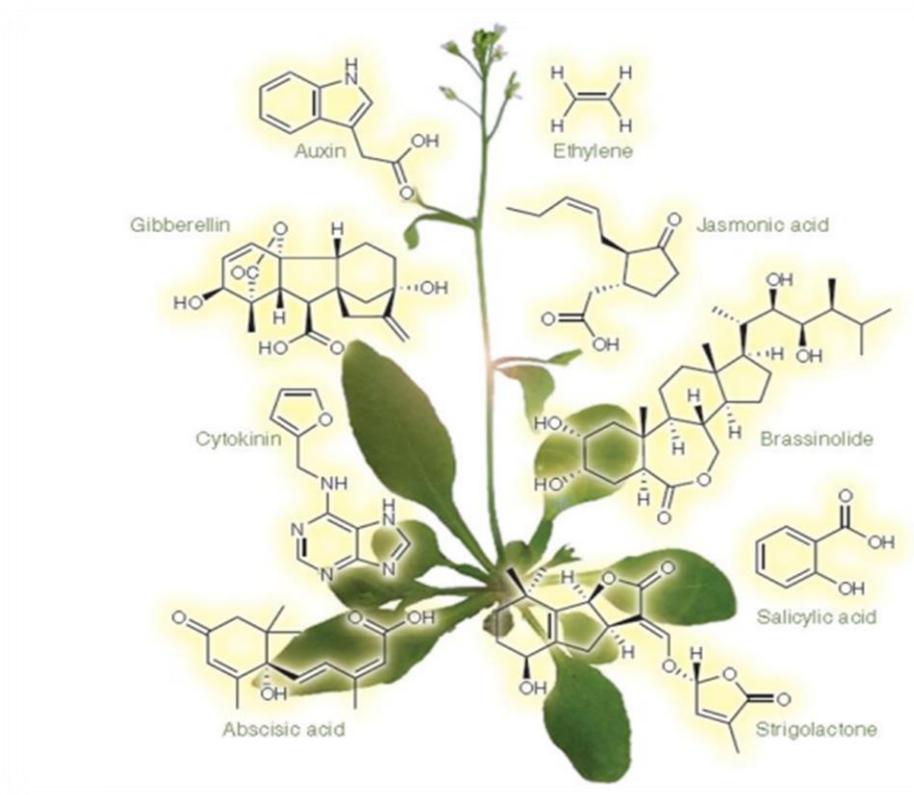
Elle joue un rôle majeur dans la morphogenèse des plantes, y compris la croissance apicale, la structuration des racines, la différenciation des tissus vasculaires, la formation des bourgeons auxiliaires et floraux (**Sauer et al., 2013**). La participation de l'auxine dans les réponses au stress a été déduite à partir des observations dont laquelle les gènes associés à la voie de signalisation de l'auxine sont stimulés chez les plantes exposées aux différents stress abiotiques (**Coupe et al., 2006**).

#### **IV.1.1.4. Acide abscissique (ABA)**

C'est une hormone végétale lipophile, est omniprésente dans les plantes inférieures et supérieures et participe aux processus complexes tout au long du cycle de vie des plantes (**Javid et al., 2011**). Cette phytohormone présente des fonctions inhibitrices lorsqu'elle est accumulée en grandes quantités sous contrainte saline pour protéger le développement des plantes par l'inhibition des processus tels que l'ouverture stomatique et l'expansion de la taille de la plante (**Waśkiewicz et al., 2016**).

#### **IV.1.1.5. Ethylène (ET)**

Est une phytohormone gazeuse, intervient dans plusieurs phases de croissance et de développement des plantes, notamment la maturation des fruits, la sénescence des fleurs et l'abscission des feuilles et des pétales, en plus d'être un régulateur essentiel des réponses au stress (**Upreti et al., 2016**).



**Figure** : Structure chimique de quelques phytohormones intervient dans les mécanismes de défense chez la plante (**Santener et al., 2009**)

#### IV.1.2 Historique de l'acide salicylique

L'acide Salicylique a été isolé en 1838, à partir de l'écorce de saule blanc par Pierre Joseph Leroux ; il baptisa ce composé Salicine, la première production commerciale du AS synthétique a débutée en 1874 en Allemagne. Son dérivé acétylé (acide acétylsalicylique) a été introduit sous le nom commercial d'aspirine par l'entreprise Bayer en 1898, il est rapidement devenu le médicament le plus vendu dans le monde (**Raskin, 1992**). Des récentes découvertes scientifiques suggèrent que l'acide salicylique jouerait un rôle essentiel dans les mécanismes de défense des plantes contre les infections et les agressions extérieures (**Hopkins, 2003**). Les fleuristes le savaient déjà, mais sans en connaître les bases (**Raskin et al., 1987**). En effet, ajouter un comprimé d'aspirine à l'eau d'un vase contenant des fleurs permet de les conserver plus longtemps et en meilleur état, action attribuée à une inhibition de la biosynthèse de l'éthylène (**Heller, 2006**). L'acide salicylique était utilisé par les indiens d'Amérique, depuis longtemps, pour traiter les migraines. Ils plaçaient pour cela des écorces de saule autour de leurs têtes (**Hopkins, 2003**).

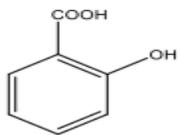
#### IV.2.2 Définition de l'acide salicylique

C'est un acide carboxylique, considéré comme une phytohormone qui appartient à un groupe extrêmement divers de composés phénoliques. Il est présent en abondance dans l'écorce et les feuilles des plantes. C'est un régulateur de croissance (Senaratna *et al.*, 2000). L'AS joue un rôle, notamment dans l'induction de réponse de défense des plantes contre des conditions environnementales défavorables (Popova *et al.*, 1997).

#### IV.2.3 Structure de l'acide salicylique

La structure de cette phytohormone est présentée dans le tableau suivant

**Tableau 5 : structure d'acide salicylique**

Structure	Formule brute	Nom IPUAC	Synonymes
	C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> O <sub>3</sub>	Acide 2- hydroxy- benzoïque	acide ortho-hydroxy- benzoïque

(Nuhrich, 2015)

#### IV.2.4. Caractères physico-chimique

Les caractères physico-chimiques de cette hormone sont exposés dans le tableau suivant

**Tableau 6 : Propriétés physiques d'AS**

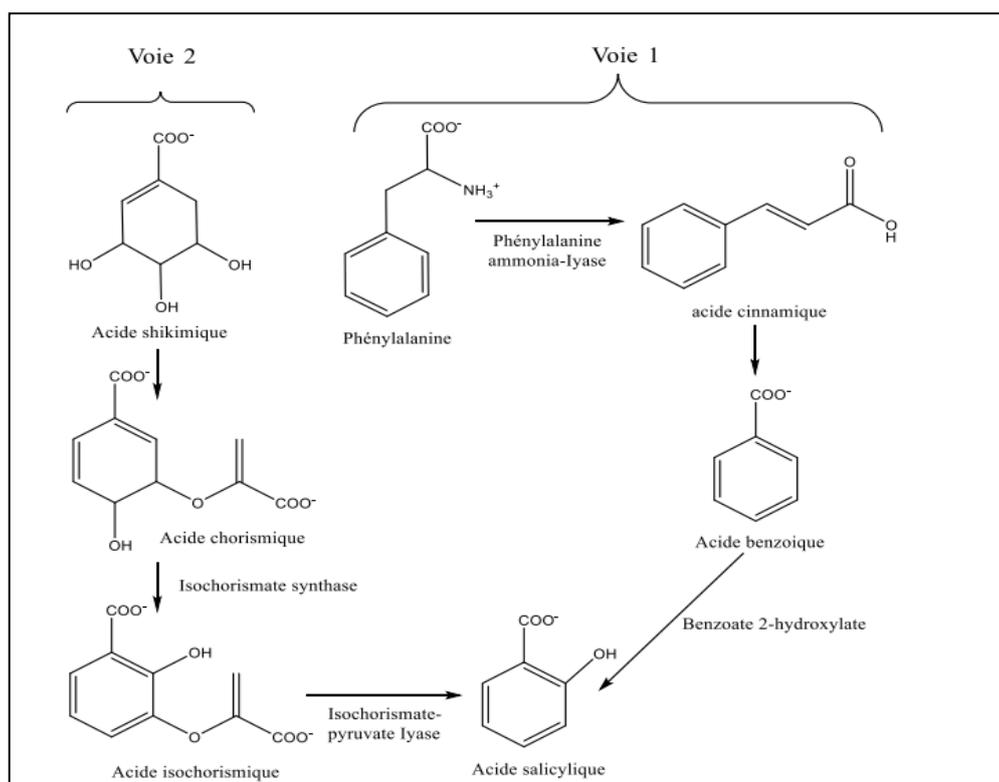
<b>Caractères physiques</b>	<b>Point de fusion</b>	159 °C
	<b>Point de sublimation</b>	76°
	<b>Température ébullition</b>	211° C
	<b>Densité</b>	1.443
	<b>Point volumique</b>	1.443 g.cm
	<b>Point d'éclair</b>	157 °C (coupelle fermée)
	<b>Solubilité en eau</b>	1,8 g/L à 20 °C
<b>Caractères chimique</b>	<b>Masse molaire</b>	138.123 g/mole
	<b>PKa</b>	3

(Lepoivre, 2003)

#### IV.2.5. Biosynthèse de l'acide salicylique

Lepoivre (2003), à décrire qu'il existe deux voies de biosynthèse de l'acide salicylique (Figure 18). La première est la voie des phényl-propanoïdes, ou de l'acide benzoïque. Lors de plusieurs études des précurseurs de l'acide salicylique marqués avec un isotope

radioactif ; l'acide benzoïque et d'acide cinnamique, ont été mis en contact avec des plantes de tabacs saines et infectées. Les résultats de ces recherches démontrent que la synthèse de l'acide salicylique, débute avec la phénylalanine. Cette dernière est transformée en acide cinnamique par la phénylalanine ammonia lyase. L'acide cinnamique est ensuite transformé en acide benzoïque, qui est finalement, hydroxylé par l'acide benzoïque - 2- hydroxylase en acide salicylique (**Dempsey, Shah, & Klessig, 1999**). Une voie alternative de synthèse existe chez les bactéries et dans les chloroplastes de plantes. Cette voie implique les enzymes isochorismate synthase (EC 5.4.99.6) et isochorismate pyruvate lyase qui catalysent les deux étapes de synthèse à partir de l'acide chorismique (**Vasyukova & Ozeretskovskaya, 2007**).



**Figure 18 :** Différentes voies de synthèse de l'AS (**Wildermuth et al., 2001**)

Plusieurs études ont été effectuées afin de montrer la voie de biosynthèse de l'acide salicylique chez la plante. L'acide salicylique peut s'accumuler dans la cellule à la suite d'une nouvelle synthèse via l'acide cinnamique d'une hydrolyse de la forme glycolyse entreposée dans les parois cellulaires ou d'une dégradation des flavones (**Enyedi, 1999**). Selon (**Klarzynski & Fritig, 2001**), les concentrations d'acide salicylique sont de l'ordre de quelques dizaines à centaines de nano grammes par gramme de tissu frais dans les tissus sains, et de quelques microgrammes à dizaines de microgrammes par gramme de tissu frais

dans les tissus attaqués. Il faut cependant préciser qu'il s'agit là des concentrations totales d'acide salicylique, dont l'essentiel se trouve sous libre ou sous forme conjugués de glycosylates méthylé, glucose-ester ou conjugué avec les aminoacides (Lee, León, & Raskin, 1995).

#### IV.2.6. Interactions acide salicylique-autres hormones

La voie de signalisation de l'AS est fortement interconnectée avec les signalisations des autres phytohormones, tel que l'acide jasmonique (JA), l'éthylène (ET) et l'acide abscissique (ABA) (Derksen *et al.*, 2013). Par exemple, la signalisation de l'AJ et l'ET régule négativement la biosynthèse de l'AS au niveau de la transcription (Zheng *et al.*, 2012).

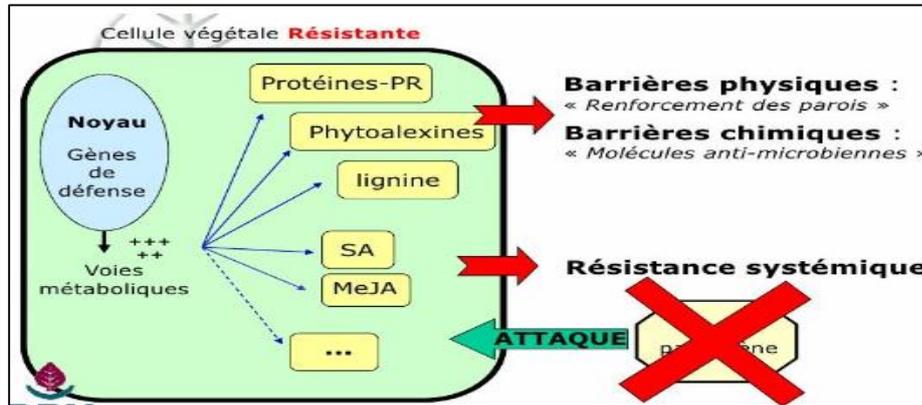
#### IV.2.7. Application de l'acide salicylique

L'application appropriée de l'AS peut fournir une protection contre plusieurs contraintes environnementales mais il peut causer un stress oxydatif, partiellement lors de l'accumulation du peroxyde d'hydrogène. Mais une concentration basse de peroxyde d'hydrogène ainsi améliore la capacité anti oxydative des plantes et stimule la synthèse des composés protecteurs qui mène à accroître la tolérance aux stress abiotique (Hara *et al.*, 2012).

#### IV.2.8. Rôle de l'acide salicylique

L'isolement de l'acide salicylique chez le saule date du dix-neuvième siècle. La synthèse ultérieure du dérivé acétylé, l'aspirine, est à l'origine de nombreuses applications thérapeutiques. Chez les plantes, l'acide salicylique fait partie d'une famille diversifiée de composés phénoliques. Ces composés ont longtemps été supposés des métabolites secondaires, c'est-à-dire non essentiels, alors qu'ils jouent un rôle clé chez les plantes : ils interviennent dans la synthèse de la lignine, composant structural important des parois. Les phyto-alexines contribuent à la défense des plantes contre les microbes, les insectes, les herbivores. Certains composés phénoliques sont des substances allopathiques, synthétisée par une plante, ils affectent la germination et la croissance des plantes environnantes. Ce sont les signaux intervenant dans les communications plantes-bactéries, comme l'acétosyringone qui stimule les gènes de virulence des agro-bactéries, ou les flavonoïdes qui stimulant les gènes nod des rhizobiées (Mazliak, 1998). La réaction hypersensible est un mécanisme de défense qui joue un rôle capital chez les plantes, qui est induite quelques minutes après l'attaque par un agent pathogène biotique ou même un stress abiotique (métaux

lourd, UV etc.). Dans certains cas, une résistance systématique acquise est observée. Consécutivement à une attaque bactérienne, fongique ou virale conduisant à une réaction hypersensible ou à une maladie, une activation de gènes PR (Pathogenesis Related) entraîne une résistance à d'autres attaques bactériennes, fongiques ou virales (Morot-Gaudry *et al*, 2009).



**Figure 19** : Activation du métabolisme de la plante par application de stimulateurs de défense

#### IV.2.9.Effets de l'acide salicylique sur la plante

##### IV.2.9.1.Effets sur la croissance

De nombreux travaux ont montré que la réponse générale des plantes traitées par l'AS à faible concentration (0.05 mM) est l'augmentation de la croissance (Fariduddin *et al*, 2003). En outre (Khan *et al*, 2003) soulignent que l'application foliaire de l'AS à concentration de 0.05 mM augmente le contenu de la matière sèche et la taille de la feuille chez le maïs et le soja. (Pancheva *et al* ; 1996), notent que le traitement par l'AS (0.1-10 mM) inhibe et réduit la croissance des feuille et des racines. D'autres études ont confirmé que l'addition de l'AS exogène à la solution nutritive peut endommager considérablement les racines (El Tayeb, 2005)

##### IV.2.9.2. Effets sur la photosynthèse

Des études conduites par plusieurs auteurs sur différentes plantes ont montré que la capacité photosynthétique est augmentée par l'application foliaire de l'AS 0.05 mM (Gomez *et al*, 1993). En plus, (Pancheva *et al*. 1996) notent que l'effet de l'AS sur la photosynthèse s'exerce par une activation de la synthèse des caroténoïdes et des xanthophylles chez le soja, l'orge et le maïs. (Fariduddin *et al*, 2003) rapportent que l'effet de l'AS à forte dose (0.1 - 10 mM) sur la photosynthèse s'exerce par une baisse de la teneur en chlorophylle et une

diminution de la surface foliaire chez *brassica juncea* (Rai et al., 1986), signalent que l'inhibition de la photosynthèse sous la forte dose de l'AS chez plusieurs plantes peut être due à l'effet toxique de cet acide sur plusieurs processus biochimiques et enzymatiques chez le blé et l'orge. La diminution de la teneur en chlorophylle chez les plantes traitées à de fortes doses de l'AS peut être due également à l'effet inhibiteur de cet acide sur les enzymes qui interviennent dans la voie de la biosynthèse des chlorophylles ou à un trouble dans l'intégration des molécules de la chlorophylle dans les complexes stables (Lian et al ; 2000). La perte en chlorophylle peut être une cause de baisse de la photosynthèse chez plusieurs plantes (Sato et al., 2002). L'addition de l'AS dans la solution nutritive, même à des basses concentrations, inhibe et réduit aussi le taux photosynthétique (Rai et al., 1986)

#### IV.2.9.3. Effets sur le métabolisme de nitrate

Plusieurs processus biochimiques sont affectés par l'application de l'AS, en particulier l'assimilation de nitrate. Ce dernier est la source la plus significative de l'azote pour les plantes cultivées et limite fréquemment la croissance des plantes (Ramanujam et al., 1998). Le traitement par l'AS (0.01-0.1 mM) augmente la fixation de l'azote et l'activation de la nitrate réductase dans les feuilles et les racines des plantes de maïs (Rane et al; 1995). Les mêmes auteurs, ont observé une augmentation de l'activité de nitrate réductase en présence du nitrate grâce à la protection de ce l'enzyme contre le proténase et la trypsine. D'autres travaux ont montré que l'absorption du nitrate et l'activité du nitrate réductase diminuent dans les feuilles chez nombreuses plantes, après l'application de l'AS à fortes doses. La réduction de l'activité du nitrate réductase dans les feuilles est due essentiellement à l'effet toxique d'AS à forte dose qui conduit à une baisse de l'absorption de  $\text{NO}_3^-$  et en conséquence, à une diminution de la concentration en  $\text{NO}_3^-$  dans les feuilles (Jain et Srivastava, 1981). Par conséquent, une baisse dans l'activité de la nitrate réductase et de la teneur en nitrate en présence de concentrations élevées en AS peut être responsable de la réduction de la croissance (Sato et al ; 2002).

#### IV.2.9.4. Effet sur la Floraison

L'AS est nécessaire lors de la floraison et de la formation des bourgeons chez des cultures de cellules de tabac (Eberhard et al., 1989). L'effet de l'AS sur l'effloraison a été ensuite démontré chez plusieurs autres espèces de plantes mais l'AS n'est pas spécifique et il engage la floraison en combinaison avec d'autres facteurs, les gibbérellines par exemple (Alvarez, 2000). 1-5- Effet sur La biosynthèse de l'éthylène La biosynthèse de l'éthylène

peut être inhibée par l'AS. En effet, des études in vitro sur des disques de pomme et des cultures de cellules de poire ont montré que la conversion de l'acide 1-aminocyclopropane-1-carboxylique en éthylène est fortement compromise à certains pH et concentrations d'AS. L'effet de l'AS sur l'éthylène est réversible (**Leslie et Romani, 1988**)

**IV.2.9.5.Effet sur La biosynthèse de l'éthylène**

La biosynthèse de l'éthylène peut être inhibée par l'AS. En effet, des études in vitro sur des disques de pomme et des cultures de cellules de poire ont montré que la conversion de l'acide 1-aminocyclopropane-1-carboxylique en éthylène est fortement compromise à certains pH et concentrations d'AS. L'effet de l'AS sur l'éthylène est réversible (**Leslie et Romani, 1988**).

## Chapitre V : Matériel et méthodes

### V.1.Objectif de l'étude

L'objectif de notre travail est de vérifier l'impact d'un apport exogène de l'acide salicylique (0,25 mM et 0,50mM) dans un milieu salin contenant le NaCl (50mM et 100mM) sur la germination et la croissance des graines de l'orge (*Hordeum vulgare*) et de blé dur (*Triticum durum*) et ce dans le but d'une part de monter de l'effet de NaCl sur ces paramètres testés et déterminer la dose de phytohormone testé qui stimule plus ces paramètres.

### V.2.Matériel végétal utilisé

Le matériel végétal utilisé est constitué d'une variété Rayhane de la culture d'orge (*Hordeum vulgare*), et la variété ... de la culture de blé dur (*Triticum durum*). Ces deux espèces provenant de l'institut technique des grandes cultures d'Oued Smar, El Harrach, Alger avec une pureté spécifique de 99% et une faculté germinative de 96%. Elles ont été récoltées en 2017.

### V.3. Conditions expérimentation

#### V.3.1.Lieu de l'expérimentation

Notre expérience a été effectuée au niveau de laboratoire de recherche en Biotechnologie des Productions végétales du département de biotechnologie et agro-écologie de l'université de Blida 1. Notre essai a été réalisé dans une serre en polycarbonate destinée à protéger les plantes au froid et à favoriser la croissance des cultures en créant des conditions climatiques plus favorables que le climat externe.



Figure 23 : Localisation du lieu de l'expérimentation

#### V.3.2.Substrat

Durant cette expérience, nous avons utilisé un gravier roule de rivière de diamètre de 3 à 8 mm. Ce substrat est qualifié comme étant le meilleur pour assurer une bonne aération aux racines des plantes grâce à sa porosité. Ce gravier a subi une désinfection afin d'éviter tous les risques de contamination et ce par

- Elimination des particules terreuses des résidus organiques présents dans le gravier par un lavage à l'eau abondant.

- Désinfection du gravier avec l'hypochlorite de sodium dilué.
- Rinçage abondamment à l'eau afin d'éliminer toute trace d'hypochlorite de sodium.
- Remplissage des pots par le gravier lavé.

### **V.3.3. Conteneurs**

Les conteneurs utilisés pour la plantation sont des pots en plastique de couleur blanche. Des trous de drainage sont percés dans le fond, afin d'évacuer l'eau d'arrosage excédentaire et d'éviter la pourriture des racines.

### **V.4. Préparation de solutions d'irrigations**

Durant notre expérimentation, nous avons préparées des solutions combinées de chlorure de sodium (NaCl) et l'acide salicylique (AS) selon les doses suivantes :

- Solution d'acide salicylique : dont les deux doses testes sont 0,25 et 0,50mM,
- Solution Saline : l'application du stress est réalisée par 50 et 100mM de NaCl.

Cependant, les solutions testées est composées de :

**T<sub>0</sub>** : Solution témoin composée d'eau de robinet ;

**T<sub>1</sub>** : solution saline contenant 50mM de NaCl soit 2.92 g/l ;

**T<sub>2</sub>** : solution saline contenant 100mM de NaCl soit 5.84 g/l ;

**T<sub>3</sub>** : 50 mM de NaCl + 0,25 mM d'Acide salicylique ;

**T<sub>4</sub>** : 100 mM de NaCl + 0,25 mM d'Acide salicylique ;

**T<sub>5</sub>** : 50 mM de NaCl + 0,50 mM d'Acide salicylique ;

**T<sub>6</sub>** : 100 mM de NaCl + 0,50 mM d'Acide salicylique

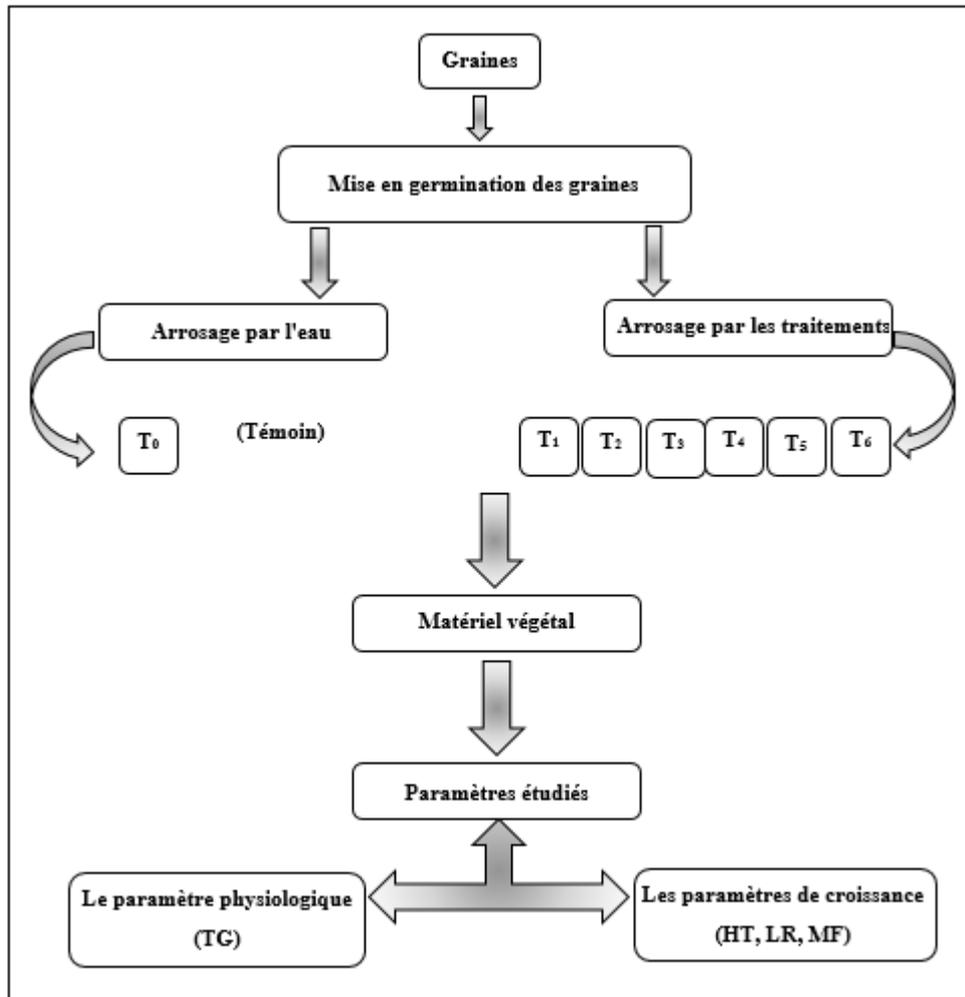


Figure 24 : Protocole expérimentale

### V.5.Préparation des graines

Les graines sont d'abord nettoyées et désinfectées de façon à éliminer les bactéries et les spores de champignons adhérent à leur surface par un trempage dans une solution contenant hypochlorite de sodium concentrée à 2%. Elles ont ensuite été rincées par l'eau distillée. Nous avons compté 10 graines que nous avons dans les boîtes de Pétri tapissées de papier absorbant. Ces boites sont auparavant étiquetées.

#### V.5.1.Mise en germination définitive dans l'étuve

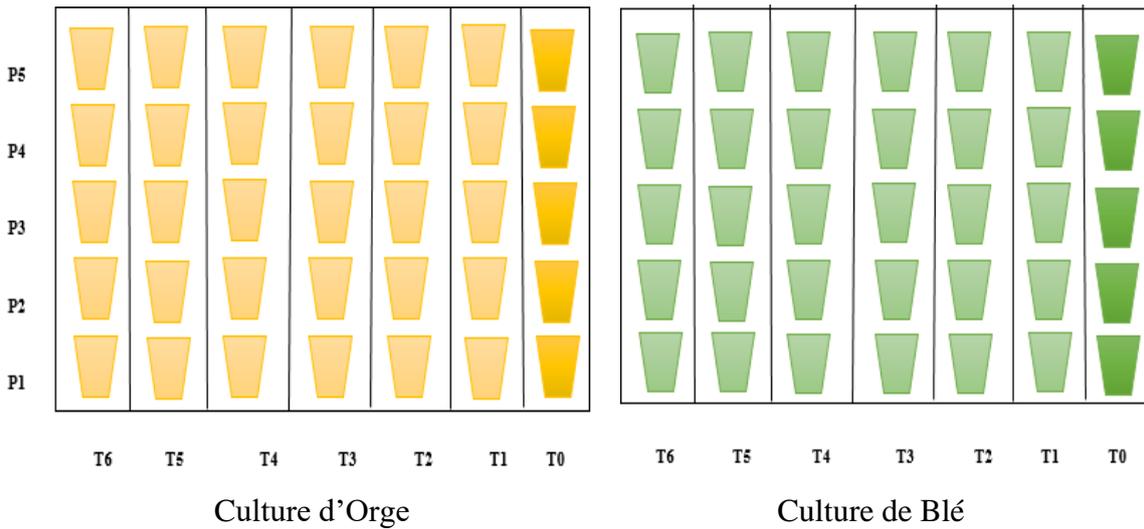
Après que les graines soient bien séchées, elles ont été mises en germination définitive à l'étuve à 25°C dans une chambre de culture, le 28/02/2021. Les boites de pétri tapissées de papier absorbant sont imbibées à l'eau distillée et ce pour tous les traitements testés.

#### V.5.2. Repiquage

Le repiquage des germes en place définitive dans des pots remplis de gravier a été réalisé le 08/03/2020 soit 08 jours après la mise à la chambre de culture, après que les graines d'orge et de blé dur aient germé et ce à raison d'une germe par pot.

### V.6. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental adopté durant notre essai est un plan complètement randomisé sans contrôle d'hétérogénéité avec un seul facteur étudié qui est la composition de la solution d'irrigation. La distribution des 06 traitements préparés est réalisée d'une façon aléatoire l'aide de la table de permutation aléatoire de 1 à 10. Chaque traitement est répété 05 fois soit au totale 30 unités expérimentales pour chaque espèce.



**Figure 25 :** Présentation du dispositif expérimental

T0, T1, T2, T3, T4, T5, T6 : traitements.  
 P1, P2, P3, P4, P5 : nombre de répétitions.

### V.7. Opération d'entretien de la culture

#### V.7.1. Irrigation

L'irrigation des jeunes plantules d'orge et de blé dur a commencé à la même date que le repiquage à savoir le 08/03/2021. Le système utilisé est celui de la percolation à circuit ouvert dont le but d'évacuation l'eau en excès. La fréquence d'irrigation s'est faite en fonction du cycle végétatif de la plante et les conditions microclimatiques ambiantes notamment la température. Les doses d'irrigation administrées étaient de 5ml à 10ml raison de 2 à 4 fois par jours.

### V.8. Paramètres étudiés

Afin de déterminer l'effet des différents traitements de NaCl seul ou associé avec l'acide salicylique sur les deux variétés étudiées, quelques paramètres durant la phase de germination et la phase de croissance ont été mesurés à savoir :

### V.8.1.Paramètres de germination

#### V.8.1.1.Taux de germination

Ce paramètre constitue le meilleur moyen d'identification de la concentration saline qui présente la limite physiologique de germination des graines. Il est exprimé par le rapport de nombre des graines germées sur le nombre total des graines.

Le pourcentage de germination est déterminé selon Shiferaw et Baker, (1996) par :

$$FG \% = 100 \times \frac{NTGG}{NTGS}$$

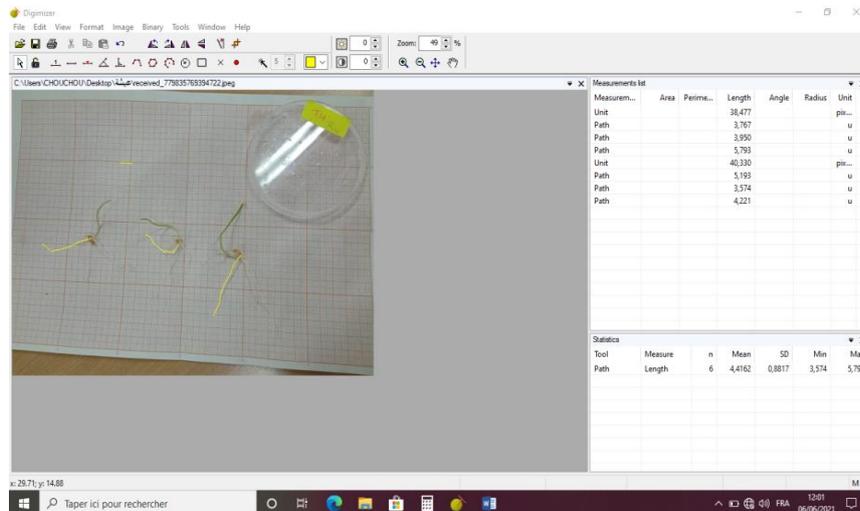
Avec % G est le pourcentage de germination, NTGG est le nombre total de graines qui ont germé, et NTGS est le nombre total de graines soumises à la germination dans les boites de pétris. Une semence est considérée germée lorsque la radicule perce les téguments de la graine. Le pourcentage de germination a été déterminé tous les jours dès le deuxième jour après mise en incubation jusqu'au huitième jour. La vitesse de germination a été calculée en divisant le pourcentage de graines germées à chaque comptage par le nombre de jours de mise en essai de germination.

#### V.8.1.2.Taux d'inhibition

D'après **CHERIF et al., (2016)**, le taux d'inhibition il est estimé en calculant le rapport de nombre de grains semis moins le nombre de graines germes par rapport au total des graines :  $TI \% = 100 - TG \%$

#### V.8.1.3.Longueur de radicelle et des coléoptiles (cm)

L'évaluation de ce paramètre a été réalisée à l'aide du logiciel Digimezer Version 4.0.0.0 copyright © 2005-2011 MedCalc. Software ([www.Digimizer.com](http://www.Digimizer.com)) pour mesurer la longueur des radicelles et des coléoptiles des graines du blé germées.



**Figure 26 :** Mesures de la partie racinaire des graines de blé durant la phase de germination par logiciel DIGIMIZER (Source personnel, 2021).

### V.9. Paramètres de croissance

#### V.9.1. Longueur des tiges (cm)

Pour évaluer la croissance de la plante vis-à-vis du stress salin nous avons mesuré la hauteur de la tige. Avant prélèvement de matériel végétal nous avons mesuré la hauteur de la tige en centimètres (cm) à l'aide d'une règle graduée. Nous renseigne sur l'effet du stress sur la croissance des plantes stressées comparativement au témoin.

#### V.9.2. Biomasse fraîche produite (g)

La biomasse fraîche produite consiste à peser les différents organes de la plante en gramme au niveau de chaque traitement et ce pour tous les plants stressés et non stressés, à l'aide d'une balance. Les pesées ont porté sur le poids frais des feuilles, des tiges et des racines au moment de chaque coupe.

- Poids frais de la partie aérienne en g.
- Poids frais de la partie racinaire en g.



**Figure 27 :** Aspect général du Balance de précision utilisée pour mesurer les biomasses (Source personnelle, 2021).

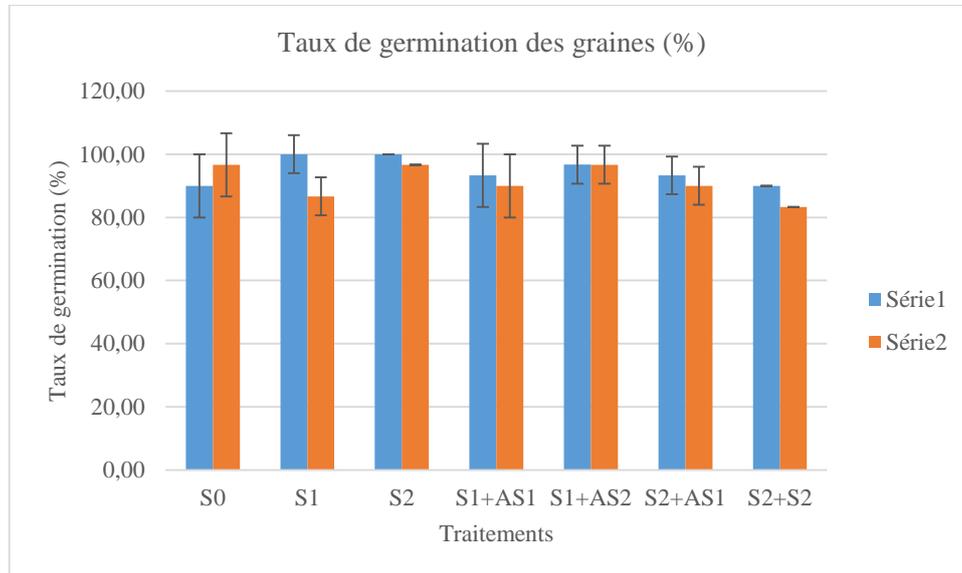
### V.10. Analyse statistique des données

Les données obtenues sont soumises à une analyse de la variance à deux facteurs étudiées (organe utilisée pour l'extraction et dose de solution testée). Les données sont présentées sous forme des courbes. Ces représentations sont réalisées par le logiciel Excel 2007. Les données présentées représentent une moyenne de 04 répétitions. La comparaison des moyennes a été faite par le test de la plus petite différence significatif au seuil 5%. Une valeur de probabilité (P) égale à 0,05 est considérée comme une valeur statistiquement significative, alors que lorsque il est inférieur à 0,05 est considérée comme hautement significative.

## VI.1.Effet de la salinité et de l'acide salicylique sur les paramètres de germination chez la culture d'orge et de blé dur

### VI.1.1.Effet sur le taux de germination

Les résultats relatifs de la faculté germinative des semences deux espèces blé dur et orge sont présentées dans la figure suivante.



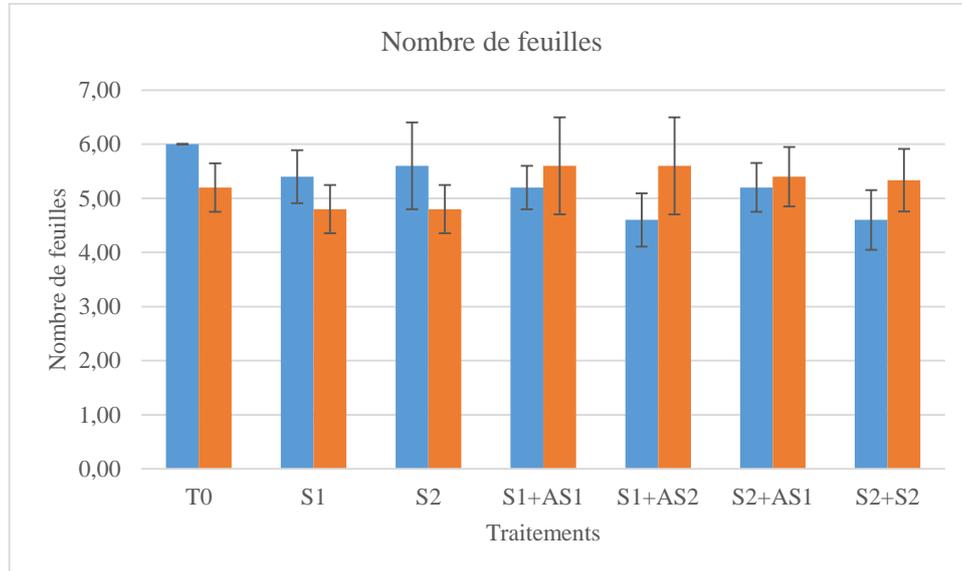
**Figure 28 :** Effet de la combinaison salinité (50 et 100 mM de NaCl)- Acide salicylique (0,25 et 0,50 mM) sur le taux de germination finale des graines de blé dur et de l'orge pendant 8 jours de culture dans des conditions contrôlées.

D'après cette figure, nous remarquons que la présence de NaCl dans le milieu nutritif n'a pas exercé un effet dépressif significativement remarquable sur la germination des deux espèces testées. Néanmoins, les graines d'orge semblent plus résistant à la salinité exercée par les deux concentrations de NaCl que les semences de culture de blé qui présente une sensibilité vis-à-vis les concentrations testées. En outre, la combinaison salinité acide salicylique concentré à 0,25mM améliore le taux de germination finale des graines des deux espèces testées. Or, la combinaison 0,50mM d'acide salicylique avec 100mM de NaCl n'a montrée aucun effet stimulateur de la germination des semences de deux espèces testées.

## VI.2.Effet de la salinité et de l'acide salicylique sur les paramètres de croissances chez la culture d'orge et de blé dur

### VI.2.1.Effet sur le nombre de feuilles

Les résultats relatifs de ce paramètre sont illustrés dans la figure suivante.



**Figure 29** : Effet de la combinaison salinité (50 et 100 mM de NaCl)- Acide salicylique (0,25 et 0,50 mM) sur le nombre de feuilles de deux espèces testées.

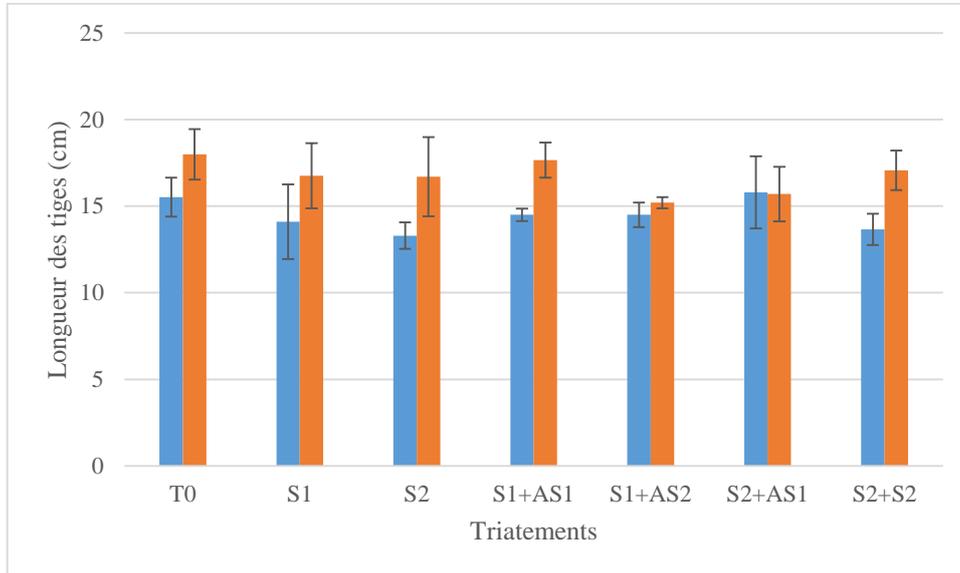
D'après cette figure, nous remarquons que la présence de NaCl dans le milieu nutritif exerce un effet dépressif significativement remarquable sur le nombre de feuilles de deux espèces examinées. Les réductions révélées basculent entre 10 et 6,66% pour la culture d'orge et de 13,13 et 20% pour la culture de blé dur respectivement par rapport au témoin. Néanmoins, la combinaison 0,25mM d'acide salicylique avec 50mM de NaCl a exercé un effet stimulateur sur le nombre de feuilles chez la culture d'orge comparativement à la culture d'orge. Les accroissements révélés correspondent à 7,69% par rapport au témoin pour les combinaisons 0,25avec 50 et 100mM de NaCl. Alors que la culture de blé n'a pas montrée une nette amélioration pour ces deux combinaisons.

### VI.2.2.Effet sur la longueur des tiges (cm)

Les résultats relatifs de ce paramètre sont illustrés dans la figure suivante.

D'après cette figure, nous remarquons que la présence de NaCl dans le milieu nutritif exerce un effet dépressif significativement remarquable sur la longueur des tiges pour la culture de blé dur comparativement à la culture d'orge qui semble être résistante à la salinité exercée par le NaCl. Les réductions de la longueur des tiges pour la culture de blé dur basculent entre 9,14 et 14,30%, alors qu'elles variaient entre 6,88 et 7,22% pour la longueur des tiges chez la culture d'orge. Néanmoins, la combinaison 0,25mM d'acide salicylique avec 50 ou 100 mM de

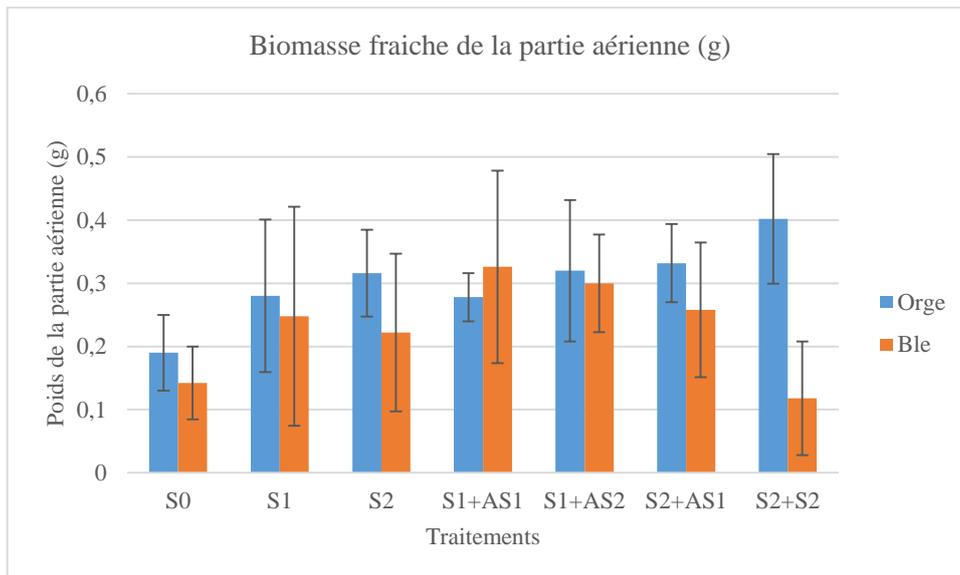
NaCl a exercé un effet stimulateur sur la longueur des tiges pour la culture d'orge. Les accroissements révélés sont de 2,83 % par rapport au témoin. De plus, la combinaison 0,25mM d'acide salicylique avec 50mM de NaCl a révélé une légère augmentation de la longueur des tiges pour cette culture. Celle-ci correspond à 6,38% par rapport au témoin.



**Figure 30** : Effet de la combinaison salinité (50 et 100 mM de NaCl)- Acide salicylique (0,25 et 0,50 mM) sur la longueur des tiges de deux espèces testées.

### VI.2.3.Effet sur la biomasse fraîche de la partie aérienne (cm)

Les résultats relatifs de ce paramètre sont illustrés dans la figure suivante.



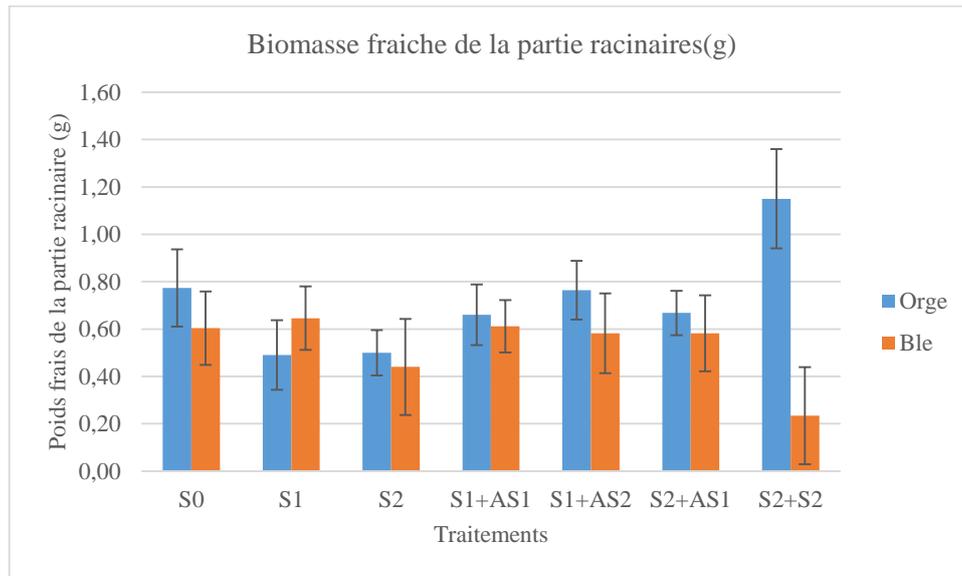
**Figure 31** : Effet de la combinaison salinité (50 et 100 mM de NaCl)- Acide salicylique (0,25 et 0,50 mM) sur la biomasse fraîche de la partie aérienne de deux espèces testées.

D'après cette figure, nous remarquons que la combinaison de la salinité avec 0,25mM d'acide salicylique a stimulée la biomasse fraîche de la partie aérienne. Pour cela, les

accroissements enregistrés sont de l'ordre 46,31% et 68,42% pour la biomasse fraîche de la partie aérienne chez la culture d'orge alors qu'elles sont de 132,85% et 114,28% pour la biomasse fraîche de la partie aérienne pour la culture de blé dur. Néanmoins, la combinaison de la salinité exercée par le NaCl avec 0,50mM d'acide salicylique a révélée une réduction de la biomasse fraîche de la partie équivalente de 16,90% par rapport au témoin.

**VI.2.4.Effet sur la biomasse fraîche de la partie racinaire (cm)**

Les résultats relatifs de ce paramètre sont illustrés dans la figure suivante.



**Figure 32** : Effet de la combinaison salinité (50 et 100 mM de NaCl)- Acide salicylique (0,25 et 0,50 mM) sur la biomasse fraîche de la partie racinaire de deux espèces testées.

D'après cette figure, nous remarquons que la salinité exerce un effet dépressif sur la biomasse fraîche de la partie racinaire chez la culture d'orge comparativement la culture de blé dur qui présente une résistance a ces deux concentration salines testées. Les chutes de la biomasse fraîches enregistrées sont de 36,36% et 35,06% en présence de 50 et 100 mM de NaCl par rapport au témoin pour la culture d'orge alors qu'elle est de 26,66% en présence de 100mM de NaCl pour la culture de blé dur. Néanmoins, la combinaison 100mM de NaCl avec 0,50mM d'acide salicylique révèle un accroissement de 49,35% par rapport au témoin

## Conclusion

L'achèvement de la germination et la croissance des graines de l'orge et blé dans des conditions salines exercées par le NaCl concentrées à 50 mM 100 mM, ainsi qu'en présence d'hormone végétale (AS) concentration à 0.25mM .5mM durant une période de 8 jours de germination et 15 jours de croissance, à compter du début de l'imbibition sous une température de 25°C, met en évidence des différences de comportement des graines. Ainsi les protocoles utilisés ont permis de bien comprendre le comportement physiologique des graines à la cour de la germination et la croissance en réponse au stress salin associé ou non aux traitements hormonaux

De ces résultats il est possible de retenir l'essentiel :

L'application du stress salin à 50 mM, 100mM de NaCl dans l'eau de robinet n'a pas exercés aucun effet significative sur la cinétique et le taux de germination des de espèces testés ; par contre nous avons constaté l'impact négative de l'application de stress salin sur la croissance de ces deux espèces. Il faut remarquer dans cette étude que la présence de l'acide salicylique a joué un rôle dans la réponse des plantes à la salinité en augmentant la capacité germinative des graines. Cette action se traduit par des augmentations dans la précocité, et le taux final de la germination, de même cette phytohormone a agit de façon positive sur la longueur des tiges et le nombre des feuilles, la biomasse aérienne et racinaire des plantules de l'orge et blé. D'autre part et d'après ce travail on peut déduire que la variété de blé est plus sensible vis-à-vis le stress salin par rapport à l'orge.

En perspectives, il est souhaitable de s'orienter vers la recommandation suivante :

- Utiliser la phytohormone AS pour améliorer la croissance et le rendement des plantes dans les zones salins de plus peut donc être recommandé dans le programme d'amélioration dans la germination des graines dormants ;
- Augmenter la concentration en NaCl dans le but d'étudier la tolérance de ces espèces vis-à-vis le stress salin ;
- Poursuivre l'analyse du comportement du l'orge et le blé a tous stade de développement dans le but de réunir des informations supplémentaires pour comprendre les mécanismes d'adaptation de ces plantes en condition stressants.

## Références bibliographiques

- Abbassenne F., Bouzerzour H et Hachemi L., 1998.** Phénologie et production du blé dur (*Triticum durum* Desf) .en zone semi-aride. Annales agronomiques institut national agronomique, El Harrach, 18 : 24-36
- Allahdadi, I., 2011.** The role of phytohormones in alleviating salt stress in crop plants. *Aust. J. Crop Sci.* 5, 726.
- Allosio-Ouarnier, N. (1999)** Caractérisation de la transformation de l'orge en malt par des méthodes de spectroscopie vibrationnelle, Thèse INPL, spécialité : Biotechnologies et Industries Alimentaires, Nancy
- ANONYME b., 2008:**Série B des statistiques agricoles de la D .S.A de Relizane
- Bafs.O.(2008).**Dynamique de propagation de la rhynchosporiose, the chiminalcompany october2008.p3-4
- Ben ahmed H.,** Mimouni H., Manaa A et Zid E., 2010. L'acide salicylique améliore la tolérance de la tomate cultivée (*Solanumlycopersicum*) à la contrainte saline, *Acta botanica gallica*, vol 157:pp361-368.
- Benmahammed A.,** Bouzerzour H., Djekoune A et Hassous k L., 2004. Efficacité de la sélection précoce de la biomasse chez l'orge (*Hordeum vulgare* L.) en zone semi-aride. *Sciences & Technologie*, N°22. pp. 80-85.
- Barron C., Abécassis J., Chaurand M., Lullien-Pellerin V., Mabille F., Rouau X., Sadoudi A. et Samson M.F., 2012.** Accès à des molécules d'intérêt par fractionnement par voie sèche. *Innovations Agronomiques* 19, 51-62.
- Belaid DJ. (1986).** Aspect de la céréaliculture algérienne, OPU, pp : 207.
- Boulal H., Zaghouane O., El Mourid M., et Rezgui L. (2007).** Guide pratique de la conduite des céréales d'automne (blés et orges) dans le Maghreb (Algérie, Maroc, Tunisie). Ed. TIGC, INRA, ICARDA, Algérie, pp : 176.
- Brouillard C.(2013).**les maladies cryptogamiques et caractéristiques.(en ligne).P consulté le 31.05. 2014 . adresse URL <http://www.rustica.fr/articale-jardin/maladies-et-parasites/maladies-cryptogamique-définition-et-caractéristiques>, 4104. Html
- Bouakaz K et Oussaid Y. (2013).** Reconnaissance et identification des principales maladies cryptogamiques du blé et de l'orge. institut national de la protection des végétaux. ISBN : 978-9961-9523-1-3. P.8.19.23.26.25.27.
- Bahlouli F., Bouzerzour H. and Benmahamad A., 2005.** Selection of stable and high yielding cultivar of durum wheat under semi-aride conditions.*Pakistan journal of agronomy* 4: 360p
- Brink M., Belay G., (2006).** Céréales et légumes secs. Ressources végétales de l'Afrique tropicale1. Fondation PROTA/ Backhuys Publishers/CTA. Pays-Bas, 327 p.

**Bencharif A., Tozanli S., Lemeillieur S., (2009).** Dynamique des acteurs dans les filières agronomiques et agroalimentaires. Options Méditerranéennes, B 64, Perspectives des politiques agricoles en Afrique du Nord ; pp 94-142.

**Belagrouz,A.(2013)** Analyse du comportement du Blé Tendre, Variété EL WIFAK (*Triticum aestivum* L) conduit en labour conventionnel, travail Minimum de semis Direct sur les Hautes Plaines Sétifiennes , Mémoire e magister , Université Ferhat Abbas, Sétif 107p, technol, 33 :37-47

**Clerget Y., 2011.** Biodiversité des céréales : Origine et évolution. Montbéliard. 17p.

**Chennafi, H., Aïdaoui A., Bouzerzour H., and Saci A., (2006).** Yield response of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivar Waha to deficit irrigation under semi-arid growth conditions. Asian J. Plant Sci., 5, 854-860

**Coupe, S.A., Palmer, B.G., Lake, J.A., Overy, S.A., Oxborough, K. and Woodward, F.I., 2006.** Systemic signalling of environmental cues in *Arabidopsis* leaves. J. Exp. Bot. 57, 329- 341

**Clement-Grandcourt M. et Prats J. (1971).** Les céréales. Ed. Baillière et Co, Paris- France. Pp : 51.

**Société Malteurop (2000)** Elaboration des malts utilisés en brasserie, Techniques de L'Ingénieur, F6200

**Ceccarelli S. and Grando S. (1996).** *Hordeum vulgare* L. In : Grubben, G.J.H. &Partohardjono, S. (Editors). Plant Resources of South-East Asia. Cereals Backhuys Publishers, Leiden, Netherlands, 10, pp : 99–102.

**Djermoun A., 2009.** La production céréalière en Algérie: les caractéristiques, Revue nature et technologie, n° 01, p45 à 53.

**Djerah A et Oudjehih B., 2015.** Effet du stress salin sur la germination de seize variétés d'orge (*Hordeum vulgare* L.), Courrier du savoir-N°20, Décembre, pp.47-56.

**Doumandji A., Doumandji S et Doumandji M B., 2003.** Technologie de transformations des blés et problèmes dus aux insectes au stock, cours de technologie des céréales, 67p.

**Difallah.S. (2009).** Etudes bibliographique de la génétique de résistance à *drechslerateres*, Université Mohamed Boudiaf de M'sila Algérie. memoire.p.6-7.

**Djermoun Abdelkadern, 2009.** La production céréalière en Algérie : les principales caractéristiques Revue Nature et Technologie. N° 01. Pages 45 à 53

**El-Tayeb, M. (2005).** Réponse des grains d'orge à l'effet interactif de la salinité et l'acide salicylique. Régul. De croissance des plantes. 45, 215-224. doi: 10.1007/ s10725-005-4928-1

**Ezzahiri B.,(2011)** ;production du blé,la septoriose potentiellement dommageable cette année .bulletion

de l'agriculture dy maghreb N49.*Fusarium* spp. *Phytopathology* 89:1152–1161. 1999.

**Fahad, S., Hussain, S., Matloob, A., et al. (2015).** Phytohormones and plant responses to salinity stress: a review. Plant Growth Regulation, 75(2): p. 391-404.

**feuille P. (2000)** : le grain de blé (composition et utilisation). INRA. Paris. PP : 5-6.

- Gâte P. (1995).** Ecophysiologie du blé de la plante à la culture. Techniques & Documentation, Paris, 429 p.
- Gomez-Macpherson H. (2001).** Hordeumvulgare. <http://ecoport.org/ep?plant=1232>
- Guiga W., 2006.** Identification des inhibiteurs de la germination de l'orge et mise au point d'un procédé de traitement des eaux de trempage en malterie en vue de leur recyclage, Thèse Doctorat de l'institut national polytechnique de Lorraine, 198p
- Hamadache A. (2013).** Eléments de phytotechnie générale-Grandes Cultures-Tome 1 : le blé, pp : 11-49.
- Hamadache A.M., (2001).** Manuel illustré des grandes cultures à l'usage des valorisateurs et techniciens de l'agriculture. Stades et variétés de blé, ITGC, Alger ; p 22.
- Heller r.,Esnault.r., Lance.,(1998).**Physiologie Végétale.Tome 1 Nutrition.Paris.323p
- Hopkins, W. G. (2003).** Physiologie végétale : De Boeck Supérieur
- Haouala F., Ferjani H et Beb El Hadj S., 2007.** Effet de la salinité sur la répartition des cations (Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> et Ca<sup>2+</sup>) et du chlore (Cl<sup>-</sup>) dans les parties aériennes et les racines du ray-grass anglais et du chiendent. Biotechnol. Agron. Soc. Environ, 11(3), 235-244.
- INRA, .( 2014).** Céréales à pailles. Note commune Résistances aux fongicides, .p.3-7.
- Jestin L. (1996).** L'orge, amélioration des espèces végétales cultivées. Ed. INRA, Paris, pp : 55-70.
- Javid, M. G., Sorooshzadeh, A., Moradi, F., Sanavy, S. A. M. M.**
- Khan M. A. & Gulzar S. (2003).** Germination responses of Sporobolus ioclados: a saline desert grass. Journal of Arid Environments 53(3), 387-394.
- Lacroix. M.,( 2008).**Maladies des céréales et de la luzerne, agronome-phytopathologiste.
- Lauzon M .(2007).** Fusariose de l'épi chez le blé et l'orge.cérom.CanadaNo2.01.p5
- Lepoivre, P.,(2003).**Phytopathologie bases moléculaires et biologiques des pathosystèmes et fondements des stratégies de lutte. De Boeck Université. Bruxelles,. Belgium. 432p
- Laala, Z. (2018).** Analyse en chemin des relations entre le rendement en grains et les composantes chez des populations F3 de blé dur (Triticum durum Desf.) sous conditions semiarides
- Madr., (2009).** Statistiques Agricoles Série B 09.
- Mazouze, L., (2006).** Etude de la contribution des paramètres phéno-morphologique dans l'adaptation du blé dur (Triticum durum Desf) dans l'étage bioclimatique semi-aride. Mémoire de Magister, Université Hadj Lakhdar, Batna.
- MENADE A., 2009 :** Rythme de développement, utilisation de l'eau et rendement de l'orge (Hordeum vulgare L) dans l'étage bioclimatique semi-aride. Thèse magister, INAel Harrach ,2006.
- MOSSAB M., 2007 :** Contribution à l'étude de l'exploitation à double fin de l'orge (H, vulgare) en zones semi-arides et d'altitude .Thèse De magister, INA EL Harrache .2006.
- Moule C., 1971.** Céréales Phytotechnie spécial Tome II, La maison rustique, Paris, 95p.

- Munns R. and Tester M., 2008.** Mechanisms of salinity tolerance. *Ann Rev Plant Physiol* 59:651–681.
- Michèle Mosiniak, Roger Prat et Jean-Claude Roland, 2006.** DU BLÉ AU PAIN. Biologie et Multimédia - Université Pierre et Marie Curie - UFR de Biologie.
- Nadjem. K., (2012).** Contribution à 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 Magister Université Ferhat Abbas Sétif, p : 31.
- Oudjani, W. (2009).** Diversité de 25 génotypes de blé dur (*Triticum durum* Desf) étude des caracteres de production et d'adaptation. Mémoire de magistere, 113.
- Ouanzar, S., 2012.** Etude comparative de l'effet du semis direct et du labour conventionnel sur le comportement du blé dur (*Triticum durum* Desf.). Mémoire de Magister Production Végétale et Agriculture de Conservation. Univ Ferhat Abbas Setif. P : 03.
- Ouanzar S., (2012).** Etude comparative de l'effet du semis direct et du labour conventionnel sur le comportement du blé dur (*Triticum durum* Desf.). Thèse Magister, Université de Sétif, 67 p.
- Palmer, G.H. (1989),** Cereals in malting and brewing, *Cereal Science and Technology*, éd. Aberdeen University Press, p 61.
- Pierre Jean.,(2001)** .la revue de la filière Orge-Malt-Bière livret « Orge, céréale de tradition »
- Paul C., (2007).** Céréales et alimentation : une approche globale Agriculture Environnement prairies. Coll. Sciences et Techniques agricoles. 17 ème Ed. 464.
- Pospíšilová, J., 2003.** Participation of phytohormones in the stomatal regulation of gas exchange during water stress. *Biol. Plant.* 46, 491-506.
- Raskin, I.** Role of salicylic acid in plants. *Annu. Rev. Plant Biol.* **1992**, 43, 439–463.
- Rasmussen J B., Hammerschmidt R and Zook M N., 1991.** Systematic induction of salicylic acid accumulation in cucumber after inoculation with *Pseudomonas syringae* pv *syringae*. *Plant physiol.* 97(4):1342-1347.
- Simon M., Codaccioni P., et Coeurx L. (1989).** Identification et classification des variétés d'orge cultivées en France, éd. INRA. France. pp : 16.
- Soltner D., 2005.** Les grandes productions végétales. 20ème. Ed. CSTA, 472p.
- Soltner D., 2007.** Les bases de la production végétale, Tome III la plante et son amélioration, 5e édition, CSTA, 304p.
- Soltner D., 2005.** Les grandes productions végétales. 21 eme édition .Page : 39-41 et 71.
- Surget A., Baron C. (2005).** Histologie du grain de blé. *Industrie des cereals*.
- Soltner D., (1998).** Les grandes productions végétales : céréales, plantes sarclées, prairies. Sainte-Gemme-sur-Loire, Sciences et Techniques Agricoles.
- Sauer, M., Robert, S., kleine-Vehn, J., 2013.** Auxin: simply complicated. *J. Exp. Bot.* 64, 2565-2577.

- Upreti, K. K., & Sharma, M., 2016.** Role of plant growth regulators in abiotic stress tolerance. In *Abiotic Stress Physiology of Horticultural Crops*, 19-46. Springer India.
- Von Bothmer R., Jacobsen N. and Baden C. (1995).** An ecogeographical study of the genus *Hordeum*. 2nd Edition. Systematic and ecogeographic studies on crop gene pools 7. IBPGR, Rome, Italy. pp : 129.
- Valles V., Valles A M et Dosso M., 2016.** Méthode actuelles d'étude des problèmes De salinités liées à l'irrigation, VSNA- Mission ORSTOM Tunisie, 78p.
- Vazirimehr M R and Rigi K., 2014.** Effect of salicylic acid in agriculture. *International journal of plant, animal and environmental sciences*, Vol 4 : pp291-296.
- Wardlaw I. F., 2002.** Interaction between drought and chronic high temperature during kernel filling in wheat in a controlled environment .*Annals of Botany*, 90:469-476
- Waśkiewicz, A., Gładysz, O., Goliński, P., 2016.** Participation of Phytohormones in Adaptation to Salt Stress. In *Plant Hormones under Challenging Environmental Factors*, 75- 115. Springer Netherlands
- Werner, T., & Schmölling, T., 2009.** Cytokinin action in plant development. *Curr. Opin. Plant Biol.* 12, 527-538.
- Yamaguchi, S., 2008.** Gibberellin metabolism and its regulation. *Annu. Rev. Plant Biol.* 59, 225-251
- Zibouche M et Grimes C., 2016.** Contribution à l'étude des flavonoïdes et de L'activité antioxydant de l'orge : *Hordeum vulgare*, Thèse Master, Université de Constantine, 88p.